

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TERMAL GÖRÜNTÜLEME SİSTEMLERİNDE  
TARAYICI SİSTEMİNİN  
MODELLENMESİ VE KONTROLÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Murat KALKAN**

**Anabilim Dalı : Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği**

**Programı : Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği**

**HAZİRAN 2009**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TERMAL GÖRÜNTÜLEME SİSTEMLERİNDE  
TARAYICI SİSTEMİNİN  
MODELLENMESİ VE KONTROLÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Murat KALKAN  
(504061120)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 30 Nisan 2009**

**Tezin Savunulduğu Tarih : 04 Haziran 2009**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. İbrahim EKŞİN (İTÜ)  
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Metin GÖKAŞAN (İTÜ)  
Yrd. Doç. Dr. Berk ÜSTÜNDAĞ (İTÜ)**

**HAZİRAN 2009**







## ÖNSÖZ

Bu tez çalışması boyunca yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım Prof. Dr. İbrahim EKSİN ve değerli hocam Prof. Dr. Metin GÖKAŞAN'a teşekkürü borç bilirim. Gerekli çalışma ortamını hazırlayan proje yöneticim ve ekip liderime ayrıca başta Dr. Volkan NALBANTOĞLU olmak üzere desteklerini veren tüm ASELSAN A.Ş. MGEO çalışanlarına sonsuz teşekkür ederim. Yüksek lisans öğrenimim boyunca bana maddi destekte bulunan TÜBİTAK – BİDEB 'na minnettarlığımı sunarım. Ayrıca maddi ve manevi desteklerini hiç esirgemeyen aileme, kardeşim Kaan'a ve dostlarıma şükranlarımı sunarım. Son olarak yoğun çalışma günlerim boyunca sabrını ve desteğini esirgemeyen eşim Ece'ye sonsuz teşekkür ederim.

Haziran 2009

Murat KALKAN

(Mühendis)



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

|                                                                   |      |
|-------------------------------------------------------------------|------|
| ÖNSÖZ.....                                                        | iii  |
| KISALTMALAR .....                                                 | vii  |
| ÇİZELGE LİSTESİ.....                                              | ix   |
| ŞEKİL LİSTESİ.....                                                | xi   |
| SEMBOL LİSTESİ .....                                              | xiii |
| ÖZET.....                                                         | xv   |
| SUMMARY .....                                                     | xvii |
| 1. GİRİŞ .....                                                    | 1    |
| 2. TARAYICI SİSTEMİ.....                                          | 3    |
| 2.1 Sistem Tanımı .....                                           | 3    |
| 2.2 Kontrol Problemi.....                                         | 9    |
| 3. TARAYICI SİSTEMİNİN MODELLENMESİ.....                          | 15   |
| 3.1 Mekanik Bileşenlerinin Benzetimi.....                         | 17   |
| 3.1.1 Tarayıcı sistemi motor – yük modeli .....                   | 17   |
| 3.1.2 Tarayıcı sistemi parametreleri.....                         | 18   |
| 3.1.3 Dinamik analizör kullanılarak parametre atama .....         | 19   |
| 3.1.4 Kuru sürtünme belirlenmesi.....                             | 22   |
| 3.1.5 Parametrik Simulink® mekanik blok modeli .....              | 23   |
| 3.1.6 Çözücü – ayrıştırıcı modeli .....                           | 26   |
| 3.1.6.1 Tanım ve kullanım alanları .....                          | 26   |
| 3.1.6.2 Değişik çözücü tipleri .....                              | 27   |
| 3.1.6.3 Tarayıcı sistemi çözücüsü .....                           | 31   |
| 3.2 Donanım Bileşenlerinin Benzetimi .....                        | 35   |
| 3.2.1 Parametrik Simulink® donanım blok modeli .....              | 35   |
| 3.2.1.1 Analog işaret işleme .....                                | 35   |
| 3.2.1.2 Analog sayısal çevirici .....                             | 36   |
| 3.2.1.3 Darbe genişlikli modülasyon sürücü .....                  | 37   |
| 4. TARAYICI SİSTEMİNİN KONTROLÜ .....                             | 39   |
| 4.1 İleri Besleme Akım Bileşeni Tasarımı .....                    | 41   |
| 4.2 Kapalı Çevrim Kontrolörü Tasarımı .....                       | 42   |
| 4.2.1 Eğri uydurma yöntemi .....                                  | 42   |
| 4.2.2 Çift integratörlü PI kontrolör tasarımı .....               | 45   |
| 4.2.3 Faz ilerlemeli – gerilemeli kontrolör tasarımı.....         | 47   |
| 4.2.4 Kapalı çevrim kontrolör tasarımı simülasyon sonuçları ..... | 50   |
| 4.3 Uyarlamalı Akım Bileşeni Tasarımı .....                       | 55   |
| 4.4 Yazılım Bileşenlerinin Benzetimi .....                        | 57   |
| 4.4.1 Parametrik Simulink® yazılım blok modeli .....              | 57   |
| 4.4.1.1 Referans üretici .....                                    | 57   |
| 4.4.1.2 İleri besleme akım bileşeni .....                         | 60   |
| 4.4.1.3 Kapalı çevrim akım bileşeni .....                         | 61   |
| 5. DENEYSEL SONUÇLAR.....                                         | 63   |

|                                                                             |           |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 5.1 Parametrik Simulink® Modelinin Gerçek Çalışma Verileri ile Doğrulanması | 63        |
| 5.2 Kontrol Sistem Tasarımı Analizi .....                                   | 65        |
| 5.2.1 Kontrol işareti bileşenlerinin etkisinin analizi .....                | 65        |
| 5.2.2 Kontrol sistem performansı .....                                      | 69        |
| <b>6. SONUÇLAR .....</b>                                                    | <b>73</b> |
| <b>KAYNAKLAR.....</b>                                                       | <b>75</b> |
| <b>EKLER.....</b>                                                           | <b>79</b> |

## **KISALTMALAR**

|             |                                       |
|-------------|---------------------------------------|
| <b>MGEO</b> | : Mikroelektronik Gdm Elektro-Optik |
| <b>HD</b>   | : High Definition                     |
| <b>TEC</b>  | : Thermo Electric Cooler              |
| <b>BGF</b>  | : Bant Geçirgen Filtre                |
| <b>AS</b>  | : Analog Sayısal evirici             |
| <b>MDAC</b> | : Multiple Digital Analog Converter   |
| <b>BG</b>   | : Bant Genişliği                      |
| <b>SAC</b>  | : Sayısal Analog evirici             |



## ÇİZELGE LİSTESİ

|                                                                        | <b><u>Sayfa</u></b> |
|------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| Çizelge 3.1 : Tarayıcı motor - ayna sistemi parametreleri.....         | 19                  |
| Çizelge 3.2 : Tarayıcı sistemi parametreleri. ....                     | 22                  |
| Çizelge 3.3 : Tarayıcı sistemi çözücü devresi parametreleri. ....      | 33                  |
| Çizelge 3.4 : Tarayıcı sistemi pozisyon okuma bloğu parametreleri..... | 34                  |



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

|            |                                                                          |    |
|------------|--------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1  | : Elektromanyetik tayf bölgeleri [11].                                   | 3  |
| Şekil 2.2  | : Termal görüntüleme sistemi elemanları.                                 | 5  |
| Şekil 2.3  | : Tarama mekanizması.                                                    | 6  |
| Şekil 2.4  | : Görüntü tarama mekanizması.                                            | 7  |
| Şekil 2.5  | : Tarayıcı motor - ayna takımı -1.                                       | 8  |
| Şekil 2.6  | : Tarayıcı motor - ayna takımı -2. <sup>1</sup>                          | 8  |
| Şekil 2.7  | : Hatasız taramada araba görüntüsü.                                      | 9  |
| Şekil 2.8  | : Sabit hızın bozulması durumunda yanlış görüntü. <sup>2</sup>           | 9  |
| Şekil 2.9  | : Tarama çevrimleri arasındaki hatadan kaynaklı yanlış görüntü.          | 10 |
| Şekil 2.10 | : Testere biçimi referans pozisyon.                                      | 11 |
| Şekil 2.11 | : Tarayıcı tarama bölgeleri.                                             | 12 |
| Şekil 2.12 | : Tarayıcı sistemi referans pozisyon profili.                            | 13 |
| Şekil 2.13 | : Tarayıcı sistemi referans pozisyon - ivme - hız profili.               | 13 |
| Şekil 3.1  | : Tarayıcı simülasyonu sistem üst blok diyagramı.                        | 16 |
| Şekil 3.2  | : İkinci dereceden klasik motor yük modeli.                              | 17 |
| Şekil 3.3  | : Değişik burulma sabiti değerleri için tarayıcı sistemi Bode diyagramı. | 18 |
| Şekil 3.4  | : Dinamik analizör ile hazırlanan test düzeneği.                         | 20 |
| Şekil 3.5  | : Dinamik analizör Bode diyagramı.                                       | 21 |
| Şekil 3.6  | : Tarayıcı sistemi Bode diyagramı.                                       | 22 |
| Şekil 3.7  | : Tarayıcı simülasyonu sürücü - tarayıcı mekanizması.                    | 24 |
| Şekil 3.8  | : Tarayıcı simülasyonu PWM Sürücü&Motor modeli.                          | 24 |
| Şekil 3.9  | : Tarayıcı simülasyon sürtünme etkili nonlinear sistem modeli.           | 25 |
| Şekil 3.10 | : Tarayıcı simülasyonu dahl modeli sürtünme bloğu.                       | 25 |
| Şekil 3.11 | : Çözücü kesit görünüşleri.                                              | 26 |
| Şekil 3.12 | : LVDT sarım görünüşleri.                                                | 27 |
| Şekil 3.13 | : Çözücü sarım görünüşleri.                                              | 27 |
| Şekil 3.14 | : Çok hızlı çözücü çıkışları.                                            | 28 |
| Şekil 3.15 | : Çözücü kontrol çeviricisi diyagramı.                                   | 29 |
| Şekil 3.16 | : Dönüştürücü temel prensibi.                                            | 29 |
| Şekil 3.17 | : Çözücü kontrol çeviricisi diyagramı.                                   | 30 |
| Şekil 3.18 | : Tarayıcı sistemi çözücü sarımları.                                     | 31 |
| Şekil 3.19 | : Tarayıcı simülasyonu çözücü modeli.                                    | 33 |
| Şekil 3.20 | : Tarayıcı sistemi pozisyon hatası okuma bloğu.                          | 33 |
| Şekil 3.21 | : Modüle edilmiş sinüs dalgası.                                          | 34 |
| Şekil 3.22 | : Tarayıcı simülasyonu analog sinyal işleme modeli.                      | 36 |
| Şekil 3.23 | : Tarayıcı simülasyonu analog sayısal çevirici modeli.                   | 36 |
| Şekil 4.1  | : Tarayıcı sistemi pozisyon kontrol çevrimi.                             | 40 |
| Şekil 4.2  | : Gürültü etkili kapalı çevrim kontrol sistemi.                          | 43 |
| Şekil 4.3  | : Eğri uydurma için hedeflenen bode diyagramı kazanç eğrisi.             | 44 |
| Şekil 4.4  | : Tarayıcı sistem bode diyagramı.                                        | 45 |
| Şekil 4.5  | : Eğri uydurma yöntemine uygun kontrolör tipik bode diyagramı.           | 45 |
| Şekil 4.6  | : Örnek bir çift integratörlü PI kontrolör bode diyagramı.               | 47 |
| Şekil 4.7  | : Örnek bir faz ilerlemeli-gerilemeli kontrolör bode diyagramı.          | 49 |
| Şekil 4.8  | : Odabas makale faz ilerlemeli-gerilemeli kontrolör bode diyagramı.      | 49 |
| Şekil 4.9  | : Tarayıcı kontrolörlü kapalı çevrim sistemi.                            | 50 |

|                     |                                                                              |    |
|---------------------|------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 4.10 :</b> | Tarayıcı sistem modeli. ....                                                 | 50 |
| <b>Şekil 4.11 :</b> | Tarayıcı kontrolörlü sisteme ait kök eğrisi. ....                            | 51 |
| <b>Şekil 4.12 :</b> | Tarayıcı kontrolörlü sistemi baskın bölge kök eğrisi. ....                   | 51 |
| <b>Şekil 4.13 :</b> | Tarayıcı kontrolörlü sistemi birim basamak cevabı. ....                      | 52 |
| <b>Şekil 4.14 :</b> | Kontrolörlü sistem açık çevrim bode diyagramı. ....                          | 52 |
| <b>Şekil 4.15 :</b> | Kontrolörlü sistem kapalı çevrim bode diyagramı. ....                        | 53 |
| <b>Şekil 4.16 :</b> | Tarayıcı referans ve benzetim çıktısı pozisyon grafiği. ....                 | 54 |
| <b>Şekil 4.17 :</b> | Referans & tezde önerilen & Odabas kontrolör pozisyon grafiği. ....          | 54 |
| <b>Şekil 4.18 :</b> | Tarayıcı uyarlamalı akım blok diyagramı. ....                                | 56 |
| <b>Şekil 4.19 :</b> | Tarayıcı simülasyonu referans üretici bloğu. ....                            | 58 |
| <b>Şekil 4.20 :</b> | Tarayıcı simülasyonu profil üretici bloğu. ....                              | 58 |
| <b>Şekil 4.21 :</b> | Tarayıcı sistemi çözücü kosinüs ve sinüs komutları üretimi. ....             | 60 |
| <b>Şekil 4.22 :</b> | Tarayıcı simülasyonu kontrol algoritması bloğu. ....                         | 60 |
| <b>Şekil 4.23 :</b> | Tarayıcı simülasyonu ileri besleme akım bileşeni modeli. ....                | 61 |
| <b>Şekil 4.24 :</b> | Tarayıcı simülasyonu kapalı çevrim akım bileşeni modeli. ....                | 61 |
| <b>Şekil 5.1 :</b>  | Benzetim&Gerçek Çalışma&Referans pozisyon karşılaştırma. ....                | 64 |
| <b>Şekil 5.2 :</b>  | Benzetim&Gerçek Çalışma&Referans pozisyon karşılaştırma. ....                | 64 |
| <b>Şekil 5.3 :</b>  | Değişik akım bileşenlerinde toplam akım miktarı. ....                        | 66 |
| <b>Şekil 5.4 :</b>  | Değişik akım bileşeni durumunda toplam hata miktarı. ....                    | 66 |
| <b>Şekil 5.5 :</b>  | TEC ve geriye dönüş bölgesi hata miktarları. ....                            | 67 |
| <b>Şekil 5.6 :</b>  | Lineer bölge hata miktarları. ....                                           | 68 |
| <b>Şekil 5.7 :</b>  | Tüm akımlar ve çevrimdışı $I_{FF}$ iyileştirmesine ait hata miktarları. .... | 69 |
| <b>Şekil 5.8 :</b>  | Tarayıcı sistemi pozisyon hatası grafiği. ....                               | 70 |
| <b>Şekil 5.9 :</b>  | Tarayıcı sistemi lineer bölge pozisyon hatası grafiği. ....                  | 70 |
| <b>Şekil 5.10 :</b> | Tarayıcı sistemi akım bileşenleri grafiği. ....                              | 71 |
| <b>Şekil 5.11 :</b> | Tarayıcı sistemi ileri besleme ve toplam akım grafiği. ....                  | 71 |
| <b>Şekil A.1 :</b>  | Tarayıcı simülasyonu hız ve ivme profili üretimi. ....                       | 84 |
| <b>Şekil A.2 :</b>  | Tarayıcı simülasyonu kayma açısı bulma modeli. ....                          | 84 |

## SEMBOL LİSTESİ

|              |                                                      |
|--------------|------------------------------------------------------|
| $\theta$     | : Tarayıcı ayna pozisyonu                            |
| $w$          | : Tarayıcı ayna hızı                                 |
| $i_m$        | : Tarayıcı motoruna uygulanan akım                   |
| $k_t$        | : Tarayıcı motoru tork sabiti                        |
| $J$          | : Tarayıcı ayna – motor toplam eylemsizlik momenti   |
| $J_y$        | : Tarayıcı yük (ayna) eylemsizlik momenti            |
| $J_m$        | : Tarayıcı motor eylemsizlik momenti                 |
| $B$          | : Tarayıcı sistemi sönümleme faktörü                 |
| $k$          | : Tarayıcı sistemi burulma sabiti                    |
| $T$          | : Tarayıcı motor torku                               |
| $g$          | : İkinci derece transfer fonksiyonu sistem kazancı   |
| $\zeta$      | : İkinci derece transfer fonksiyonu sönümleme sabiti |
| $w_n$        | : İkinci derece transfer fonksiyonu doğal frekans    |
| $T_f$        | : Tarayıcı sistemi kopma torku                       |
| $L$          | : Tarayıcı motor induktansı                          |
| $R$          | : Tarayıcı motor direnci                             |
| $V_m$        | : Tarayıcı motoruna uygulanan gerilim                |
| $K_v$        | : Tarayıcı motor zıt elektromotor kuvveti            |
| $R_{ds(on)}$ | : Tarayıcı sürücüsü drain-source direnci             |
| $f_0$        | : Maksimum sürtünme değeri                           |
| $F_f$        | : Sürtünme kuvveti                                   |
| $\gamma$     | : Sürtünme sertlik katsayısı                         |
| $\alpha$     | : Referans ayna pozisyonu                            |
| $e_\theta$   | : Tarayıcı ayna pozisyonu hatası                     |
| $I_{FF}$     | : İleri besleme akım bileşeni                        |
| $I_{CL}$     | : Kapalı çevrim akım bileşeni                        |
| $I_{ADAPT}$  | : Uyarlamalı akım bileşeni                           |
| $I_{TOP}$    | : Toplam akım bileşeni                               |



## **TERMAL GÖRÜNTÜLEME SİSTEMLERİNDE TARAYICI SİSTEMİNİN MODELLENMESİ VE KONTROLÜ**

### **ÖZET**

Bu tez çalışmasında termal görüntüleme sistemlerinde kullanılan bir tarayıcı sistemine ait modelleme ve kontrol sistem tasarımı verilmiştir. Çalışmada ASELSAN A.Ş. MGEO bünyesinde geliştirilen termal kamera sisteminde bulunan tarayıcı alt sistemi kullanılmıştır. İlk bölümde tarayıcı sisteminin tarihsel gelişimi, tarayıcı tipleri ve değişik uygulama alanlarına ilişkin literatür araştırması verilmiştir. İkinci bölüm başında kızılötesi enerji ve termal görüntüleme sistemleri hakkında bilgi verilmiştir. Tarayıcı sisteminin termal görüntüleme sistemlerindeki kullanımı ile tarayıcı mekanizmasının yapısı ve görevleri sistem tanımı şeklinde verilmiştir. İkinci bölümde ayrıca sistem kısıtları ve ihtiyaçları verilmiş, bu tez çalışmasının motivasyonu olan tarayıcı sistemi kontrolündeki problemler ve termal görüntü üzerine etkileri incelenmiştir. Takip eden bölümde tarayıcı sisteminin alt birimleri tanıtılmış, bu alt birimlerin teorik ve deneysel modelleme adımları gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde donanım ve mekanik bileşenlerinin parametrik Simulink® benzetimi de oluşturulmuştur. Çalışmanın dördüncü bölümünde tarayıcı sisteminin kapalı çevrim kontrolörü ile ileri besleme ve uyarlamalı kontrol yapılarının detaylı tasarımı oluşturulan sistem benzetimi üzerinde açıklanmıştır. Bu bölümde ayrıca Simulink® benzetiminde kullanılacak kontrol algoritması modeli oluşturulmuştur. Bir sonraki bölümde tasarlanan kontrolör termal kamera sistemi üzerinde gerçekleşmiştir. Sürekli hal sistem çalışmasından elde edilen gerçek zamanlı veriler değerlendirilerek tarayıcı kontrol sistem tasarımı analizi ve oluşturulan sistem benzetiminin doğrulanması çalışmaları verilmiştir. Bu bölümde tasarımı verilen kapalı çevrim, ileri besleme ve uyarlamalı kontrol işareti bileşenlerinin sistem davranışı üzerinde etkisi incelenmiştir. Son bölümde ise çalışma adımları ile kullanılan yöntemlere ait sonuçlar yorumlanmıştır.



# **MODELLING AND CONTROL OF THE SCANNER SYSTEM IN THERMAL IMAGING SYSTEMS**

## **SUMMARY**

In this thesis modelling and control system design of a scanner system in thermal imaging system is given. Thermal imaging system, which is designed and produced in ASELSAN A.Ş. MGEO, is used in the study. First, literature survey about historical development of scanner system, types of scanners and different application areas is given. In the intro of second chapter, general information about infrared energy and thermal imaging system technology is explained. The role of scanner system in thermal imaging system, the internal structure and the aim of scanner mechanism is given with the perspective of a system description. System restrictions and requirements, control problem of a scanner system and the effects on thermal image in the manner of thesis motivation are given also in second chapter. In the following chapter, subsystems of scanner system are explained and the theoretical and experimental modelling steps of these subsystems are performed. In this chapter parametric Simulink® simulation of the hardware and mechanical subsystems are also obtained. In the forth chapter of the study, detailed design of closed loop controller, feed forward and adaptive control structures is explained on the system simulation. Model of the control algorithm, which will be used in Simulink® simulation, is also obtained in this chapter. In the following chapter, designed controller is implemented on the thermal sight system. Scanner control system is analyzed and the system simulation is verified with the usage of evaluated real time data that is collected from steady-state system. In this chapter effects of the designed closed loop, feed forward and adaptive control signal components on the system response is examined. Finally, steps of the study and results of methods that are used are discussed.



## 1. GİRİŞ

Tarayıcı sistemi termal görüntüleme birimlerinde dedektör üzerine düşürülen görüntü üzerinde tarama yaparak iki boyutlu görüntünün oluşumunu sağlar.

Tarayıcı sistemlerinin uygulamaları 1960'lı yılların ortalarında termal görüntüleme sistemlerinin geliştirilmeye başlanmasına dayanır. Dedektör teknolojisinin geliştirilmesi, sayısal işlemcilerin kullanılması gibi adımlarla tarayıcı sistemleri de gelişmeye uğramıştır.

Düzgün M.B. tez çalışmasında [1] tarayıcı sistemi uygulama tarihçesiyle ilgili detaylı bir literatür çalışması yapmıştır. 1978 yılında Tajime T., Saheki T., Kondo M. ve Ito K. termal görüntüleme sistemlerinde tarama mekanizmasını geliştirmiştir [2]. Tek elemanlı dedektör kullanılarak iki boyutta tarama yapılan çalışma günümüzdeki tarayıcı çalışmalarına kaynak olmuştur.

Yamashita J., Takei T., Takahaski S., Kondo M., Tajemi T., Saheki T. 1980 yılında çok elemanlı tek boyutlu dedektör ile tek boyutta tarama yaparak termal görüntüleme sistemi oluşturmuştur [3].

Seri tarama mekanizmalı bu iki çalışmadan sonra paralel tarama teknolojisini kullanan poligon tipi tarayıcı Karlsson L. tarafından geliştirilmiştir [3].

1994 yılında yapılan iki çalışmada tarayıcı sisteminin mikroişlemci ile kontrolü sunulmuştur [5], [6]. Bunlardan Odabas V.' ın hazırladığı makale tarayıcı sisteminin kontrolü hakkında literatürde bulunan en detaylı çalışmadır. Bu makalede bir tarayıcı sisteminin modellenmesi, kontrol sistem tasarımı ve tasarımın işlemcide gerçekleştirilmesine ait bir çalışma verilmiştir.

Bu tarihten günümüze kadar ise daha yüksek çözünürlüklü, daha netlikte görüntü elde edilmesine yönelik iyileştirmeler tarayıcı sistemine dâhil edilmiştir. Özellikle son yıllarda çalışmalar yüksek çözünürlüklü (HD) televizyonlar için yüksek tarama frekansına sahip sistemlerin geliştirilmesine yöneliktir. 1999 yılında Gadhok J. S. 96 Hz tarama frekansına sahip HD görüntü sağlayan galvanometrik tarayıcı uygulamasını tasarlamıştır [7].

1970’li yıllarda salınımlı optik tarayıcı üreten firma sayısı 2 iken , 1990’larda bu rakam 14’e çıkmıştır [8]. Günümüzde ise 50’yi aşkın firma tarayıcı sistemi üretebilmektedir.

Tarayıcı sisteminin zaman içinde gelişmesiyle değişik tarayıcı tipleri ortaya çıkmıştır. Bunlar başlıca rezonant, galvanometrik elektro-optik, akusto-optik, holografik tipi tarayıcılardır [7]. Bu tiplerin her biri uygulamada avantajlara ve dezavantajlara sahiptir. Çalışmada kullanılan sistem bir galvanometrik tarayıcı sistemidir.

Rezonant ve galvanometrik tarayıcılar düşük eylemsizlikli tarayıcılar grubunda yer alır. Düşük eylemsizlikli tarayıcılar hareketli bir ayna yardımıyla ışığı yansıtan ve tüm tarama çevrimi 1sn’den küçük olan tarayıcılardır. Bunlardan galvanometrik tarayıcılar sinüzoidal veya sinüzoidal olmayan (üçgen dalga, değişken giriş, testere) her türlü referans pozisyon takibi yapabilen sistemlerdir. Rezonant tipi tarayıcılar ise sadece sistemin rezonant frekansından tarama yapabilen sistemlerdir [9]. Uygulamalar için en iyi çözüm galvanometrik tipi tarayıcıdır [7].

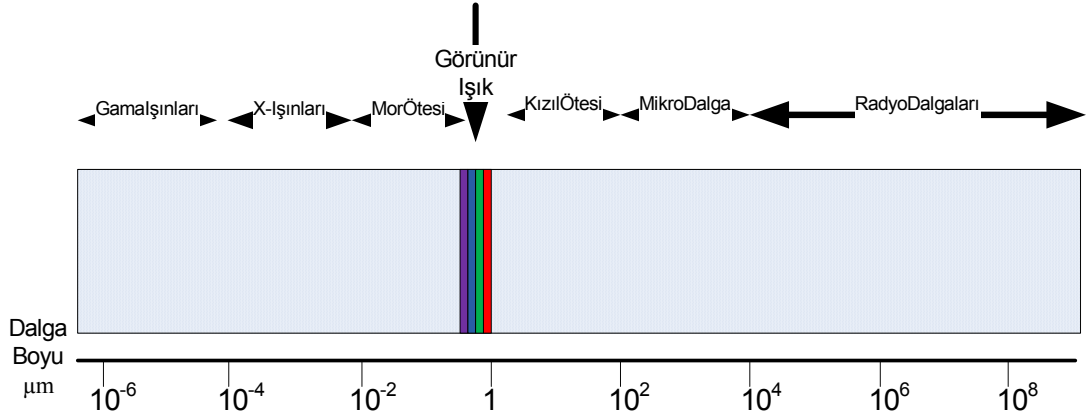
Düşük eylemsizlikli tarayıcıların uygulama alanları oldukça geniştir. Askeri, endüstriyel, sağlık, haberleşme sistemleri alanlarında yüzü aşkın uygulaması bulunmaktadır. Bunlardan bazıları hava aracı kokpiti, yapay ufuk görüntüleyici, lazer akustik mikroskop, barkod okuyucu, lazer baskı, lazer haberleşme, termal görüntüleme, optik disk okuyucu, robot görüntüleme, harp oyunu simülatörü, lazer işaretleyiciler, lazer kesme makinesi, göz dibi göreci (oftalmoskop) , lazer televizyon projektörü, kızılötesi mikroskop sistemleridir [9]. Mikroişlemci teknolojisinin gelişmesiyle tarayıcı sistemleri daha geniş uygulama alanları da bulmuştur. Bunlardan bazıları üç boyutlu modelleme, medikal görüntüleme, konfokal mikroskop, yarıiletken malzemelerin işaretlenmesi, ince malzeme işleme uygulamalarıdır [10].

## 2. TARAYICI SİSTEMİ

### 2.1 Sistem Tanımı

Termal görüntüleme birimleri cisimlerden yayılan kızılötesi enerjiyi insan gözünün algılayabildiği görünür ışık seviyesine dönüştüren sistemlerdir [11].

Elektromanyetik tayf veya elektromanyetik spektrum, bilinen tüm farklı frekans ve dalga boyundaki elektromanyetik radyasyon değerlerinin bütünüdür. Herhangi bir cismin elektromanyetik tayfı veya spektrumu, o cisim tarafından çevresine yayılan karakteristik net elektromanyetik radyasyonu tabir eder [12]. Optik radyasyon aralığı morötesi (100 – 380 nm), görünür ışık (390 – 780 nm) ve kızılötesi (780 –  $10^6$  nm) bölgelerinden oluşur. Işık ise optik radyasyon aralığında insan gözünün algılayabildiği aralık olan görünür ışık bölümüne karşılık gelir [13]. Elektromanyetik tayf bölgeleri Şekil 2.1’de görülebilir. Kırmızı renk sonrası başlayan kızılötesi enerji bandı temel olarak iki dalga boyu aralığına bölünür. Bunlar (3 – 5  $\mu\text{m}$ ) orta kızılötesi alanı ile (8 – 12  $\mu\text{m}$ ) arası uzak kızılötesi bölgeleridir [11].



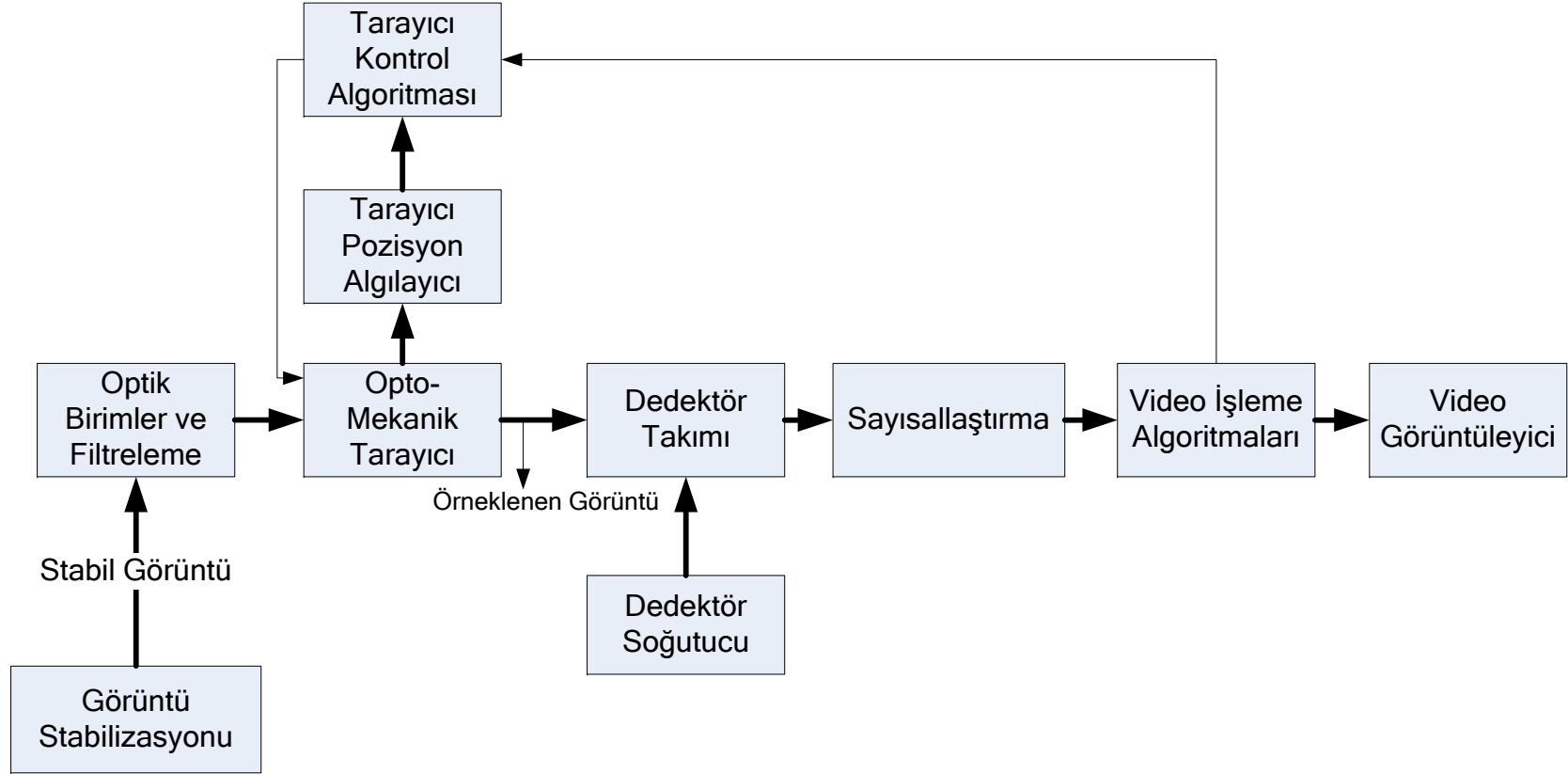
Şekil 2.1 : Elektromanyetik tayf bölgeleri [11].

Termal görüntüleme sistemleri görme aralığımızın insan gözü kapasitesinin en yüksek dalga boyu olan kırmızı ışık sonrasında uzak kızılötesi bölgeye kadar açılmasını sağlar. Gündüz görüntüsü güneş ışığının yansıması ve cisimlerin yansıtma değişikliklerinden oluşurken, termal görüntü cisimlerin ısı yayma ve ısı yayma

özelliklerine bağılı olarak oluşur [14]. Cisimler gündüz güneş ışığından aldıkları termal enerjiyi gece boyunca sıcaklıklarına bağılı bir dalga boyunda çevrelerine yayarlar. Termal görüntüleme sistemleri nesnelerin yaydığı bu kızılötesi enerjiyi görüntüye dönüştürdüğü için pasif algılama yapan sistemler olarak adlandırılır. Termal kameralar görünür ışık kameralardan farklı olarak gündüz ve gece yüksek netlikte ve çözünürlükte görüntü elde ederler. Diğer yandan kızılötesi bant içindeki enerji iletimi sis, duman ve toz gibi çevresel etkilerden görünür ışık bandına göre daha az etkilenir [11].

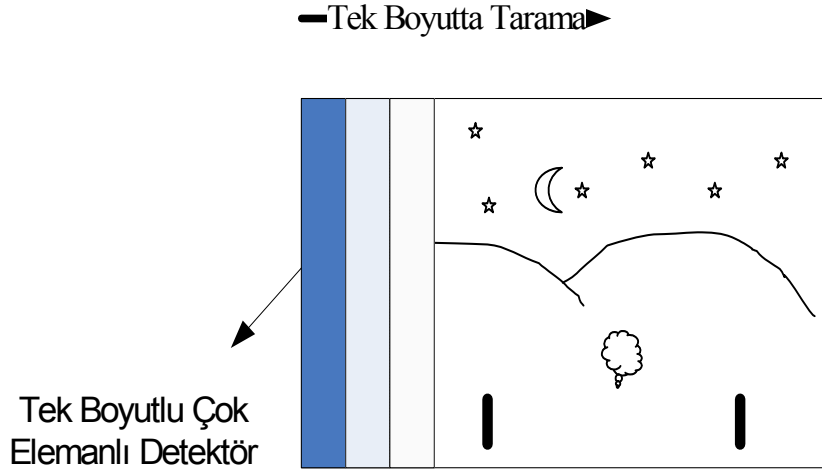
İlk termal görüntüleme sistemi 1930 yılında yapılan “Evaporagraph” cihazıdır. Tarayıcı mekanizması kullanmayan bu cihaz hassasiyeti sağlayamamış ve net bir görüntü elde edilememiştir. 1940’lı yıllarda mekanik tarayıcı kullanan sistemler geliştirilmeye başlanmıştır. 1950’lerde ise termograf adı verilen gerçek tarayıcılı görüntüleme sistemleri uygulanmaya başlanmıştır. Bu aygıtlar tek elemanlı dedektör kullanarak iki boyutta görüntüyü filme kaydeden aygıtlardır. Bu tarihten sonra gerçek zamanlı ve yüksek çözünürlükte görüntü elde eden görüntüleme sistemleri geliştirilmiştir [14]. İlk başlarda askeri projelerde uygulama alanı bulan termal görüntüleme sistemleri özellikle dedektör teknolojisindeki gelişmelere ve maliyetlerin düşmesine bağılı olarak sivil hayat uygulamalarında da görülmeye başlanmıştır [15]. Askeri uygulamalarda özellikle hedef tespiti, gece görüşü, güdüm ve takip sistemlerinde kullanılmaktadır. Sivil uygulamalarda ise ısı verimlilik analizi, uzaktan sıcaklık ölçme, kısa mesafeli kablosuz iletişim, spektroskopi ve hava tahmini gibi alanlarda da kullanılmaktadır [16].

Termal görüntüleme sistemleri optik ve tarayıcı alt sistemleri, dedektör ve dedektör elektroniği, sayısallaştırma, yeniden görüntü oluşturma, görüntü iyileştirme ve görüntüleme kısımlarından oluşur. Tek boyutlu dedektör kullanılması durumunda tarayıcı mekanizması iki boyutlu görüntü oluşumu için gereklidir [1]. Termal görüntüleme sisteminde yer alan elemanlar Şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.2 : Termal görüntüleme sistemi elemanları.

Çalışmada kullanılan tarayıcı sistemi termal görüntüleme sisteminde tek boyutlu çok elemanlı dedektör üzerine belli bir açıda belirlenmiş görüş alanındaki görüntüyü düşüren sistemdir. Tek boyutlu çok elemanlı dedektör seçimi dolayısıyla iki boyutlu görüntü oluşumu için tek boyutta tarama mekanizması kullanılmalıdır. Kısaca tarama mekanizması Şekil 2.3’de gösterildiği gibi dedektörün üzerine düşen termal verilerin değişimini sağlar.

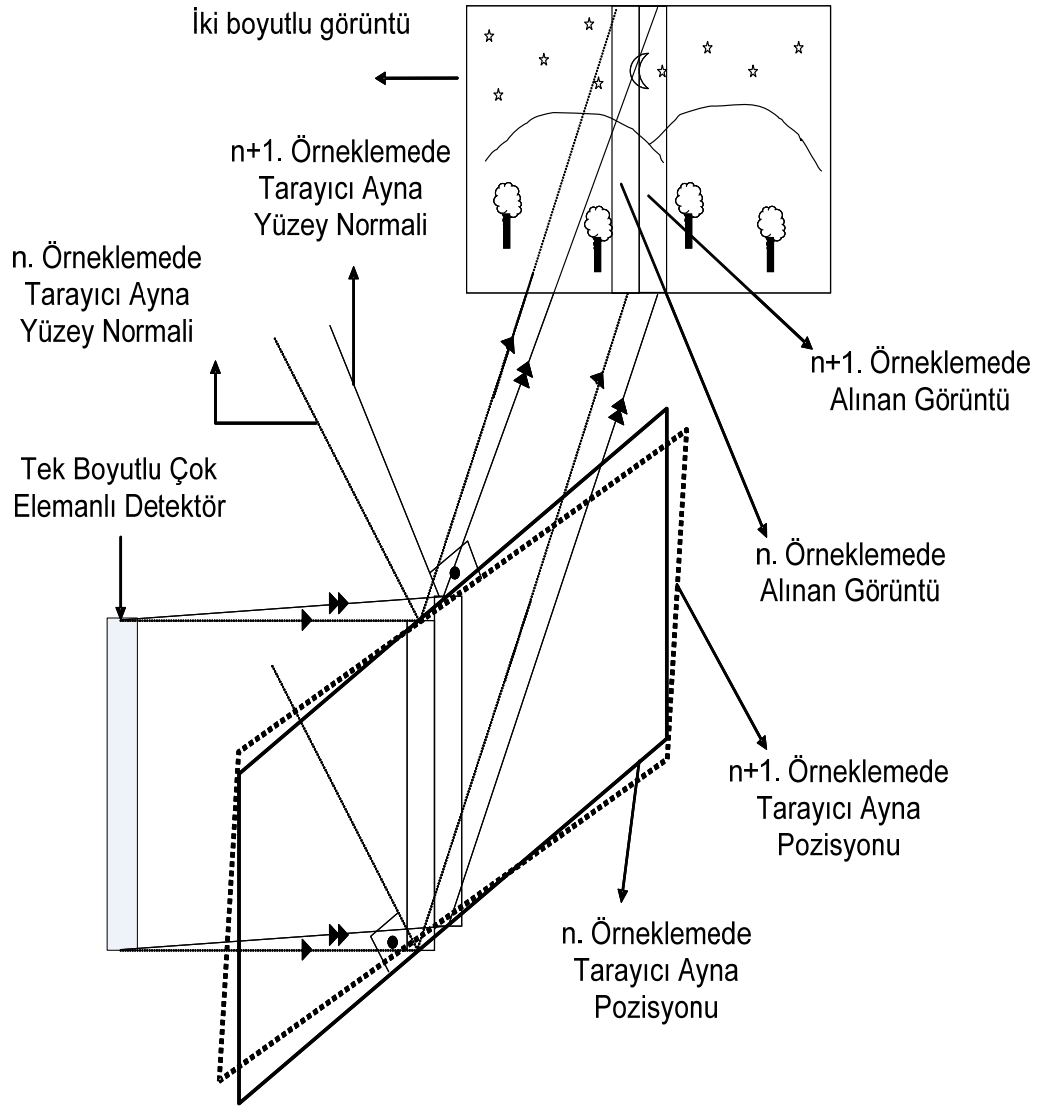


**Şekil 2.3 : Tarama mekanizması.**

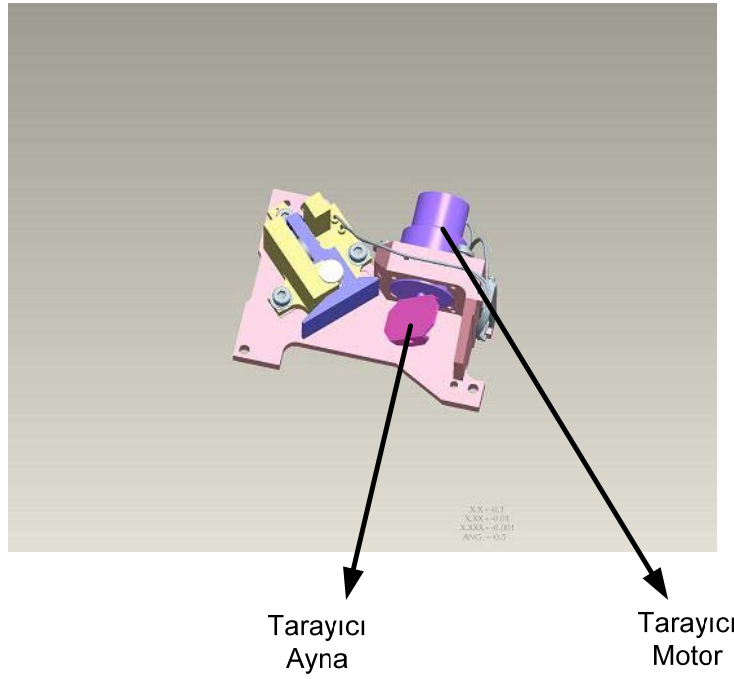
Bu işlem tarayıcı aynasının görüntü üzerinde döndürülerek görüntünün birbirine yakın pozisyonlarda örneklerinin alınmasıyla yapılır. Tarayıcı mekanizması Şekil 2.4’den takip edilebilir.

Tarama frekansı örnekleme süresine bağlı olarak örnekleme bölünür, her bir örnekleme değerinde tarayıcı aynanın gitmesi gereken açı değeri bellidir. Tarayıcı ayna örnekleme boyunca o andaki tek boyutlu görüntüyü dedektör üzerine yansıtır. Takip eden örneklemeyle iki boyutlu görüntü oluşturulmuş olur. Örnekleme sayısının yeterince büyük olduğu durumda insan gözü tek boyutlu görüntüler arası atlamaları fark edemez ve bütün bir iki boyutlu görüntüyü algılar.

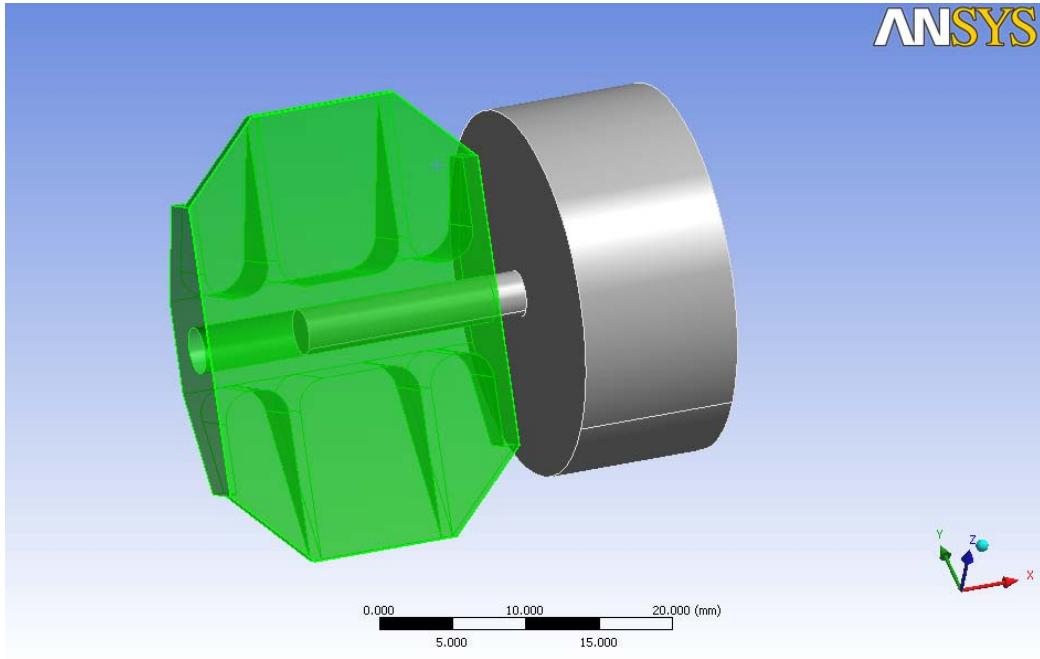
Bir tarayıcı sistemi temel olarak üç elemana sahiptir. Bunlar tarayıcı ayna – motor, pozisyon dönüştürücü ile sürücü bloklarıdır [8]. Çalışmada kullanılan tarayıcı sisteminde motor ve ayna birimleri birbirine bir şaft yardımıyla akupple haldedir (bkz. Şekil 2.5 ve Şekil 2.6). Tarayıcı motoru fırçasız doğru akım motorudur. Pozisyon dönüştürücü olarak ise çözücü - ayırıştırıcı kullanılmıştır.



Şekil 2.4 : Görüntü tarama mekanizması.



**Şekil 2.5** : Tarayıcı motor - ayna takımı -1.<sup>1</sup>

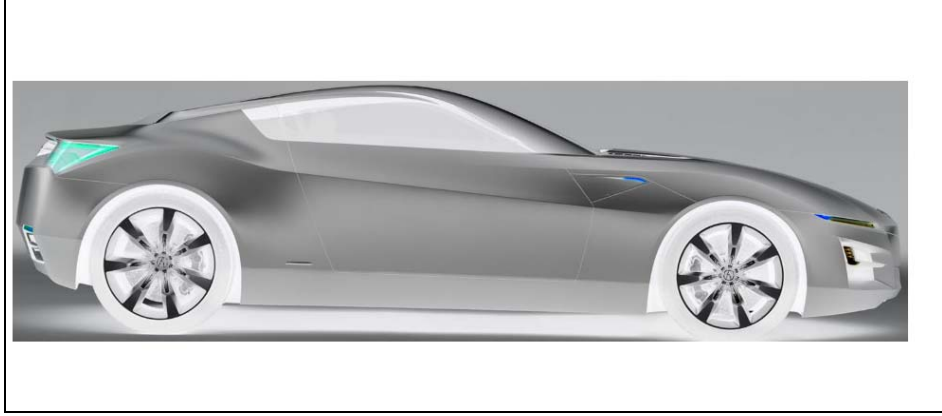


**Şekil 2.6** : Tarayıcı motor - ayna takımı -2.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Şekiller ASELSAN A.Ş. MGEO Mekanik Optik Tasarım Müdürlüğü tarafından sağlanmıştır.

## 2.2 Kontrol Problemi

Tarayıcı sistemi yüksek performanslı bir pozisyon takibi sistemidir. Görüntü alanı etrafında yapılan tarama sabit hızda olmalıdır. Tarayıcı sisteminde oluşabilecek ilk hata tarama çevrimi esnasında sabit hızın bozulmasıdır. Bu durum görüntüde bazı bölümlerin olduğundan daha kalın ya da daha ince görülmesine sebep olur. Örneğin Şekil 2.7’de doğru tarama durumunda görüntüsü verilen arabanın tarama esnasında araba bulunduğu piksel bölgesinin hızlı taranması durumunda Şekil 2.8’de verilen görüntü olarak (oldüğundan daha ince) görülmektedir. Aynı şekilde bazı piksel bölgelerinin yavaş taranması olduğundan daha kalın bir görüntüye sebep verecektir. Eğer görüntünün bu açılıp genişlemesi sürekli halde devam ederse dalgalanmalı bir görüntü oluşur.



Şekil 2.7 : Hatasız taramada araba görüntüsü.<sup>2</sup>



Şekil 2.8 : Sabit hızın bozulması durumunda yanlış görüntü.<sup>2</sup>

---

<sup>2</sup> Şekillerin etrafındaki çerçeve tüm görüntü alanını yansıtmaktadır.

Tarayıcı sisteminde oluşabilecek ikinci hata ise tarama çevrimleri arasında oluşan hatadır. Bu durum aynı örnekleme değerlerinde aynı görüntü noktasına bakılmadığında gerçekleşir. Tek tarama durumunda nesneler algılsa bile çevrimlerin üst üste gelip sürekli görüntü oluşturduğu durumda birbirinden ayırt edilemez. Şekil 2.7’de normal görüntüsü verilen araba şekli iki tarama çevrimi arasındaki hatadan dolayı iki tane birbirini takip eden görüntü olarak algılanır (bkz. Şekil 2.9) .



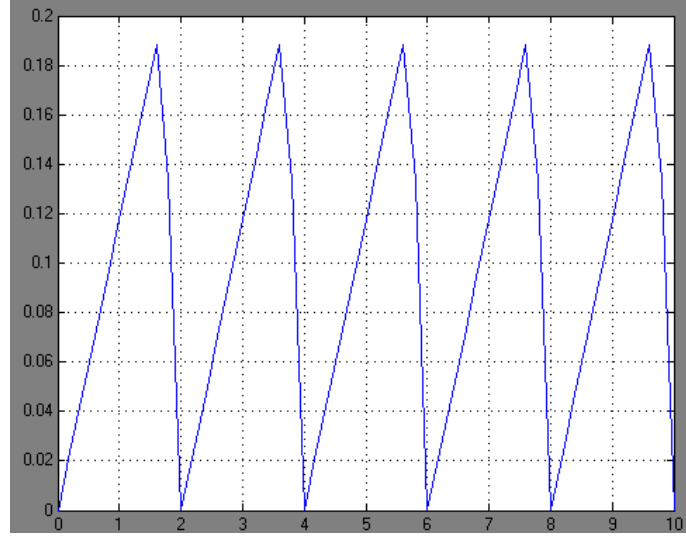
**Şekil 2.9** : Tarama çevrimleri arasındaki hatadan kaynaklı yanlış görüntü.

Bu iki pozisyon takibi hatasının oluşmaması için ele alınan tarayıcı sisteminde lineer görüntü tarama bölgesinde en yüksek hata miktarı tepeden tepeye  $600 \mu\text{radyan}^3$  büyüklüğünü geçmemelidir.

Bir tarayıcı sisteminden beklenen, istenen sabit hıza en az zamanda ulaşması, küçük bir hata ile lineer taramayı tamamlaması aynı zamanda lineer bölge başlangıcı ve sonunda aşım miktarının düşük tutulmasıdır [17]. Tarayıcı sisteminde bu pozisyon takibi işlemi genellikle testere biçimi referans pozisyon sinyali ile sağlanır. Testere biçimi tarama, aktif tarama esnasında sabit bir hız ile lineer tarama ve aktif tarama sonunda bir sonraki tarama çevrimi için başlangıç noktasına dönüş (hızlı geriye dönüş bölgesi) bölgelerinden oluşur. Yüksek çözünürlükte görüntü oluşturacak bir tarama mekanizması için aktif tarama bölgesinin mümkün olduğunca uzun olması gerekmektedir [7]. Testere biçimi tarama literatürde ızgara biçim tarama olarak da adlandırılmaktadır [10]. Örnek bir testere biçimi referans Şekil 2.10’da görülebilir.

---

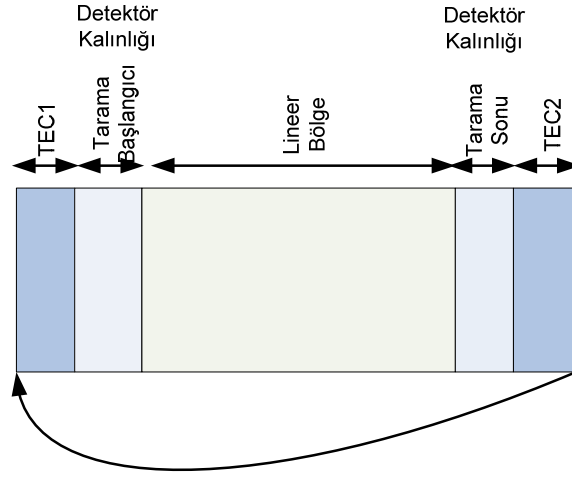
<sup>3</sup> Hedeflenen hata miktarı tarayıcı sistemindeki mekanik-optik tasarıma, elde edilecek görüntü çözünürlüğüne ve tarama frekansına bağlı olarak değişebilir.



**Şekil 2.10 :** Testere biçimi referans pozisyon.

Şekil 2.10’da verilen testere biçimi türünde bir referans pozisyon takip edilmek istenirse yöndeki ani değişimler (lineer tarama bölgesinden hızlı geriye dönüş bölgesine geçiş) sonsuz bir ivmelenme gerektirmektedir. Bu durum tarayıcı ayna mekanizmasında yüksek frekanslı rezonansları tetikleyebilir. Bu tetiklemenin azaltılması için pozisyon, hız ve ivme komutlarındaki sürekli bir fonksiyon sağlanması gereklidir [7]. Kosinüs formatlı bir ivme komutu tarayıcı sisteminin geçici hal davranışını iyileştirir ve daha iyi bir görüntü sağlar [6].

Çalışmada kullanılan tarayıcı sistemi 25Hz frekansında çalışacaktır. Örnekleme frekansı ise 10kHz değerindedir. Böylece bir tarama çevriminde 400 örnekleme bulunur. Tarama çevrimi altı bölgeden oluşmaktadır (bkz Şekil 2.11) . Bunlardan ilki görüntünün alındığı lineer bölgedir. Lineer bölge 1 ile 292. örneklemler arasındadır. Tarayıcı sisteminden beklenen lineer bölge hızı 11rad/s değerindedir. İkinci bölge dedektör kalınlığının geçildiği tarama sonu bölgesidir. 293 ve 306. örneklemler arası bulunan bu bölgede 357Hz frekanslı sinüzoidal geçiş bulunmaktadır. Tarayıcı sisteminde üçüncü bölge dedektör termal referans lamasının yapıldığı TEC2 bölgesidir. TEC2 bölgesi 307 – 326 örneklemler arasındadır ve 11rad/s sabit hız ile geçilir. Termal referans lamanın yapılmasının ardından hızlı geriye dönüş bölgesi gelir. Hızlı geriye dönüş bölgesinde 327 – 366. örneklemler arasında 125Hz frekanslı sinüzoidal geçiş bulunur. Son iki bölge ise tarama başlangıcı ve TEC1 bölgeleridir. TEC1 bölgesi TEC2 bölgesi ile, tarama başlangıcı bölgesi tarama sonu bölgesi ile aynı özelliklere sahiptir.

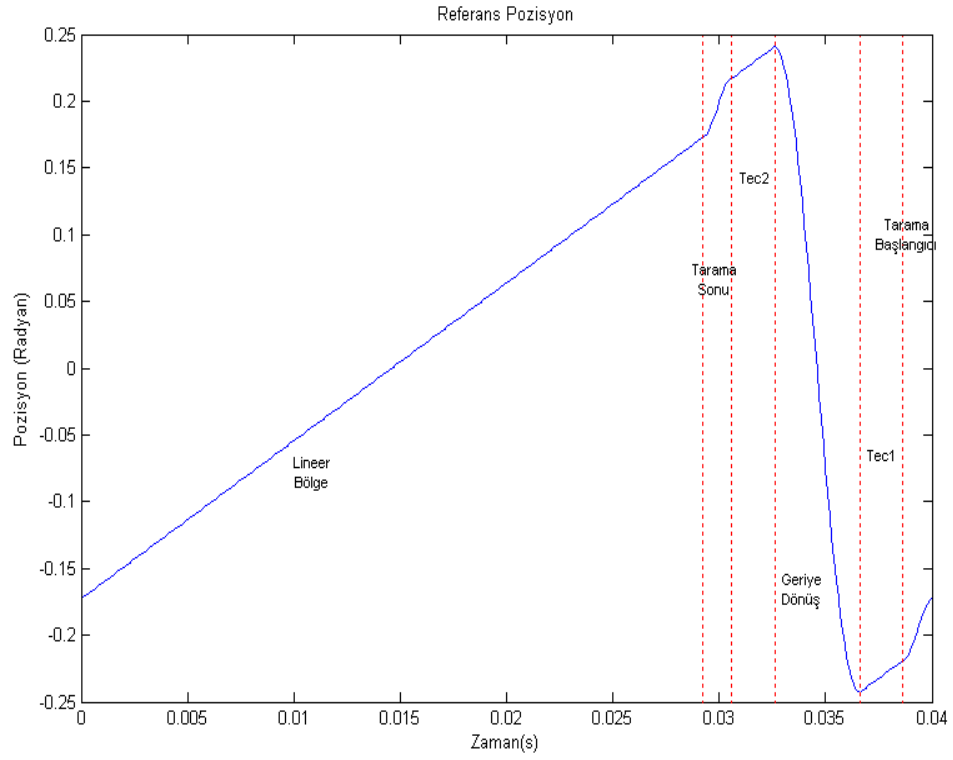


**Şekil 2.11** : Tarayıcı tarama bölgeleri.

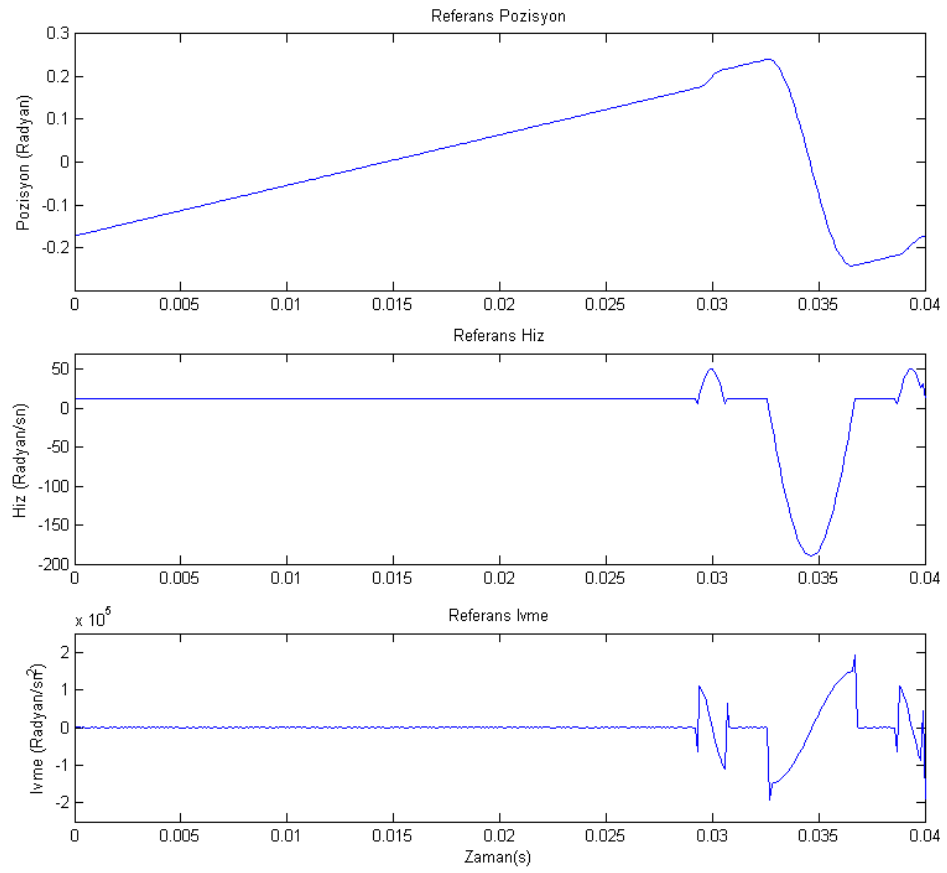
Bu değerlendirmeler sonucunda ele alınan tarayıcı sistemi için Şekil 2.12'deki pozisyon referansı oluşturulmuştur. İlgili referans pozisyona karşılık gelen ivme ve hız komutları Şekil 2.13'den takip edilebilir. Tasarlanacak kontrol sistemi referans pozisyon profilindeki tüm frekanslarda çalışmalıdır. Bu nedenle tarayıcı kontrolörü bant genişliği en yüksek profil frekansı olan 357Hz'den daha büyük olacak şekilde tasarlanmalıdır. Fakat yüksek bant genişliğini kısıtlayan bazı faktörler mevcuttur. Sistemde bant genişliğinin yüksek olması için çevrim kazancının artırılması sistemin yüksek frekanslı rezonanslarının tetiklenmesine ve sistemin osilasyona girmesine sebep verebilir. Ayrıca sistemin basit modelinde ihmal edilen gürültüler de yüksek frekans değerlerinde sistem kazancının artmasıyla kontrol çevrimine dâhil olur. Bant genişliğinin yüksek olması bir yandan da sistemin yerleşme zamanını arttırır. Düşük bant genişliğine sahip sistemler yüksek bant genişlikli sistemlere göre %1 oranında daha düşük yerleşme zamanına sahiptir. Yapılacak en uygun çözüm bant genişliğini referans pozisyonu takip edebilecek en küçük değerde tutmaktır [17].

Tarayıcı kontrol sistem tasarımı dikkat edilmesi gereken bir diğer husus da sistemin lineer olmayan davranışlarıdır. Tarayıcı sisteminde bulunan ilk lineer olmayan davranış motor şaftında yer alan yay etkisidir [6]. Ayrıca kontrol çevriminde yer alan sayısal analog çevirici ile pozisyon sensörü de lineer olmayan etkilere sahiptir [17].

Kısaca tarayıcı sisteminin yüksek performanslı pozisyon takibi yapması için bant genişliği değerinin uygun değerler arasında tutulması gerekir. Ayrıca tarayıcı kontrolörü sistemin lineer olmayan davranışlarına karşı da gerekli önlemi almalıdır.



Şekil 2.12 : Tarayıcı sistemi referans pozisyon profili.



Şekil 2.13 : Tarayıcı sistemi referans pozisyon - ivme - hız profili.

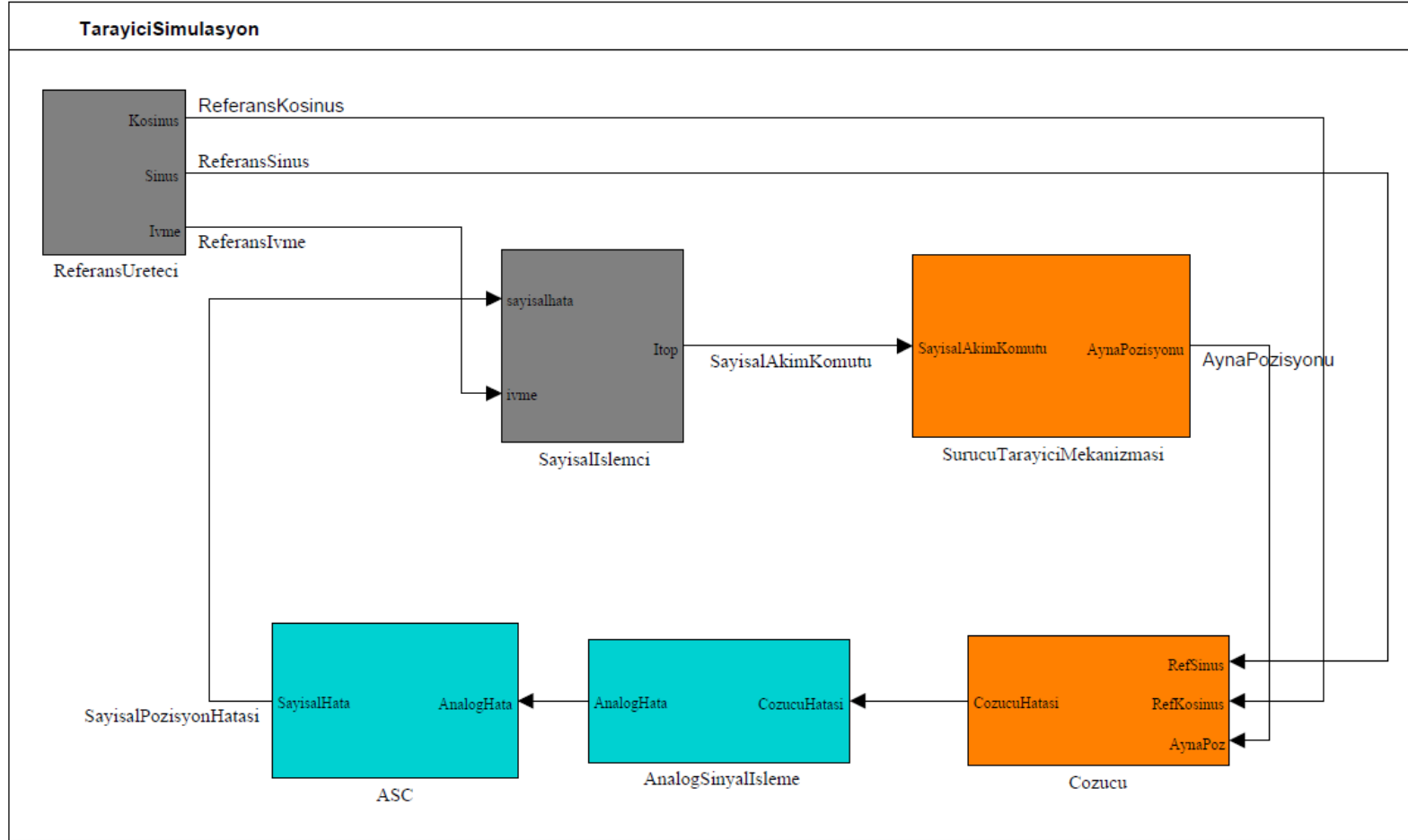


### 3. TARAYICI SİSTEMİNİN MODELLENMESİ

Tarayıcı sistemi genel olarak yazılım, donanım ve mekanik bloklarından oluşmaktadır. Tarayıcı sistemi mekanik bileşeni tarayıcı aynası ve hareketi sağlayan motor takımından oluşur. Tarayıcı ayna - motor takımının kontrolünün sağlanması için yazılımsal ve donanımsal bileşenler tarayıcı sisteminin diğer iki bileşenini meydana getirir [18]. Tarayıcı sisteminin temel blokları Şekil 3.1’de görülmektedir. Sistemde kontrol algoritmasının gerçekleştirildiği “*Sayısalİşlemci*”, kart üzerindeki analog sayısal çevirici “*ASC*”, pozisyon profilinden ivme ve referans pozisyon komutlarını üreten “*ReferansUretici*”, sürücü ve yük mekanizmasının bulunduğu “*SurucuTarayiciMekanizması*”, motora ait çözücü – ayrıştırıcı bloğu olan “*Cozucu*”, analog işaret işleme elamanlarına ait “*AnalogSinyalIsleme*” blokları bulunmaktadır.

Çalışmada tarayıcı sisteminin iki modeli elde edilmiştir. İlk modelde sistem tanıma süreçleri yardımıyla sistem girişi (motora uygulanan tork) ile sistem çıkışı (ayna pozisyonu) arasında “kapalı kutu” bir model elde edilmiştir. Kapalı kutu model parametrelerin bağımsız olarak değiştirilmesine olanak tanımamaktadır. Sistem parametrelerindeki değişimin etkisini önceden kestirmek amacıyla ikinci model olan parametrik Simulink® modeli elde edilmiştir. Parametrik Simulink® benzetiminde Şekil 3.1’de verilen tüm bloklar tüm parametreler dikkate alınarak modellenmiştir. Kontrol algoritmasının geliştirileceği kapalı kutu modelde ise elektronik kart üzerinde gerçekleşen akım kontrol çevrimi ile tarayıcı motorunun elektriksel model bölümü ihmal edilmiştir. Kapalı kutu model motor ve aynadan (yük) oluşan mekanik model ile çözücü ve analog sayısal çevirmelerden kaynaklanan kazanç bileşenlerini içermektedir.

Bu bölümün ilk kısmında mekanik bileşenlerinin benzetimi iki ayrı model için verilmiştir. İkinci kısımda ise donanım bileşenlerinin parametrik Simulink® benzetimi elde edilmiştir. Yazılım bileşenlerinin Simulink® benzetimi ise 4.4 Yazılım Bileşenlerinin Benzetimi bölümünde verilmiştir.



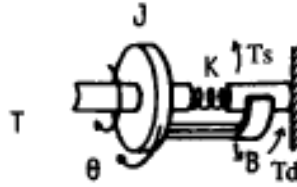
**Şekil 3.1** : Tarayıcı simülasyonu sistem üst blok diyagramı.

### 3.1 Mekanik Bileşenlerinin Benzetimi

Mekanik blok, motor ve yük bloklarını ayrıca referans ve güncel pozisyon bilgilerinden pozisyon hatasını üreten çözücüyü içermektedir.

#### 3.1.1 Tarayıcı sistemi motor – yük modeli

Tarayıcı sisteminde fırçasız doğru akım motoru kullanılmaktadır. Tarayıcı sisteminde hareket ettirilmek istenen yük, motor ve ayna takımından oluşmaktadır. Yüke uygulanan tork motor ve ayna eylemsizlik momentleri, pozisyona bağlı burulma ve hıza bağlı sönümlenme etkileri ile sürtünme kuvveti tarafından harcanır.



Şekil 3.2 : İkinci dereceden klasik motor yük modeli.

Şekil 3.2’de verilen motor ve yükten oluşan klasik bir sistem için ikinci dereceden pozisyon - tork modeli elde etmek için (3-1) kullanılır [19], [20].

$$(J_y + J_m) \cdot \frac{dw}{dt} + B \cdot w + k \cdot \theta = k_t \cdot i_m \quad (3-1)$$

Bu denkleme Laplace dönüşümü uygulanırsa,

$$(J_y + J_m) \cdot \theta \cdot s^2 + B \cdot \theta \cdot s + k \cdot \theta = T \quad (3-2)$$

$$\frac{\theta}{T} = \frac{1}{(J_y + J_m) \cdot s^2 + B \cdot s + k} \quad (3-3)$$

$$T = k_t \cdot i_m \quad (3-4)$$

pozisyon - tork arası sistem transfer fonksiyonu çıkarılmış olur. (3-3) ve (3-4) eşitlikleri bir arada ele alınırsa,

$$\frac{\theta}{i_m} = \frac{\frac{k_t}{J}}{s^2 + \frac{B}{J}s + \frac{k}{J}} \quad (3-5)$$

pozisyon / (motora uygulanan akım) arasındaki transfer fonksiyonu elde edilir. Denklemlerde verilen sembollerin açıklamaları ve birimleri Çizelge 3.1 'de verilmiştir.

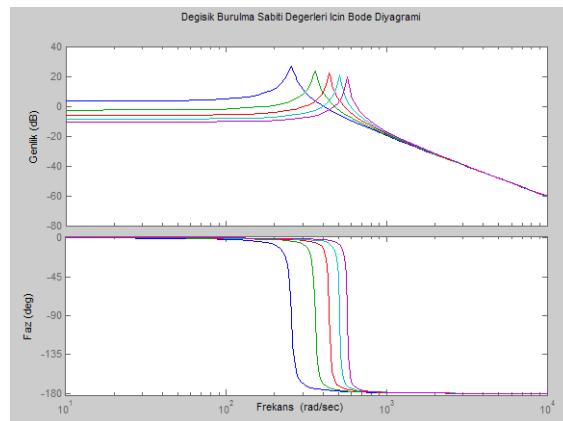
### 3.1.2 Tarayıcı sistemi parametreleri

Denklem (3-5) için tarayıcı sistemi parametreleri Çizelge 3.1 Çizelge 3.2 'de verilmiştir. Çizelge 3.1 'de verilen  $J_m$ ,  $B$ ,  $k_t$  parametreleri motor spesifikasyon dokümanından alınmıştır [21].  $J_y$  parametresi ASELSAN A.Ş. MGEO Mekanik-Optik Tasarım Müdürlüğü tarafından sonlu eleman analizi programı ANSYS® kullanılarak elde edilmiştir.  $k$  burulma sabiti parametresine ilişkin teorik bir değer bulunmamaktadır.

Bu parametreler denklem (3-5)'de yerine konulursa;

$$\frac{\theta}{i_m} = \frac{95700}{s^2 + 17.317s + k/J} \quad (3-6)$$

tarayıcı sistem modeli elde edilmiş olunur. Bu modelde yük nedeniyle gelen sönümlleme faktörü dâhil edilmemiştir. Bu transfer fonksiyonunda bulunan belirsiz parametreler olan yük sönümlleme faktörünün ve burulma sabitinin sistem tanıma süreçleri ile belirlenmesi gerekmektedir. Sistem modeline ait Bode diyagramı değişik birkaç burulma sabiti değeri için Şekil 3.3'de verilmiştir.



**Şekil 3.3** : Değişik burulma sabiti değerleri için tarayıcı sistemi Bode diyagramı.

**Çizelge 3.1 : Tarayıcı motor - ayna sistemi parametreleri.**

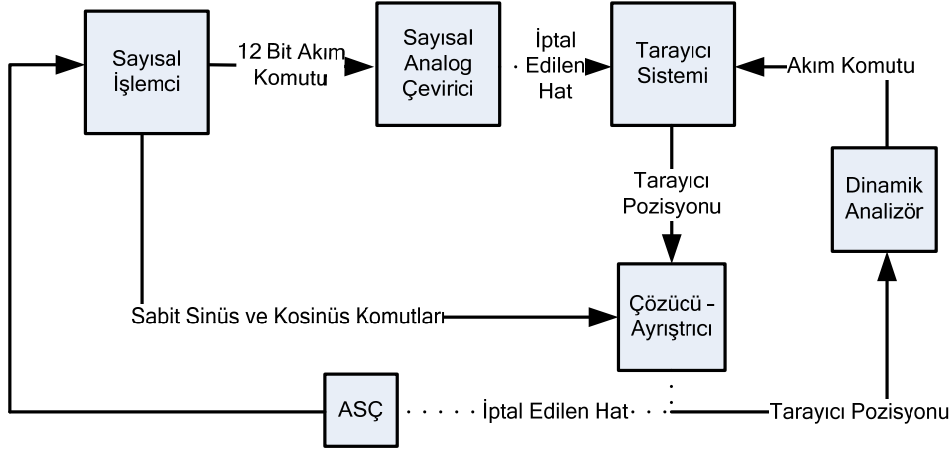
| Sembol   | Açıklama                   | Değer<br>(Imperial Birim<br>Sistemi) | Değer<br>(SI Birim Sistemi)      | Hata Payı |
|----------|----------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|-----------|
| $J_y$    | Ayna Eylemsizlik Momenti   | 1.0144e-005<br>oz-in-sn <sup>2</sup> | 7.163e-008<br>kg-m <sup>2</sup>  | ±%10      |
| $J_m$    | Motor Eylemsizlik Momenti  | 1.18e-005<br>oz-in-sn <sup>2</sup>   | 8.333e-008<br>kg-m <sup>2</sup>  | ±%10      |
| B        | Motor Sönümlleme Faktörü   | 3.8000e-004<br>oz-in/ (rad/sn)       | 2.683e-006<br>N.m/(rad/sn)       | ±%20      |
| k        | Burulma Sabiti             | ?<br>oz-in/rad                       | ?<br>N.m/rad                     |           |
| $k_t$    | Motor Tork Sabiti          | 2.1<br>oz-in/Amp                     | 14.829e-003<br>N.m/Amp           | ±%20      |
| J        | Toplam Eylemsizlik Momenti | 2.1944e-005<br>oz-in-sn <sup>2</sup> | 15.496e-008<br>kg-m <sup>2</sup> | ±%10      |
| $\theta$ | Tarayıcı Ayna Pozisyonu    | Radyan                               | Radyan                           |           |
| $i_m$    | Motora Uygulanan Akım      | Amper                                | Amper                            |           |
| T        | Tork                       | oz-in                                | N.m                              |           |

### 3.1.3 Dinamik analizör kullanılarak parametre atama

Dinamik analizör sinyal işleme uygulamalarında kullanılan oldukça yetenekli bir araçtır. Değişik modlara sahip bu cihazda belirlenen frekanslar arasında sinüs girişi oluşturulabilmektedir [22]. Sinüs taraması neticesinde sistemden çıkış bilgisi alınmakta, analizör giriş ve çıkış sinyallerinden sisteme ait frekans spektrumunu çıkarmaktadır [23]. Bu işlem Agilent 35670A modeli dinamik sinyal analizörü ile gerçekleştirilmiştir.

Dinamik analizöre motora uygulanan akım ve pozisyon sinyalleri verilerek bu sinyaller arasındaki sistemin transfer fonksiyonu bulunmuştur. Analizörün sisteme bağlanması için test düzeneği oluşturulmuştur. Tarayıcı sisteminde pozisyon dönüştürücüsü olarak detaylı açıklaması 3.1.6 Çözücü – ayrıştırıcı modeli bölümünde verilen çözücü – ayrıştırıcı kullanılmıştır. Çözücü ayrıştırıcı pozisyon hatasını oluşturmak için referans pozisyona ait sinüs ve kosinüs komutlarına ihtiyaç duyar. Test düzeneğinde çözücü çıkışında pozisyon hatası yerine pozisyon bilgisinin okunması için çözücüye sabit bir referans pozisyona ait sinüs ve kosinüs komutları işlemcide koşan yazılım parçası ile gönderilmiştir. Düzenekte sisteme kontrol

işaretinin (motora uygulanacak akım) dışarıdan alınması için işlemci çıkışındaki sayısal analog çevirici sonrası kart bağlantısı kesilmiştir. Ayrıca sistem çıkışı (pozisyon bilgisi) alınması için çözücü çıkışında analog sayısal çevirici öncesi hat kesilmiştir. Hazırlanan test düzeneği Şekil 3.4’den takip edilebilir.



**Şekil 3.4** : Dinamik analizör ile hazırlanan test düzeneği.

Test düzeneğinde kesilen bu hatlardan analizör giriş ve çıkış sinyallerine bağlantı sağlanarak tarayıcı sistemine değişik frekanslarda sinüs taraması yaptırılmıştır. Sinüs taraması 1-100Hz arasında yaptırılmıştır. Sisteme ait sönümleme faktörü ve burulma sabitinin belirlenmesi için (sistemin kutuplarının belirlenmesi) bu frekans aralığında tarama yeterlidir. Analizör çıktısı bode diyagramı Şekil 3.5’de verilmiştir.

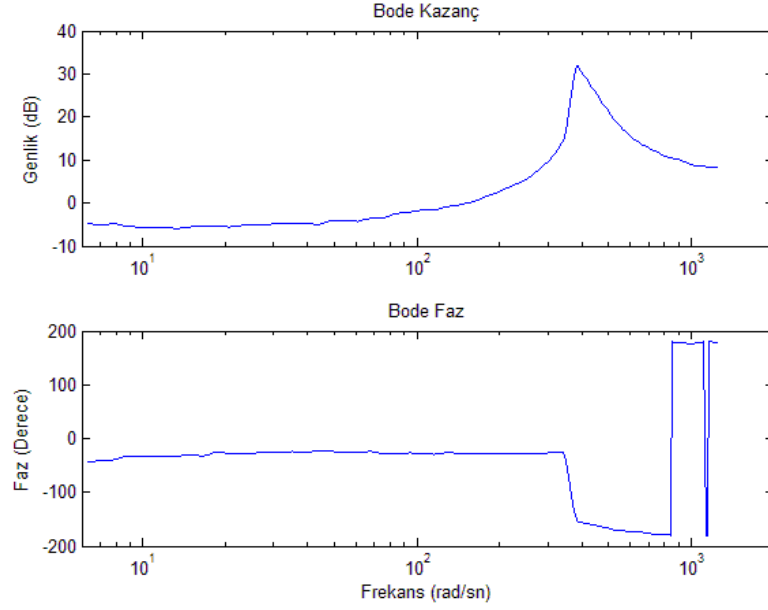
Analizörden elde edilen bu bode diyagramı 3.1.2 Tarayıcı sistemi parametreleri bölümünde verilen k burulma sabitinin belirlenmesi ve B sönümleme faktörünün hassas ayarlanması için, yani ikinci derece sisteme ait kutupların atanması amaçlı kullanılacaktır. Klasik bir az sönümlü sistemin transfer fonksiyonu,

$$G(s) = \frac{g \cdot (w_n)^2}{s^2 + 2 \cdot \xi \cdot w_n \cdot s + (w_n)^2} \quad (3-7)$$

şeklindedir. Denklem (3-7)’de g kazanç sabiti 0 rad/s’deki sistem kazancı,  $w_n$  bode diyagramı faz eğrisinin  $-90^\circ$  açısını kestiği frekans değeri ve

$$\xi = \frac{g}{2 \cdot 10^{(m(-90)/20)}} \quad (3-8)$$

sönümleme faktörüdür.



**Şekil 3.5** : Dinamik analizör Bode diyagramı.

Denklem (3-8)'de  $m(-90)$   $-90^\circ$ 'deki sistem kazancıdır [24]. Bu değerler Şekil 3.5'den okunursa,  $g = 0.63$ ,  $w_n = 386$  rad/sn,  $\zeta = 0.02$  olarak elde edilir. Bu değerler denklem (3-7)'de yerine konulunca dinamik analizörden elde edilen sistem modeli,

$$G(s) = \frac{94050}{s^2 + 15.37s + 149100} \quad (3-9)$$

olarak ifade edilir. Sisteme ait iki eşlenik kutup  $-7.6 \pm 386i$  noktasında bulunur. Bölüm başında anlatıldığı üzere dinamik analizör modeli sönümleme ve burulma sabiti parametrelerinin ayarlanması için kullanılacaktır.

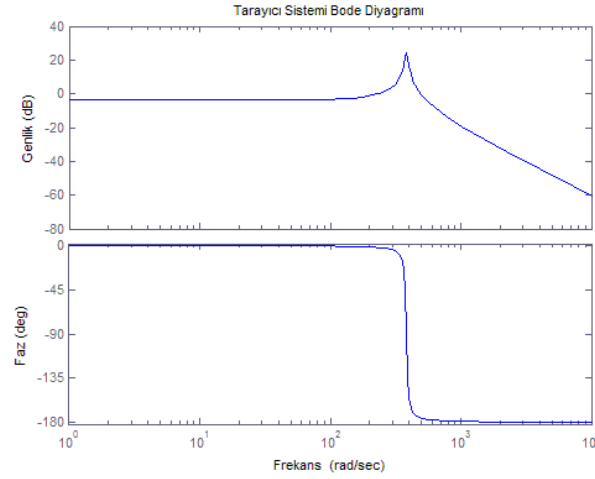
$$15.37 = \frac{B}{J} \quad (3-10)$$

$$149100 = \frac{k}{J} \quad (3-11)$$

(3-10) ve (3-11) denklemleri  $J = 15.496e-008$  kg  $\cdot$  m<sup>2</sup> için çözülürse  $B = 2.38e-006$  N.m/(rad/sn),  $k = 0.02308$  N.m/rad olarak bulunur. Bulunan k ve B parametreleri (3-6) denkleminde yerine konulursa sistem modeli

$$\frac{\theta}{i_m} = \frac{95702}{s^2 + 19.35s + 148996} \quad (3-12)$$

olarak elde edilir. Sistem modeline ait bode diyagramı Şekil 3.6’da verilmiştir. Tüm tarayıcı sistemi parametreleri Çizelge 3.2 ’de verilmiştir. Denklem (3-12)’de verilen motora uygulanan akım ile ayna pozisyonu arasındaki kapalı kutu model transfer fonksiyonu kontrol algoritması tasarımında kullanılan tarayıcı sistemi modelidir.



**Şekil 3.6** : Tarayıcı sistemi Bode diyagramı.

**Çizelge 3.2** : Tarayıcı sistemi parametreleri.

| Sembol    | Açıklama                        | Değer<br>(Imperial Birim<br>Sistemi) | Değer<br>(SI Birim Sistemi)      | Hata<br>Payı |
|-----------|---------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|--------------|
| $J_y$     | Ayna Eylemsizlik Momenti        | 1.0144e-005<br>oz-in-sn <sup>2</sup> | 7.163e-008<br>kg-m <sup>2</sup>  | ±%10         |
| $J_m$     | Motor Eylemsizlik Momenti       | 1.18e-005<br>oz-in-sn <sup>2</sup>   | 8.33e-008<br>kg-m <sup>2</sup>   | ±%10         |
| B         | Motor Sönümlleme Faktörü        | 4.2342e-004<br>oz-in/ (rad/sn)       | 2.99e-006<br>N.m/(rad/sn)        |              |
| k         | Burulma Sabiti                  | 3.26<br>oz-in/rad                    | 0.02308 N.m/rad                  |              |
| $k_t$     | Motor Tork Sabiti               | 2.1<br>oz-in/Amp                     | 14.83e-003<br>N.m/Amp            | ±%20         |
| J         | Toplam Eylemsizlik Momenti      | 2.1944e-005<br>oz-in-sn <sup>2</sup> | 15.496e-008<br>kg-m <sup>2</sup> | ±%10         |
| $k_{sac}$ | Sayısal Analog Çevirici Kazancı |                                      | 0.00244<br>Volt/Sayısal          |              |
| $k_{sur}$ | Sürtücü Kazancı                 |                                      | 1<br>Amper/Volt                  |              |

### 3.1.4 Kuru sürtünme belirlenmesi

Pozisyon takibi sistemlerinde sistemin lineer modeli dışında sürtünme modeli de oldukça önemlidir. Kopma torku belirlenmesi amacıyla motora 0V değerinden

başlanarak gerilim uygulanmıştır. Sistemde hareket (kopma) 100mV (0.1A) değerinde gerçekleşmiştir. Motor tork sabitini kullanarak kopma torku (denklem (3-13)  $T_f$ )  $1.885 \cdot 10^{-3}$  N.m olarak bulunur.

$$(J_y + J_m) \cdot \frac{dw}{dt} + B \cdot w + k \cdot \theta + T_f = k_t \cdot i_m \quad (3-13)$$

$$T_f = 1,885 \cdot 10^{-3} \text{ N.m} \quad (3-14)$$

### 3.1.5 Parametrik Simulink® mekanik blok modeli

Parametrik motor modeli motora uygulanan gerilimden ve zıt elektromotor kuvvetinden faydalanarak motor akımı ve yüke uygulanan torkun hesaplandığı bölümdür. Ayrıca motor modelinde PWM sürücüye ait  $R_{dson}$  (drain to source resistance on state) nedeniyle meydana gelen gerilim kaybı da göz önüne alınmıştır. Buna göre

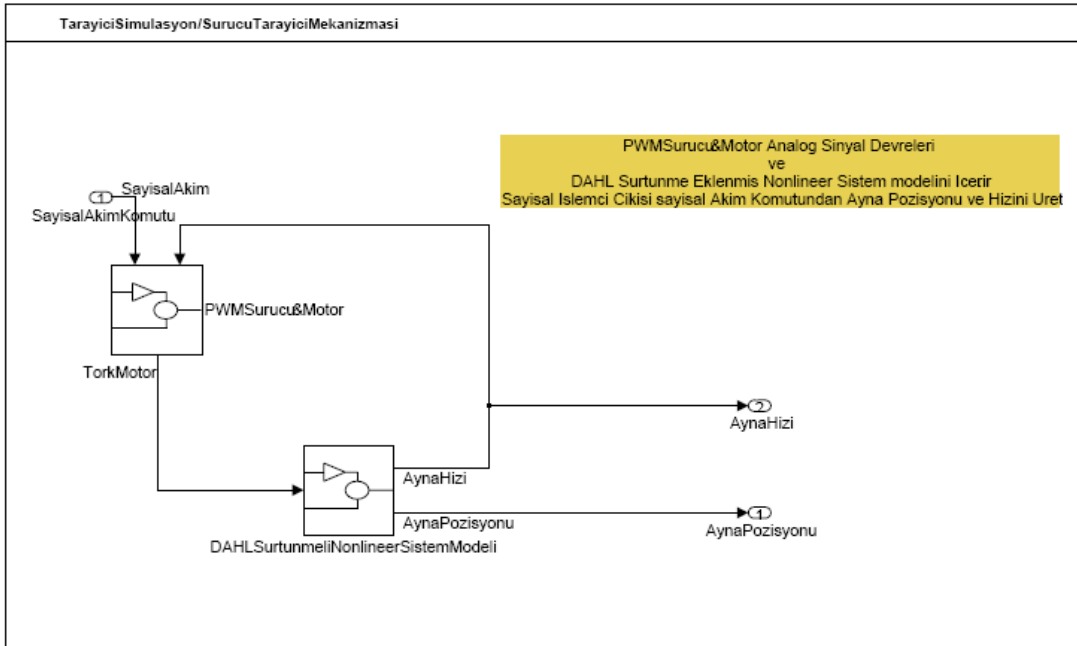
$$i_m = (V_m - w \cdot Kv - i_m \cdot R_{dson}) \frac{1}{Ls + R} \quad (3-15)$$

Denklemde L motor induktansı değeri (Henry), R motor direnç değeri (ohm),  $V_m$  motora uygulanan gerilim (volt),  $i_m$  motora uygulanan akım (amp), Kv zıt elektromotor kuvvet sabiti (volt/ (rad/sn)),  $R_{dson}$  sürücü devresi drain-source arası direnç değeri (ohm), w tarayıcı ayna hızını (rad/s) göstermektedir. Değerler ekipman dokümanlarından [21], [25] alınmıştır.

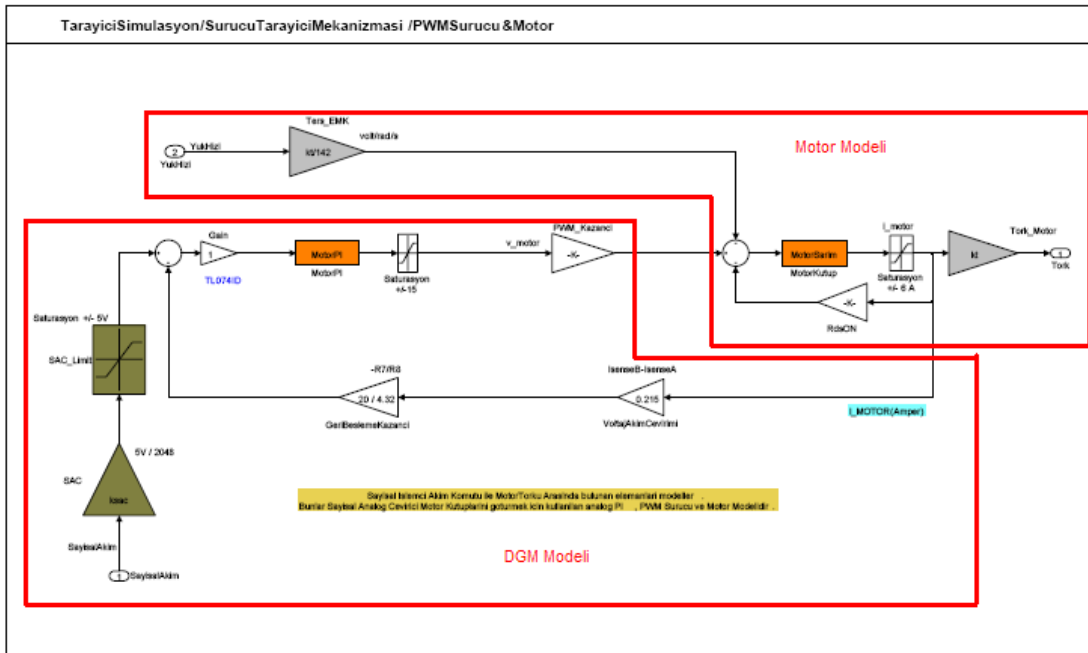
(3-15) ve (3-4) denklemleri motor modelini oluşturmak üzere Şekil 3.7’de verilen “*SurucuTarayiciMekanizmasi*” modeli içinde Şekil 3.8’de verilen “*PWMSurucu&Motor*” bloğunda gerçekleştirilmiştir.

Motora ait hareket denklemi (3-13)’de verilmiştir. Eylemsizlik, sönümlenme ve burulma katsayıları 3.1.2 Tarayıcı sistemi parametreleri bölümünde hesaplanmıştır. Nonlineer sistem modeli Şekil 3.9’da verilmiştir. Sürtünme kuvvetine ait model için “dahl” modeli kullanılmıştır [27] - [29].

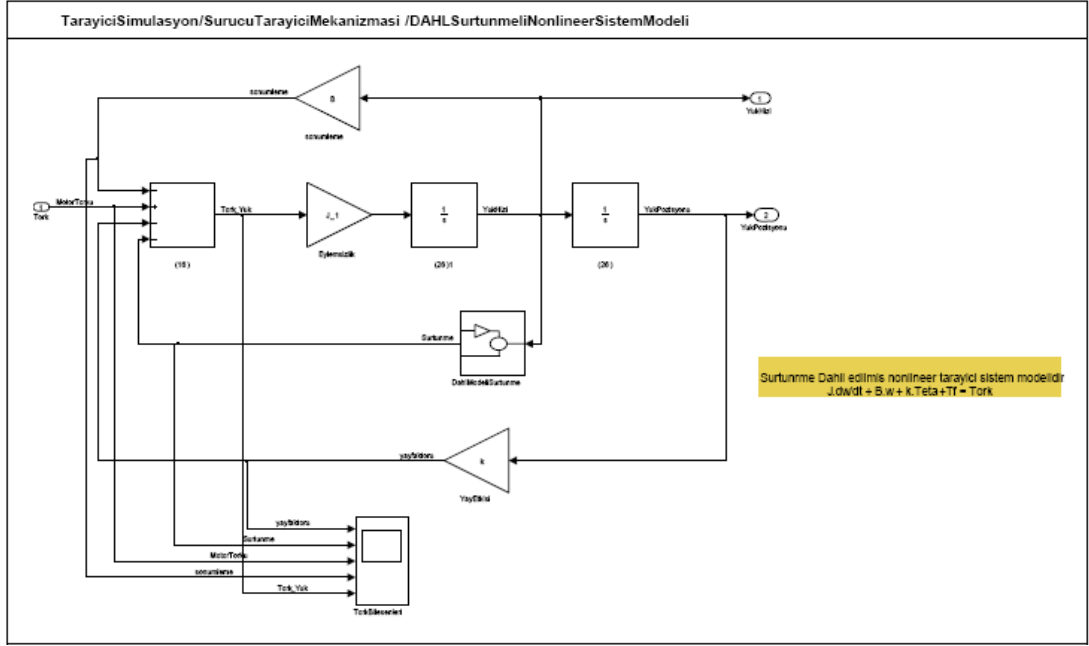
$$\dot{F}_f = w \cdot \left(1 - \frac{F_f \cdot \text{sign}(w)}{f_0}\right)^4 \cdot \text{sign}\left(1 - \frac{F_f \cdot \text{sign}(w)}{f_0}\right) \cdot (\gamma) \quad (3-16)$$



Şekil 3.7 : Tarayıcı simülasyonu sürücü - tarayıcı mekanizması.

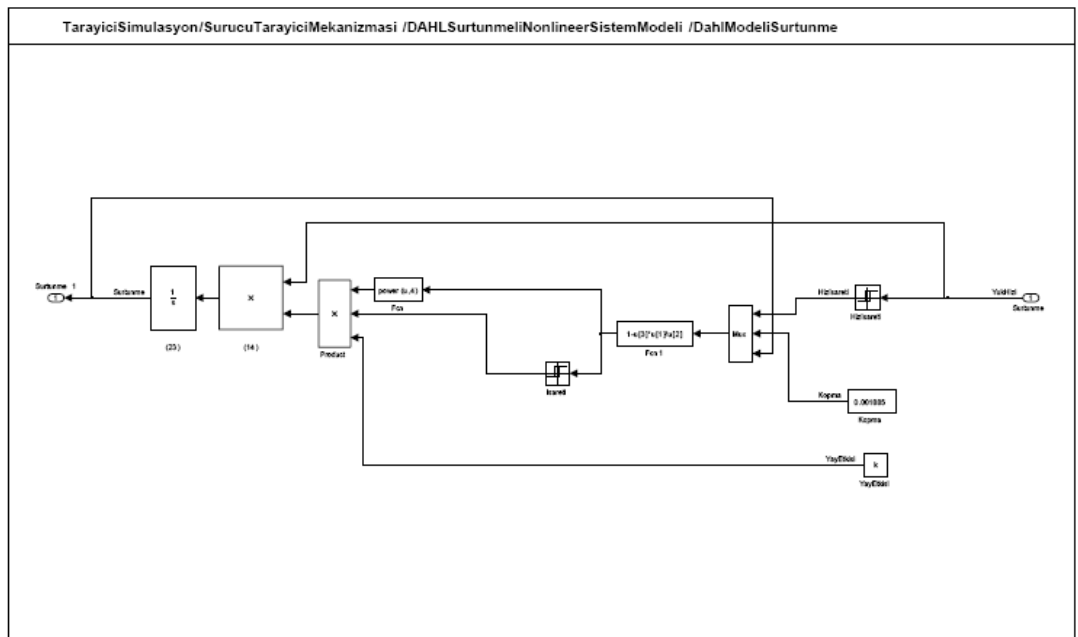


Şekil 3.8 : Tarayıcı simülasyonu PWM Sürücü&Motor modeli.



**Şekil 3.9** : Tarayıcı simülasyon sürtünme etkili nonlinear sistem modeli.

Denklem (3-16)'da  $F_f$  sürtünme kuvvetini (Nm) ,  $w$  yük hızını (rad/sn),  $f_0$  maksimum sürtünme değerini,  $\gamma$  sürtünme sertlik katsayısını ifade etmektedir. Maksimum sürtünme değeri 3.1.4 Kuru sürtünme belirlenmesi bölümünde bulunan kuru sürtünme değeri sertlik katsayısı ise 3.1.3 Dinamik analizör kullanılarak parametre atama bölümünde bulunan burulma katsayısı olarak alınmıştır. (3-16) denklemi sürtünme modelini oluşturmak üzere Şekil 3.9'da verilen nonlinear sistem modeli içinde “*DahlModeliSurtunme*” bloğu içinde gerçekleştirilmiştir (bkz. Şekil 3.10).



**Şekil 3.10** : Tarayıcı simülasyonu dahl modeli sürtünme bloğu.

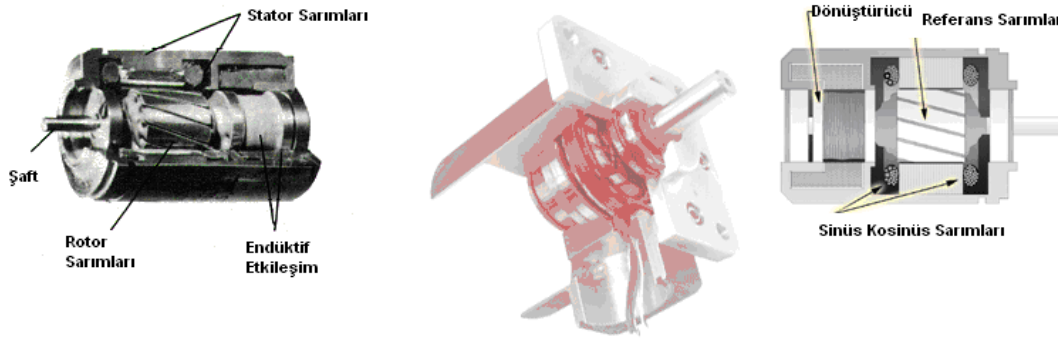
### 3.1.6 Çözücü – ayrıştırıcı modeli

Çözücü modeli verilmeden çözücüler hakkında genel bilgi verilmesi faydalı olacaktır.

#### 3.1.6.1 Tanım ve kullanım alanları

Çözücüler uygulanan referans pozisyon bilgisi ve bağlı olduğu motorun pozisyon bilgisini karşılaştırarak analog pozisyon hatası çıkışı veren pozisyon dönüştürücüleridir.

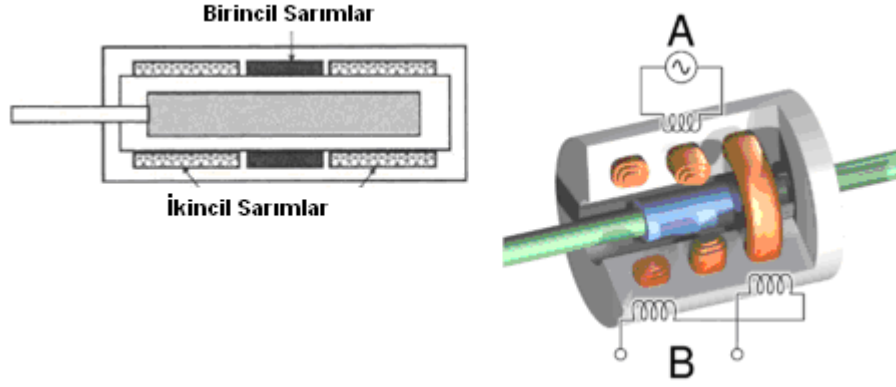
Motor çözücüleri (“resolver”) küçük boyutlu ve hafif oldukları için sistem entegrasyonu çok basittir. Çok zorlu koşullarda sağlıklı ve hassas pozisyon bilgisi sunar. Fiyatları da diğer kontrol uygulamalarındaki pozisyon sensorlarına göre avantajlıdır [30]. Çözücüler yapı olarak küçük motorlara benzerler. Bir tarafında bağlantı flanşı ve şaft uzantısı diğer tarafında ise terminal kabloları mevcuttur [31].



**Şekil 3.11 : Çözücü kesit görünümleri.**

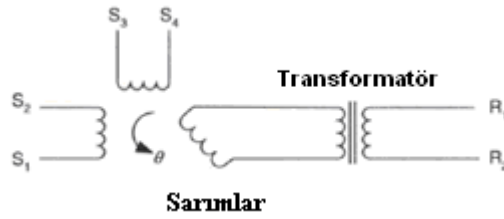
İlk çözücüler ikinci dünya savaşından önce tank ve savaş gemilerinde silah namlu açılarının ölçülmesi amaçlı tasarlanmıştır [32]. Başlangıçta askeri uygulamalar için geliştirilen motor çözücüleri yaklaşık 50 yıldır kullanılmaktadır. Endüstriyel uygulamalarda kullanımı çok geniş olmayan çözücüler başta savunma sanayi ve uzay araştırmaları projelerinde, medikal uygulamalarda, robotik uygulamalarında ve diğer birçok alanda kullanılmaktadır [30].

Çözücüler Lineer Yer Değişimi Transformatörü (LVDT) ailesindendir. LVDT’lerde birincil ve ikincil sarımların etkileşmesi hareket eden ferromanyetik çekirdek ile sağlanır. LVDT’ler zor koşullarda yüksek hassasiyetli pozisyon ölçümü için kullanılır [33].



**Şekil 3.12 : LVDT sarım görünüşleri.**

Çözücülerin LVDT'den farkı ise hareketli çekirdek yerine birincil sarımların ikincil sarımlara orantılı olarak yer değiştirmesidir. Birincil ve ikincil sarımların pozisyonları değiştikçe çözücü çıkışı pozisyon hatasının sinüsü şeklinde oluşur. İki sarım arasındaki elektriksel 90 derecelik fark ve çıkış sinyallerinin oranının çözücü çıkış işaretini oluşturduğu göz önüne alınırsa girişteki gerilim ve frekans oynamalarından her iki çıkış da etkilenir, böylece pozisyon bilgisi çıkışı elektriksel gürültülü ortamlarda hassas ölçüm sunar.



**Şekil 3.13 : Çözücü sarım görünüşleri.**

Çözücü birincil girişine uygulanan referans sinyali transformatör etkisiyle ikincil sarıma taşınır. İkincil sarım çıkışı pozisyona bağlı bir sinüs dalgasıdır.

#### 3.1.6.2 Değişik çözücü tipleri

##### **Çözücü hızına göre**

Tek hızlı çözücüde rotorun 360 derece hareketine karşılık çıkış sinyali tek bir sinüs dalgasını tamamlar. Eğer rotorun tam turuna karşılık çıkış sinyali  $p$  tane sinüs tamamlarsa buna  $p$ -hızlı çözücü adı verilir [34]. Hız çarpanı  $p$ , çözücüdeki kutup çifti sayısıdır. Çok hızlı iki çıkışlı bir çözücü için çıkış sinyalleri:

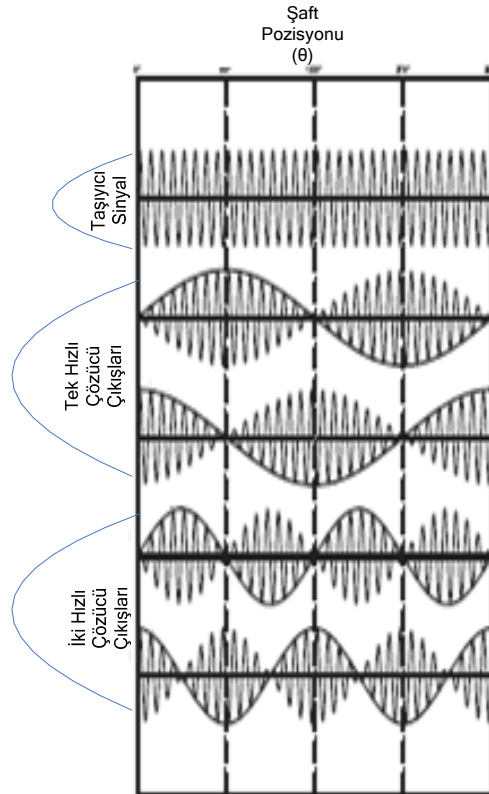
$$E_1 = E_{IN} \left( \frac{N_2}{N_1} \right) \cdot \sin(p \cdot \theta) \quad (3-17)$$

$$E_2 = E_{IN} \left( \frac{N_2}{N_1} \right) \cdot \cos(p \cdot \theta) \quad (3-18)$$

şeklindedir. Denklem (3-17) ve (3-18)'de  $N_1$  birincil sarım sayısı,  $N_2$  ikincil sarım sayısı,  $p$  kutup çifti sayısını ifade etmektedir. Sinüs ve kosinüs sinyallerinin tur sayısı  $p$  kadardır. Kutup çifti sayısındaki artış sistem hassasiyetini artırırken bir elektriksel çevrime karşılık gelen dönme açısını azaltmaktadır.

$$\frac{360^\circ}{\# \text{KutupÇifti}} = \text{periyod(derece)} \quad (3-19)$$

Çok hızlı çözücülerin avantajı çok kutuplu tasarım avantajlarıdır. Mekanik ya da sarımlardan gelen bir düzensizliğin ortalaması hava boşluğunun dağıtılmış akısında alınır.



**Şekil 3.14 :** Çok hızlı çözücü çıkışları.

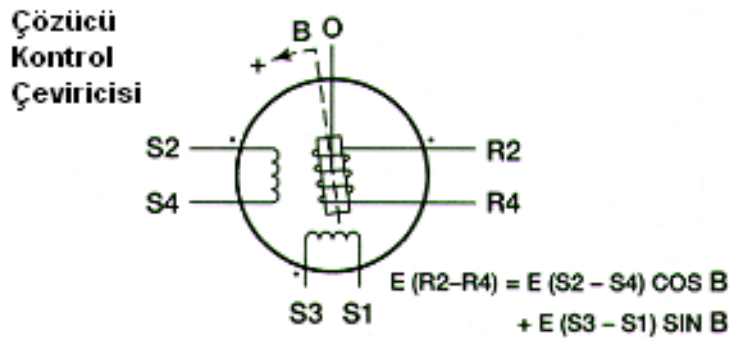


Birincil sarımlara uygulanan gerilimler,

$$E_{S3-S1} = V \cdot \cos(A) \quad (3-21)$$

$$E_{S2-S4} = V \cdot \sin(A) \quad (3-22)$$

şeklindedir.



Şekil 3.17 : Çözücü kontrol çeviricisi diyagramı.

Çözücü çıkış sinyali

$$E_{R2-R4} = E_{S2-S4} \cdot \cos(B) + E_{S1-S3} \cdot \sin(B) \quad (3-23)$$

şeklindedir. Denklem (3-21) ve (3-22)'de V birincil sarıma uygulanan gerilimin tepe değeri, A referans açısı, B şaft gerçek açısıdır. Çözücü S2-S4 sarımındaki kosinüs referansını şaft açısı sinüsü ile, S1-S3 sarımındaki referans sinüsünü şaft açısı kosinüsü ile çarpar. Çıkış bilgisi

$$E_{R2-R4} = V \cdot \sin(A) \cdot \cos(B) + V \cdot \cos(A) \cdot \sin(B) \quad (3-24)$$

$$E_{R2-R4} = V \cdot \sin(A + B) \quad (3-25)$$

olmaktadır. S3-S1 polaritesi değiştirilirse;

$$E_{R2-R4} = V \cdot \sin(A) \cdot \cos(B) - V \cdot \cos(A) \cdot \sin(B) \quad (3-26)$$

$$E_{R2-R4} = V \cdot \sin(A - B) \quad (3-27)$$

çözücü çıkışı elde edilir.

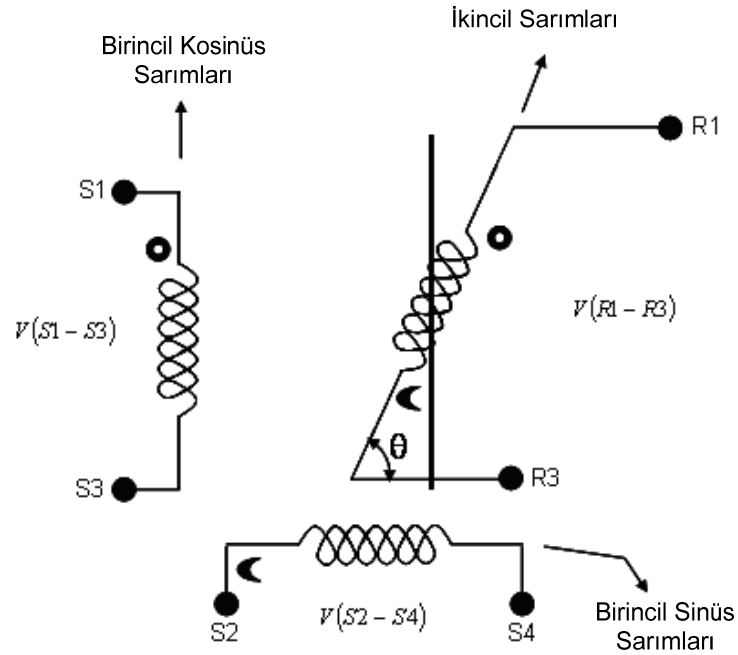
### 3.1.6.3 Tarayıcı sistemi çözücüsü

Tarayıcı sisteminde kullanılan çözücü 4 hızlı çözücü kontrol çeviricisi tipindedir [36]. Statordaki birincil sarımlara uygulanan referans açığa dair sinüs ve kosinüs sinyallerine karşılık ikincil sarımda (rotorda) pozisyon hatasının sinüs bilgisi elde edilir. Çözücü, tarayıcı motor içinde gövdenin iç çeperine yapışık durumda birbirine dik iki birincil sarım ve motor rotoru üzerine yapışık tek bir ikincil sarımdan oluşmaktadır. İkincil sarım hareketli olacağından dolayı transformatörün ikincil sarımında oluşan voltaj rotorun dolayısıyla da tarayıcı ayna açısının bir ölçüsü olmaktadır.

Birincil sarımlara uygulanan COS\_OUT ve SIN\_OUT voltajları aşağıdaki gibidir:

$$COS\_OUT = V(S1 - S3) = V_{ref} \cdot \sin(\omega t) \cdot \cos(4\alpha) \quad (3-28)$$

$$SIN\_OUT = V(S2 - S4) = V_{ref} \cdot \sin(\omega t) \cdot \sin(4\alpha) \quad (3-29)$$



**Şekil 3.18 :** Tarayıcı sistemi çözücü sarımları.

İkincil sarımda elde edilen sinyal:

$$V(R1 - R3) = TR \cdot [V(S1 - S3) \cdot \sin(4\theta) - V(S2 - S4) \cdot \cos(4\theta)] \quad (3-30)$$

$$V(R1 - R3) = V_{ref} \cdot TR \cdot [\sin(w.t) \cdot \sin(4(\theta - \alpha))] \quad (3-31)$$

Çözücü ikincil sarımlarından alınan sinyal:

$$PERR\_IN - PERR\_R = V_{ref} \cdot TR \cdot [\sin(w.t) \cdot \sin(4(\theta - \alpha))] \quad (3-32)$$

şeklinde. Bu denklem parametrik Simulink® modelinde Şekil 3.19’da verilen “Cozucu” bloğunda gerçekleştirilmiştir. Denklemlerde kullanılan parametrelerin tanımları Çizelge 3.3 ’de verilmiştir. Çözücü çıkışındaki pozisyon hatası analog sayısal çeviriciye uygulanacak biçime getirilmek için analog işaret işleme bloklarından geçer. Çözücü çıkışı ve analog sayısal çevirici arasındaki adımlar aşağıda açıklanmıştır.

#### ***Çözücü pozisyon hatası sayısal bilgiye çevirme adımları***

Çözücü çıkışı pozisyon hatası sinyalinden sayısal işlemciye geçiş adımları Şekil 3.20’de verilmiştir. Çözücü ikincil sarımlarından gelen açı pozisyon bilgileri (PERR\_IN ve PERR\_R sinyalleri) ilk etapta enstrümantasyon yükselteciden geçirilerek farkı alınır ve yükseltilir. Yükselteç çıkışı daha sonra seri bağlanmış ve merkez frekansı 20kHz olan özdeş iki bant geçiren filtreden (BGF) geçirilir ve gürültüler azaltılır. İkinci BGF çıkışı (PERRDIV8 sinyali) daha sonra kazancı 8 olan evirmeyen yükselteçten geçirilir ve analog seçici girişlerine verilir. Analog seçicinin giriş sinyali seçim kararı işlemci tarafından verilir. Eğer PERRDIV8 seviyesi çok düşük ise, daha yüksek çözünürlüklü pozisyon hatası ölçümü yapması için sayısal işlemci bir kıyaslama yapar. Duruma göre, analog seçici, PERRDIV8 yerine yükseltilmiş versiyonu olan PERR sinyalini seçer<sup>4</sup>. Analog seçici çıkışı analog sayısal çeviricide (ASÇ) sayısala çevrilerek sayısal işlemciye gönderilir.

Denklem (3-32)’dan görüleceği üzere çözücü çıkışı sinyali modüleli bir sinyaldir (bkz. Şekil 3.21). Bu modülasyonu kaldırmak amaçlı kullanılan birçok demodülasyon teknikleri mevcuttur. Sistemde kullanılan ise eş zamanlı örneklemedir. Bu yöntem modüleli sinyalin taşıyıcı pozitif tepe anında örnekleme alınması ile gerçekleştirilir. Örnekleme analog seçici tarafından

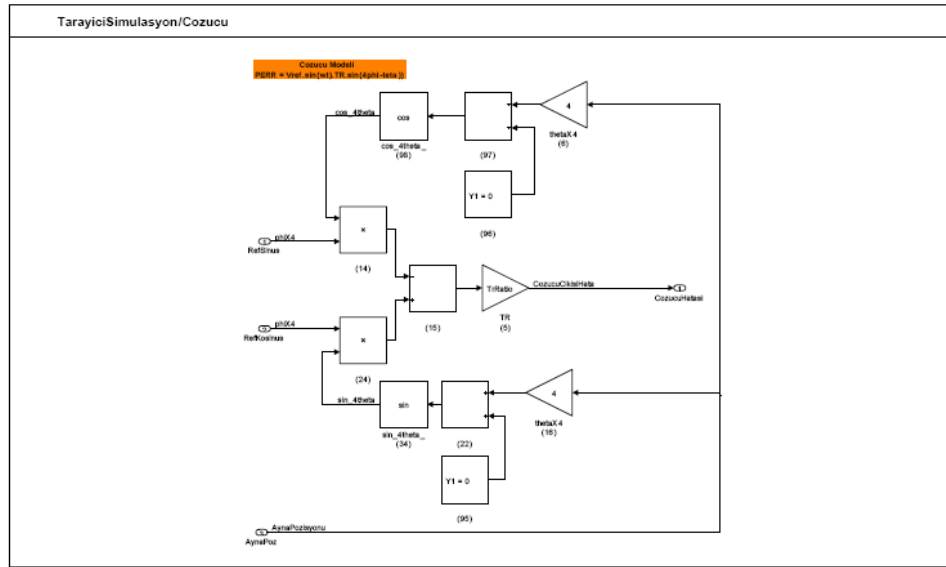
---

<sup>4</sup> Çözünürlüğün artırılması amacıyla hatanın 8 kat alındığı durumda tarayıcı algoritması kontrolör kazancını 8 kat azaltır böylece kapalı çevrim kazancı sabit kalır.

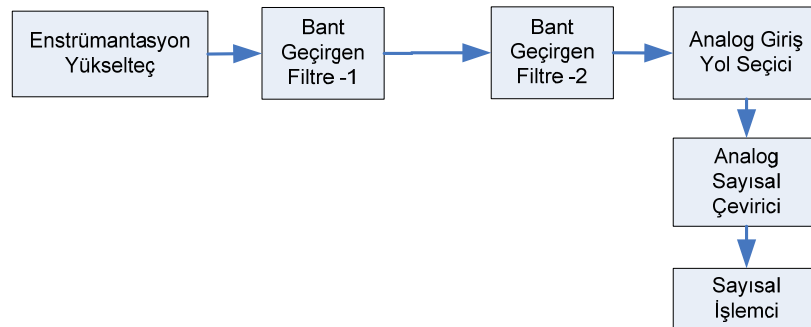
yapılır. Örnekleme yöntemi etkili bir donanım yöntemini içeren senkron genlik demodülasyonudur [37], [38].

**Çizelge 3.3** : Tarayıcı sistemi çözücü devresi parametreleri.

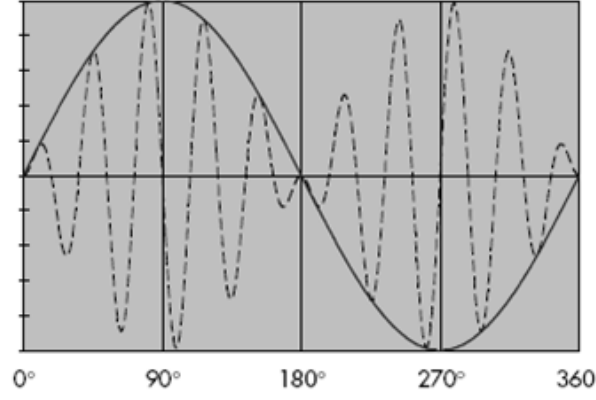
| Sembol    |   | Açıklama                               |
|-----------|---|----------------------------------------|
| $V_{ref}$ | = | Taşıyıcı sinyalin tepe voltajı         |
| $\omega$  | = | Taşıyıcı sinyalin açısal frekansı      |
| TR        | = | Çözücü çevirim oranı                   |
| $\alpha$  | = | İstenen açı pozisyonu                  |
| $\theta$  | = | Rotorun statora göre olan gerçek açısı |



**Şekil 3.19** : Tarayıcı simülasyonu çözücü modeli.



**Şekil 3.20** : Tarayıcı sistemi pozisyon hatası okuma bloğu.



**Şekil 3.21 :** Modüle edilmiş sinüs dalgası.

Sonuç olarak işlemciye gelen pozisyon hatası bilgisi

$$e_{\theta} = (PERR\_R - PERR\_IN) * k_{yuk1} * k_{BGF} * k_{yuk2} \quad (3-33)$$

olarak elde edilir.<sup>5</sup> Denklemlerde kullanılan parametrelerin tanımları Çizelge 3.4 'de verilmiştir.

**Çizelge 3.4 :** Tarayıcı sistemi pozisyon okuma bloğu parametreleri.

| Sembol       |   | Açıklama                          |
|--------------|---|-----------------------------------|
| $k_{yuk1}$   | = | Enstrümantasyon Yükselteç Kazancı |
| $k_{BGF}$    | = | Bant Geçirgen Filtre Kazancı      |
| $k_{yuk2}$   | = | Evirmeyen Yükselteç Kazancı       |
| $k_{asç}$    | = | Analog Sayısal Çevirici Kazancı   |
| $e_{\theta}$ | = | Pozisyon hatası                   |

Bu sinyal ASÇ'den geçtikten sonra işlemciye aktarılır. İşlemcideki sayısal pozisyon hatası bilgisi hata yükseltilerek alındığı durumda :

$$e_{\theta} = -V_{ref} \cdot TR \cdot [\sin(4(\theta - \alpha))] * k_{yuk1} * k_{BGF} * k_{yuk2} * k_{asç} \quad (3-34)$$

<sup>5</sup> Denklem (3-33)'de bant geçirgen filtrelerden meydana gelen faz kayması ihmal edilmiştir.

olarak elde edilir. İlgili değerler yerine konarsa işlemcideki pozisyon hatası bilgisi hata yükseltilerek alındığı durumda,

$$e_{\theta} = -5.46 * 10^4 [\sin(4(\theta - \alpha))] \quad (3-35)$$

hata yükseltilmeden alındığı durumda ,

$$e_{\theta} = -6.83 * 10^3 [\sin(4(\theta - \alpha))] \quad (3-36)$$

olarak elde edilir. Buna göre gerçek şaft pozisyon bilgisi, hata yükseltilerek alındığı durumda,

$$\theta = 0.25 * \arcsin(-e_{\theta} * 1.83 * 10^{-5}) + \alpha \quad (3-37)$$

hata yükseltilmeden alındığı durumda ,

$$\theta = 0.25 * \arcsin(-e_{\theta} * 1.46 * 10^{-4}) + \alpha \quad (3-38)$$

olarak elde edilir.

## 3.2 Donanım Bileşenlerinin Benzetimi

### 3.2.1 Parametrik Simulink® donanım blok modeli

Tarayıcı sisteminin donanımsal tarafında yer alan temel birimler analog işaret işleme, analog sayısal çevirici ve darbe genişlikli modülasyon sürücü birimleridir. Simülasyonda bu birimler sırasıyla “*AnalogSinyalIsleme*”, “*ASC*” ve “*SurucuTarayiciMekanizmasi*” altında bulunan “*PWMSurucu&Motor*” blokları kullanılarak modellenmiştir.

#### 3.2.1.1 Analog işaret işleme

Analog işaret işleme blokları ile çözücü çıkışındaki pozisyon hatası analog sayısal çeviriciye uygulanacak biçime getirilir. Bu adımlar 3.1.6 Çözücü – ayrıştırıcı modeli bölümünde Çözücü pozisyon hatası sayısal bilgiye çevirme adımları kısmında açıklanmıştır. Şekil 3.20’de verilen bu adımlar simülasyon modelini oluşturmak amacıyla Şekil 3.22’de verilen “*AnalogSinyalIsleme*” modeli içinde gerçekleştirilmiştir.

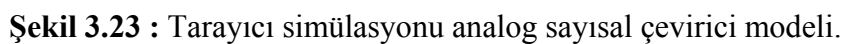
### 3.2.1.2 Analog sayısal çevirici

Analog işaret işleme bloğunda  $\pm 5V$  düzeyine getirilen pozisyon hatası sayısal işlemci bloğuna girmeden önce analog sayısal çevirici (ASC) bloğundan geçer.

ASC girişindeki  $\pm 5V$  analog sinyali 12 bit sayısal veriye ( $\pm 2^{11}$ ) çevirir. ASC modeli

$$SayisalHata = \frac{Ana \log Hata * 2^{11}}{5} \quad (3-39)$$

şeklinde benzetilmiştir. Benzetim bloğu Şekil 3.23’de verilen “ASC” bloğunda gerçekleştirilmiştir. Simulink® modelinin gerçeğe yakın olması amacıyla gürültü üreteci ve limitleme bloğu modele eklenmiştir.



### 3.2.1.3 Darbe genişlikli modülasyon sürücü

DGM (Darbe Genişlikli Modülasyon) sürücü modeli tarayıcı sisteminde kapalı döngü akım kontrol çevriminin gerçekleştirildiği bloktur. DGM sürücü bloğu sayısal işlemci pozisyon kontrol döngüsü ile üretilen kontrol sinyalini kapalı çevrim akım kontrol döngüsünden geçirerek motora uygulanacak gerilimi oluşturur.

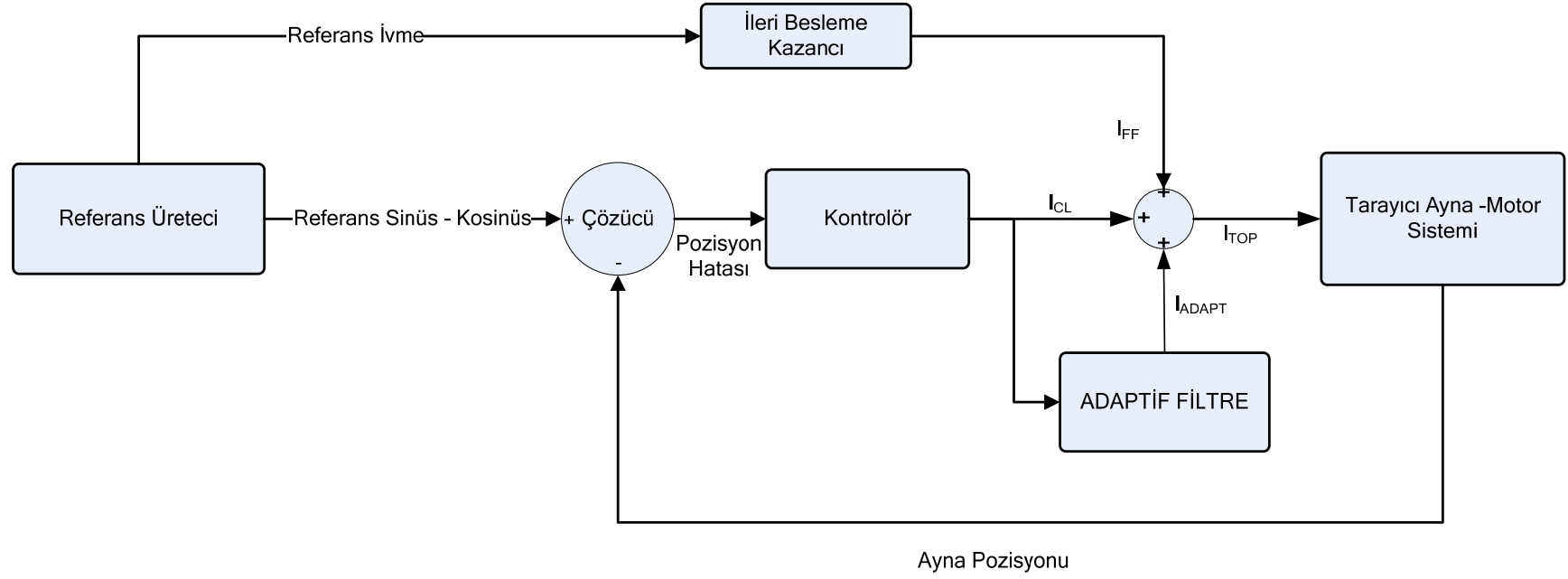
Bloktaki ilk eleman SAC (sayısal analog çevirici), sayısal işlemci çıkışındaki  $\pm 2^{11}$  dijital akım sinyalini  $\pm 5V$  seviyesine çevirir. İkinci eleman ise motor dinamiğindeki sıfırı yok etmek ve sürekli hala hatasını sıfırlamak amacıyla tasarlanan PI kontrolördür. Döngünün üçüncü elemanı DGM sürücü kazancıdır. Kazanç değeri ekipman dokümanından alınmıştır [25]. Kapalı çevrim akım kontrol döngüsünün tamamlanması için gereken son bileşen tarayıcıdan örneklenen motor akımının geribesleme sağlayacak şekilde gerilim değerine dönüştürülmesidir. DGM modeli Şekil 3.7’de verilen “*SurucuTarayiciMekanizmasi*” modeli içinde Şekil 3.8’de verilen “*PWMSurucu&Motor*” bloğunda gerçekleştirilmiştir.



#### 4. TARAYICI SİSTEMİNİN KONTROLÜ

Tarayıcı sisteminde iki kontrol çevrimi bulunmaktadır. Akım kontrol çevrimi elektronik kart üzerinde gerçekleştirilmiştir. Tarayıcı sistemi pozisyon kontrol çevrimi sayısal işlemci içinde gerçekleştirilmektedir. Şekil 4.1 pozisyon kontrol çevrimini göstermektedir. Motor çözücüsü ve analog işaret işleme blokları tarafından üretilen pozisyon hatası işlemcide işlenerek  $I_{TOP}$  akım komutu oluşturulur ve motora uygulanmak üzere karta gönderilir. Tarayıcı kontrol algoritması içinde üç bileşen bulunur. Bunlar kapalı çevrim hatasına karşı tasarlanan  $I_{CL}$  kapalı çevrim akım bileşeni ile kontrol algoritmasının iyileştirilmesine yönelik tasarlanan  $I_{FF}$  ileri besleme akım bileşeni ve  $I_{ADAPT}$  uyarlamalı akım bileşenleridir.

Tarayıcı kontrol sisteminden beklenen, istenen referans işareti takip edebilmesidir. Referans pozisyon grafiği Şekil 2.13'de verilmiştir. Bu amaçla, tasarlanan kontrolörün bant genişliği referans işaretinde bulunan en yüksek frekanslı bileşen olan 357 Hz'den büyük olmalıdır. Fakat 2.2 Kontrol Problemi bölümünde açıklandığı üzere bant genişliğini sınırlayan faktörler mevcuttur. Yapılacak en uygun çözüm bant genişliğini referans pozisyonu takip edebilecek en küçük değerde tutmaktır. Tarayıcı kontrol sistemi bant genişliği 375 Hz olarak hedeflenir. Ayrıca tasarlanacak kontrolör termal görüntünün oluşturulduğu lineer tarama bölgesinde oldukça hassas çalışması gerekir. Gerekli görüntü performansı için lineer tarama bölgesinde oluşan hata 600  $\mu$ rad değerinden küçük olmalıdır. Bunun yanında tarayıcı sistemi sinüzoidal geçiş bölgelerinde ve hızlı geriye dönüş bölgesinde yüksek ivmelenme değerlerine çıkmaktadır ( $1.5 \times 10^5$  rad/sn<sup>2</sup>). Tasarlanan kontrolör yüksek ivmelenme olan bölgelerde sistemin tepkisini hızlandırmalıdır. Tarayıcı kontrol sisteminde dikkat edilmesi gereken bir diğer husus da sistemde bulunan lineer olmayan davranışlar ve sistem parametrelerinin zamanla değişebilmesidir. Bu bölümde tarayıcı sistemi performansını sağlamak üzere tasarlanan kapalı çevrim, ileri besleme ve uyarlamalı akım bileşenlerinin detaylı tasarımı verilmiştir.



**Şekil 4.1** : Tarayıcı sistemi pozisyon kontrol çevrimi.

#### 4.1 İleri Besleme Akım Bileşeni Tasarımı

Tarayıcı sistemi 25Hz frekanslı periyodik bir sistemdir. Bu periyodik sistemde kontrol işaretinin (motora uygulanan akım) önceden tahmin edilmesi kontrol algoritmasına katkıda bulunacaktır. İleri besleme akım bileşeni bu katkıyı sağlamak üzere tasarlanmıştır. İleri besleme akım bileşeninin görevi ivmelenmenin olduğu referans pozisyon bölgelerinde yük eylemsizliğine karşı kontrolörün tepkisinin hızlandırılmasıdır. Böylece ileri besleme akım bileşeni kapalı çevrim bileşenine ivmelenme bölgesinde yol göstermiş olur ve toplam akım miktarının temel bileşenini oluşturur. İleri besleme akım bileşeni çevrimdışı hesaplanan akım değerlerinin tutulduğu bir tablonun yazılıma ilave edilmesi ile gerçekleşir. Tabloda tarama çevriminin her bir örnekleme değeri için motor çözücüsünün ikincil sargılarına uygulanmak üzere hazırlanan referans açının sinüs ve kosinüs değerleri ve ileri besleme akım değerini gösterir sütunlar bulunur. Tablo değerleri Şekil 2.13’de verilen tarama referans pozisyon profiline göre oluşturulur. Çevrimdışı tablonun oluşturulması amacıyla her örnekleme değeri için referans açısı değerinden ivme ve hız değerleri elde edilir. İvme ve eylemsizlik değerlerinden bir katsayı ile ileri besleme akım bileşeni oluşturulur. Denklem (3-1) sadece ivmelenme bileşeni için sadeleştirilirse,

$$(J) \cdot \frac{dw}{dt} = k_t \cdot i_m \quad (4-1)$$

elde edilir. Motora uygulanacak akımın sayısal işlemci çıkışından sonra geçtiği sayısal analog çevirici ve akım sürücü devrelerindeki kazançlar göz önünde bulundurulursa;

$$i_m = I_{FF} \cdot k_{sac} \cdot k_{sur} \quad (4-2)$$

ileri besleme akım bileşeni ile motora uygulanan akım arasındaki ilişki olarak elde edilir. Denklem (4-2)’de  $I_{FF}$  ileri besleme akım bileşeni (sayısal),  $k_{sac}$  sayısal analog çevirici kazancı (volt/sayısal),  $k_{sur}$  akım sürücü devresi kazancına (amp/volt) karşılık gelmektedir.

(4-1) ve (4-2) denklemleri birleştirilirse

$$I_{FF} = \frac{J \cdot \frac{dw}{dt}}{k_t \cdot k_{sac} \cdot k_{sur}} \quad (4-3)$$

ileri besleme akım bileşeni elde edilir. Denklem (4-3) incelenirse  $I_{FF}$  ileri besleme akım bileşeni ile ivmelenme arasında sabit bir katsayı bulunur:

$$k_{iffivme} = \frac{I_{FF}}{dw/dt} \quad (4-4)$$

$$k_{iffivme} = \frac{J}{k_t * k_{sac} * k_{sur}} \quad (4-5)$$

Denklem (4-5) Çizelge 3.2 'de verilen tarayıcı sistemi parametreleri ile hesaplanır.

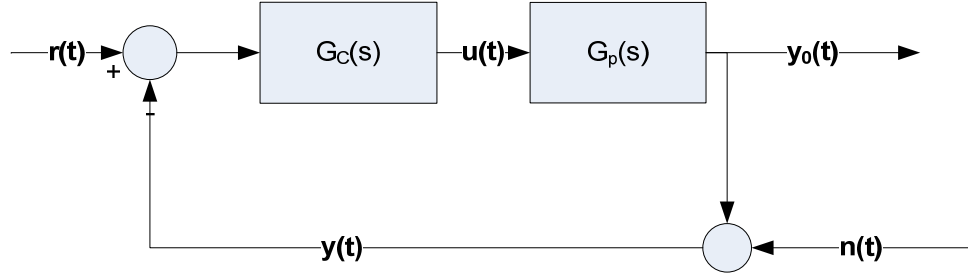
## 4.2 Kapalı Çevrim Kontrolörü Tasarımı

Tarayıcı pozisyon çevriminde ileri besleme akım bileşeni kullanılarak eylemsizliğe karşı kontrol gerçekleştirilir. Gerekli çevrim performansını sağlamak için eklenecek sistem dinamiği ve hedeflenen bant genişliği ise kapalı çevrim akım bileşeni ile elde edilir. Kapalı çevrim kontrolörü Odabas'ın makalesi [6] temel alınarak ve eğri uydurma yöntemiyle [26] desteklenerek tasarlanacaktır.

### 4.2.1 Eğri uydurma yöntemi

Frekans tanım bölgesi tasarımı temel olarak eğri uydurma yöntemidir. Açık çevrim bode diyagramı istenen kriterlere göre şekillendirilir. Gürültü dâhil edilmiş bir kapalı çevrim kontrol sistemi Şekil 4.2'de verilmiştir. Eğri uydurma yönteminin uygulanması için sistem minimum fazlı olmalıdır. Sistemin minimum fazlı olması için sağ yarı düzlemde sıfır ve kutup bulunmaması gerekir [26].

Tipik olarak referans sinyali düşük frekanslarda etkilidir. Alçak geçirgen filtre özelliği taşır. Gürültü işareti ise yüksek frekanslarda kontrol çevrimine dâhil olur ve yüksek geçirgen filtre özelliğindedir. Eğri uydurma yöntemine göre kapalı çevrim kontrol sisteminde gerekli takip performansının ve gürültü azaltmasının sağlanması için açık çevrim transfer fonksiyonu genliğinin düşük frekanslarda 1'den çok büyük, yüksek frekanslarda ise 1'den çok küçük olması gerekmektedir.



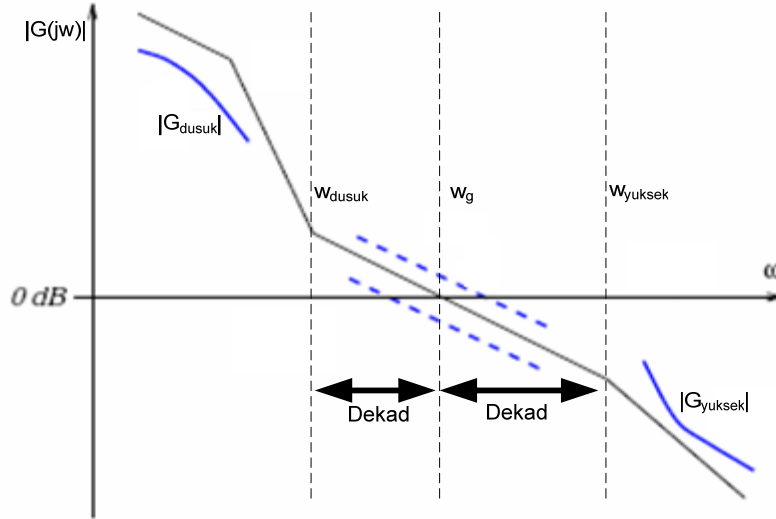
**Şekil 4.2** : Gürültü etkili kapalı çevrim kontrol sistemi.

Eğri uydurma yöntemindeki bir diğer tasarım kriteri ise faz payıdır. Faz payı, kararsız olana kadar sistem eklenebilen faz miktarını belirtir [20]. Bu nedenle faz payı mümkün olduğu kadar yüksek tutulmalıdır. Yeterli bir faz payı için kazanç geçiş frekansında açık çevrim sistemin fazı  $-180^\circ$ 'den büyük olmalıdır. Örneğin  $70^\circ$  ile  $90^\circ$  arasında bir faz payı için açık çevrim sistemin fazı  $-110^\circ$  ile  $-90^\circ$  arasında olmalıdır. Tarayıcı sisteminde faz payı bu aralıkta kalacak şekilde hedeflenir.

Eğri uydurma yönteminde bu kriterleri sağlayacak bode diyagramı kazanç eğrisinde frekans bölgeleri eğimleri oluşturulur. Düşük frekans eğimi ve yüksek frekans eğim bölgeleri arasında en azından iki dekad aralık bulunmalıdır, böylece kazanç geçiş frekansının düşük ve yüksek frekans bölgelerinden yaklaşık 1 dekad uzakta bulunması garantilenir. Kazanç geçiş frekansı bölgesinde ( $\sim$ BG bölgesi) iki dekad boyunca  $-20$  dB/dekad eğim hedeflenir. Bant genişliği bölgesi 375 Hz BG değeri için 37.5 Hz – 3750 Hz (2 dekad) aralığıdır. Ayrıca düşük ve yüksek frekans bölgelerinde yüksek eğimli düşüş istenir. Yüksek frekans bölgelerinde eğim

$$Egim = -(SistemDereceFarki) \times 20 \quad (4-6)$$

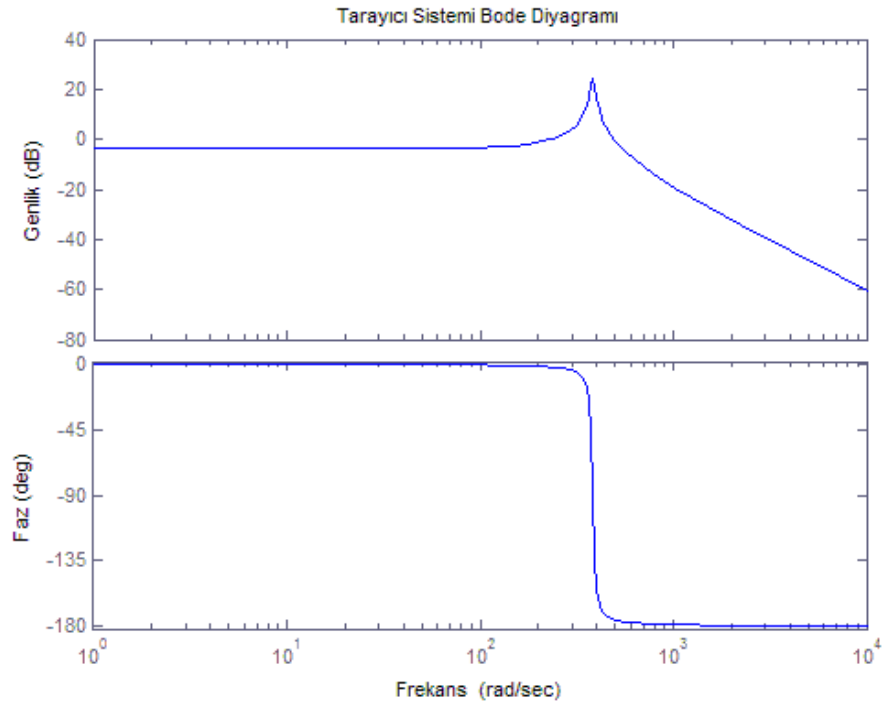
db/dekad olarak hesaplanır. Sistem derece farkı ise açık çevrim transfer fonksiyonunda pay ve payda arasındaki derece farkı olarak tanımlanır. Düşük frekans eğimi ise genelde birkaç deneme-yanılma safhasından sonra belirlenir. En iyi kapalı çevrim bode diyagramı eğrisini baştan belirlemek zordur [26]. Sonuç olarak hedeflenecek bode diyagramı eğrisi yapısal olarak Şekil 4.3'de verildiği gibi olmalıdır. Düşük frekanslarda yüksek kazanç ile başlanır. Düşük frekans bölgesi boyunca  $-40$  dB/dekad ile düşüş gerçekleşir. Bant genişliği (375 Hz) çevresinde yaklaşık iki dekad boyunca  $-20$  dB/dekad sağlanır. Yüksek frekanslarda gürültüyü çevrime dâhil etmemek için (4-6) denklemi tarayıcı sistemi derece farkı olan 2 için hesaplanırsa  $-40$  dB/dekad düşüş elde edilir.



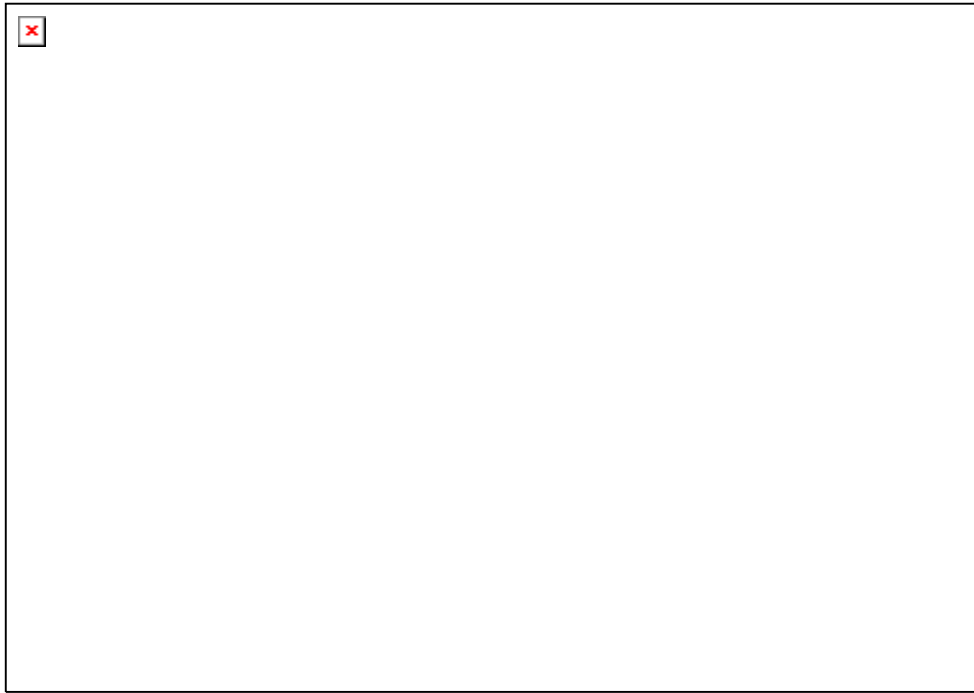
**Şekil 4.3** : Eğri uydurma için hedeflenen bode diyagramı kazanç eğrisi.

Tarayıcı sistemi bode diyagramı Şekil 4.4’de verilmiştir. Tarayıcı sistemi düşük frekanslarda sabit 0 db genliğindedir. Bant genişliği ( $\sim 2350$  rad/sn) çevresinde -40 db/dekad düşüş gerçekleşir. Bant genişliği bölgesinde sistem fazı  $-180^\circ$ ’dir. Yüksek frekanslarda ise sistem genliği yine -40 db/dekad düşüş gösterir. Buna göre eğri uydurma yöntemine göre sistem eklenecek kontrolör sisteme düşük frekanslarda -40 db/dekad, bant genişliği bölgesinde +20 db/dekad ve yüksek frekanslarda 0 db/dekad eklemelidir. Ayrıca yeterli bir faz payı için bant genişliğinde yaklaşık  $70^\circ - 90^\circ$  aralığında faz sisteme eklenmelidir. Bu kriterlere göre tasarlanacak kontrolör tipik bode diyagramı Şekil 4.5’de verilmiştir.

Kontrolör tasarımı kontrol performansı için eklenecek sistem dinamiği amaçlı kontrolörün tasarımı başlar. Bu adım 4.2.2 Çift integratörlü PI kontrolör tasarımı bölümünde verilmiştir. İkinci adım ise eğri uydurma yöntemine uygun frekans tanım bölgesi kriterlerinin yakalanması amacıyla gerekli kontrolör eklentisinin yapılmasıdır. İkinci adım için detaylı tasarım ise 4.2.3 Faz ilerlemeli – gerilemeli kontrolör tasarımı bölümünde açıklanmıştır.



**Şekil 4.4** : Tarayıcı sistem bode diyagramı.



**Şekil 4.5** : Eğri uydurma yöntemine uygun kontrolör tipik bode diyagramı.

#### 4.2.2 Çift integratörlü PI kontrolör tasarımı

Bir kontrol sisteminde genel olarak beklenen kriterlerden biri sürekli hal hatasının engellenmesidir. Tarayıcı sistemi ikinci dereceden ve tipi 0'dır (bkz. denklem (3-12)). Tarayıcı sisteminde hedeflenen referans pozisyon grafiği ise Şekil 2.13'de

verilmiştir. Referans pozisyon grafiğinde rampa girişli (hızlanma) bölgeler bulunmaktadır. Rampa giriş için hız hata katsayısı

$$K_v = \lim_{s \rightarrow 0} sG(s) \quad (4-7)$$

olarak verilir. Rampa giriş için sürekli hal hatası ise

$$e_{ss} = \frac{1}{K_v} \quad (4-8)$$

olarak tanımlanır. Rampa giriş için sistemin sürekli hal hatası yapmaması için tipi 2 olmalıdır [24]. Bu nedenle tarayıcı sisteminin rampa giriş için sürekli hal hatasını engellemek amacıyla sistem  $s = 0$  noktasına iki kutup eklenmelidir.

Ayrıca tarayıcı sisteminin denklem (3-12)'de verilen açık çevrim transfer fonksiyonu incelenirse 61 Hz frekansında kompleks eşlenik kutuplarının olduğu gözlenir. Kontrolör performansı için sisteme bu dinamiği yok edecek ilave sıfırların eklenmesi gerekir. Böylece sistemde kompleks eşlenik kutup-sıfır götürmesi yapılacaktır. Fakat tarayıcı sisteminde lineer olmayan davranışların etkisiyle 61Hz'de yer alan sistem kutuplarının yeri değişebilir. Sisteme eklenecek sıfırların kutuplardan aşırı sağ tarafta yer alması durumunda kontrolörlü sistem kök eğrisi sağ yarı düzleme geçerek sistemi kararsız hale getirebilir [26]. Bunun yanında eğri uydurma yönteminde bant genişliği çevresinde -20 dB/dekad eğimin sağlanabilmesi için kontrolör sıfırları sistem kutuplarından daha düşük frekansta (imajiner düzlemde sağ tarafta) yer alması gerekmektedir. Ayrıca kutup – sıfır götürmesi yapılırken çevrim fazının -180°'den düşük olması engellemelidir. Bu kriterler dikkate alındığında kontrolör sıfırlarının sistem kutuplarının yaklaşık 2/3 frekansında yer alması önerilmiştir [6]. Kontrolör sıfırları frekansı, sistem kutupları frekansı 61 Hz değerinin yaklaşık 2/3 değeri olan 39 Hz (246 rad/s)'de seçilmiştir. Çift integratörlü PI kontrolörü

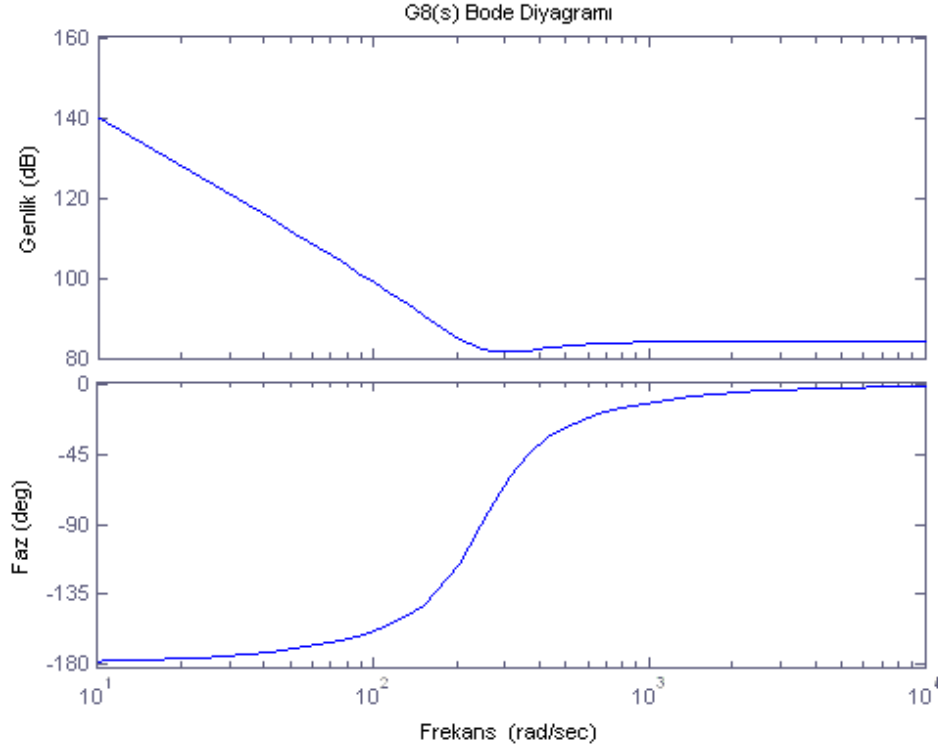
$$G8(s) = \frac{K_{G8} \cdot (s^2 + 2 \cdot \xi \cdot (246) + 60600)}{s^2} \quad (4-9)$$

formunda olacaktır<sup>6</sup>.

---

<sup>6</sup> Çift integratörlü PI kontrolör çalışmada G8(s) olarak adlandırılacaktır.

Kazanç ve sönümlleme faktörleri tüm kontrolör tasarımıdan sonra simülasyon çalışmalarında belirlenecektir. Örnek bir kazanç ve sönümlleme faktöründe çift integratörlü PI kontrolörü bode diyagramı Şekil 4.6’da verilmiştir.



**Şekil 4.6** : Örnek bir çift integratörlü PI kontrolör bode diyagramı.

#### 4.2.3 Faz ilerlemeli – gerilemeli kontrolör tasarımı

Bir önceki bölümde açıklanan çift integratörlü PI tasarımı üstüne, tüm kontrolörü eğri uydurma yöntemine uygun hale getirmek için faz ilerlemeli-gerilemeli kontrolör tasarlanması gerekmektedir. Çift integratörlü PI kontrolör Şekil 4.6’dan görüldüğü üzere sisteme düşük frekans bölgesinde -40 dB/dekad, bant genişliği ve yüksek frekans bölgesinde 0 dB/dekad genlik eklenmiştir. Ayrıca bant genişliği frekansı olan 375 Hz değerinde çift PI sisteme 0° faz katkısında bulunmuştur. Bu bilgiler eğri uydurma yöntemi bölümünde verilen eklenecek kontrolör (Şekil 4.3) ve tarayıcı sistemi (Şekil 4.4) frekans tanım bölgesi bilgileri ile birleştirirse faz ilerlemeli – gerilemeli kontrolör tasarımı çıkartılır.

Buna göre faz ilerlemeli - gerilemeli kontrolör düşük frekanslarda 0 dB/dekad, bant genişliği bölgesinde +20 db/dekad, yüksek frekanslarda ise 0 dB/dekad genlik katkısında bulunmalıdır. Faz ilerlemeli – gerilemeli kontrolörün sisteme faz katkısı ise bant genişliği frekansında ~ +90° olmalıdır. Buna göre BG bölgesi öncesinde bir

sıfır (faz ilerleme), BG bölgesi sonunda ise bir kutup (faz gerileme) eklenmelidir. Odabas V. makalesinde benzer bir faz ilerleme- gerilemeli kontrolör kullanmıştır [6]. İlgili makalede faz ilerleme sisteme BG frekansının 1/3 frekans değerine, faz gerileme ise BG frekansının 3 katı değerine yerleştirilmesi önerilmiştir. Ancak ilerleme ve gerileme köşelerinin bu değerlerde yer alması BG bölgesi çevresinde iki dekad boyundan küçük bir aralıkta -20 dB/dekad (-1 eğim) sağlayacaktır. Eğri uydurma yönteminde hedeflenen ise -1 eğim bölgesinin en az iki dekad olarak sağlanmasıdır. Buna göre sıfır ve kutup sırasıyla BG frekansının 1/10'undan daha düşük ve 10 katından daha yüksek frekanslara atanmalıdır. Sisteme eklenecek sıfır 25 Hz (158 rad/sn), kutup ise 3750 Hz (23562 rad/sn) olarak seçilmiştir. Faz ilerlemeli-gerilemeli kontrol transfer fonksiyonu

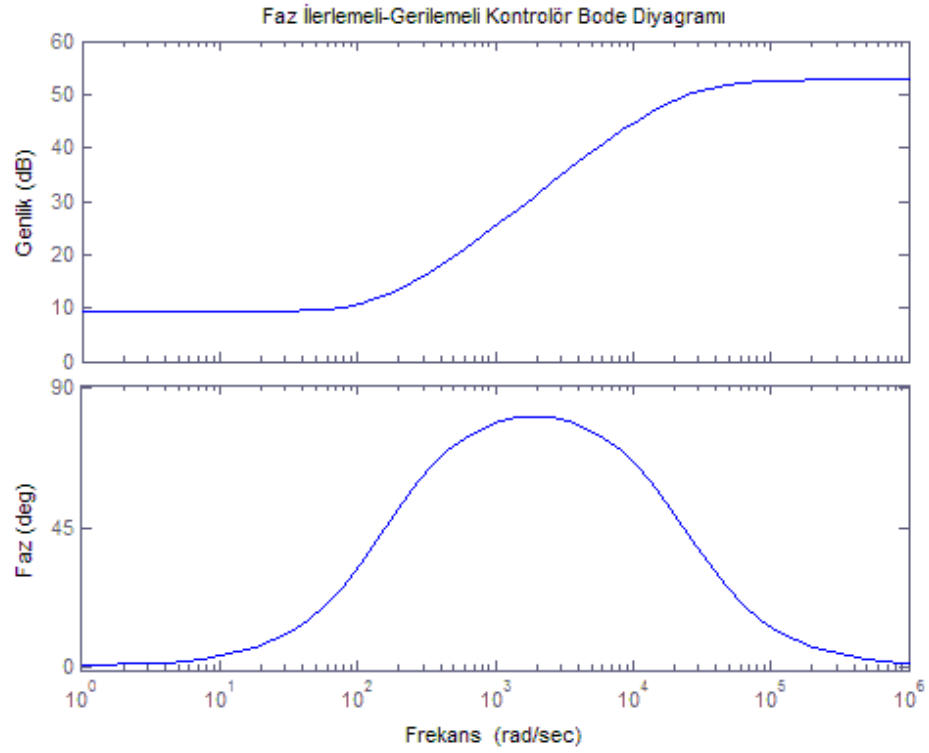
$$G4(s) = \frac{K_{G4} \cdot (s + 158)}{(s + 23562)} \quad (4-10)$$

olarak elde edilir<sup>7</sup>. Kazanç değeri simülasyon çalışmalarında elde edilecektir. Örnek bir kazanç değeri için faz ilerlemeli-gerilemeli kontrolör bode diyagramı Şekil 4.7'de verilmiştir. Diyagramdan da görüldüğü üzere BG bölgesinde iki dekad boyunca +20dB/dekad genlik katkısı sağlanmıştır.

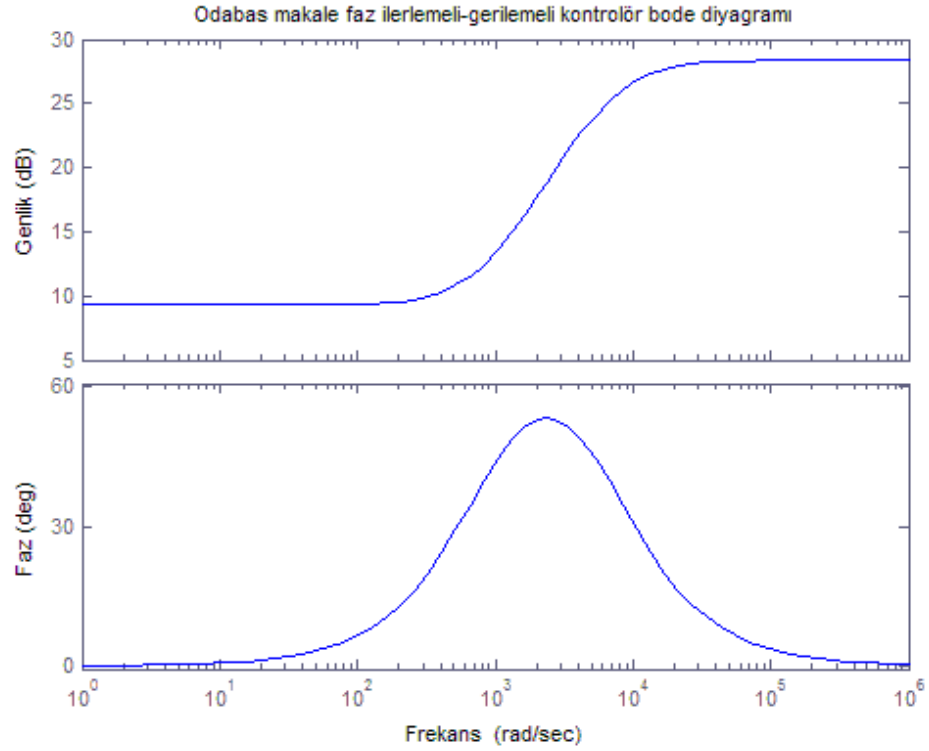
Şekil 4.8'de ise Odabas V. makalesinde önerildiği üzere sıfır ve kutuplar BG değerinin 1/3 ve 3 katı frekanslarına konulduğu durumda faz ilerlemeli – gerilemeli kontrolör bode diyagramı verilmiştir. Öngörüldüğü üzere bu kontrolör sadece 1 dekad boyunca -1 eğim sağlamış hedeflenen iki dekad aralığı sağlanamamıştır.

---

<sup>7</sup> Faz ilerlemeli – gerilemeli kontrolör çalışmada G4(s) olarak adlandırılacaktır.



Şekil 4.7 : Örnek bir faz ilerlemeli-gerilemeli kontrolör bode diyagramı.

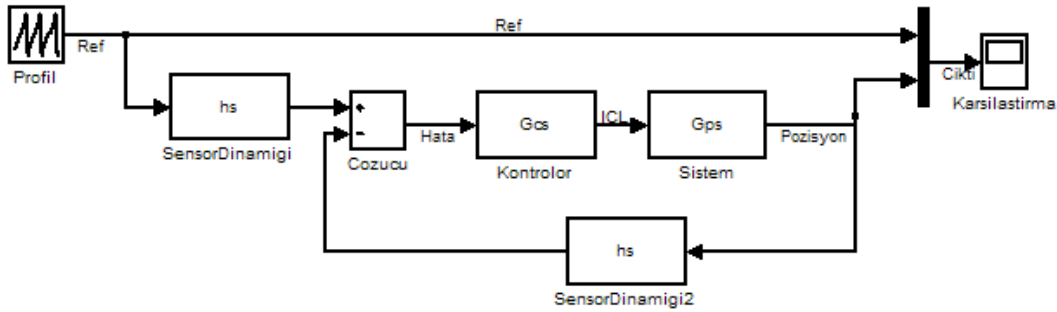


Şekil 4.8 : Odabas makale faz ilerlemeli-gerilemeli kontrolör bode diyagramı.

#### 4.2.4 Kapalı çevrim kontrolör tasarımı simülasyon sonuçları

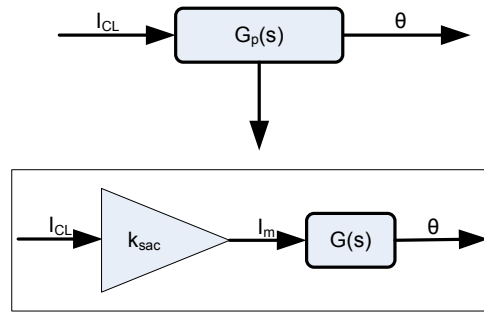
Tasarımı verilen kapalı çevrim kontrolörü sisteme uygulanmadan önce simülasyon üzerinde test edilmeli ve gerekli kazanç değerlerinin hesaplanması ve hassas parametre ayarlama işlemleri yapılmalıdır.

Tarayıcı kapalı çevrim sisteminde  $G_c(s)$  kapalı çevrim kontrolörü ifade etmektedir. Kapalı çevrim kontrolörü, tasarımı verilen çift integratörlü PI ve faz ilerlemeli-gerilemeli olmak üzere iki adet seri bağlanmış kontrolörden oluşmaktadır. Tüm bunlar ele alındığında pozisyon hatası ve kapalı çevrim akımı arasındaki kapalı çevrim kontrolörü Şekil 4.9’da verilmiştir.



Şekil 4.9 : Tarayıcı kontrolörlü kapalı çevrim sistemi.

Şekil 4.9’da  $G_p(s)$  bloğu ise kapalı çevrimi akımı ile pozisyon arasındaki transfer fonksiyonudur. Bu da sayısal analog çevirici kazancı ve sistem modelinden oluşur.

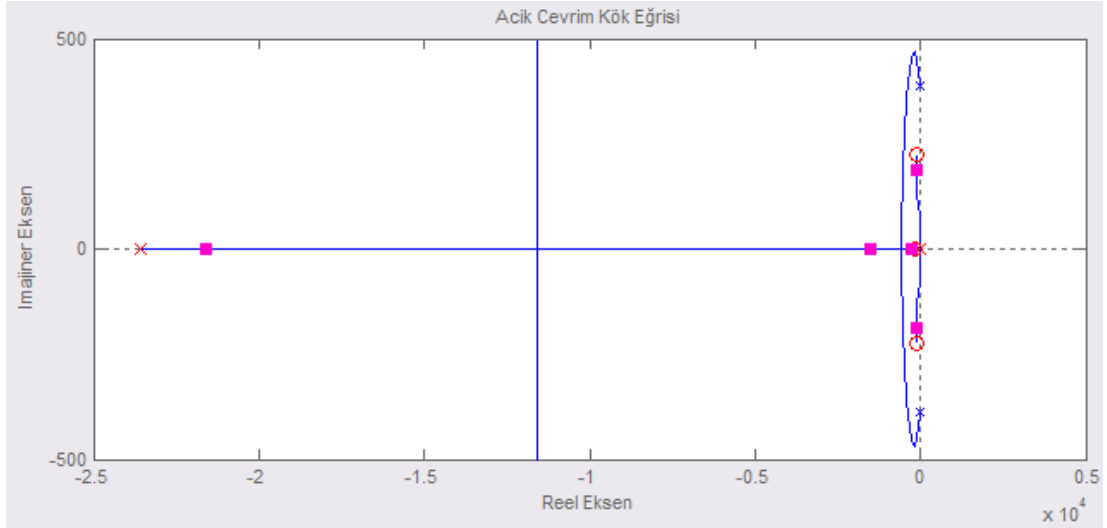


Şekil 4.10 : Tarayıcı sistem modeli.

Kapalı çevrim kontrol sisteminde (Şekil 4.9)  $h(s)$  bloğu çözücü dinamiğini belirtir. Çözücü dinamiği denklem (3-36)’de  $POSERR = -6.83 \cdot 10^3 [\sin(4(\theta - \alpha))]$  olarak bulunmuştur. Pozisyon hatası tarayıcı sisteminde  $\mu$  radyan mertebelerindedir. Çok küçük açılar için açının sinüsü açı değerine eşittir. Simülasyonda kolaylık sağlanması amacıyla bu indirgeme kullanılacaktır. Böylece pozisyon hatası

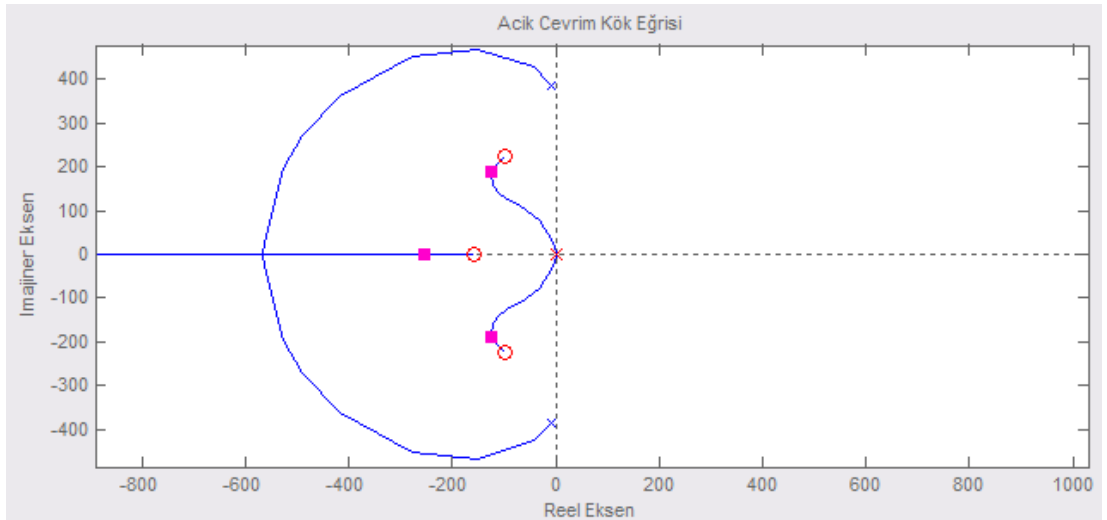
$$e(\theta) = -27320[(\theta - \alpha)] \quad (4-11)$$

olarak elde edilir. Buna göre  $h(s)$  çözücü dinamiği bloğu 27320 şeklinde kullanılabilir. Kontrolör, sistem ve çözücü dinamiği modelleri Matlab Siso Tool® üzerine aktararak kontrol sistem tasarımının analizi yapılmıştır. Tarayıcı kontrolörlü sistemine ait kontrolör kazancına göre çizdirilen kök eğrisi Şekil 4.11’de verilmiştir.



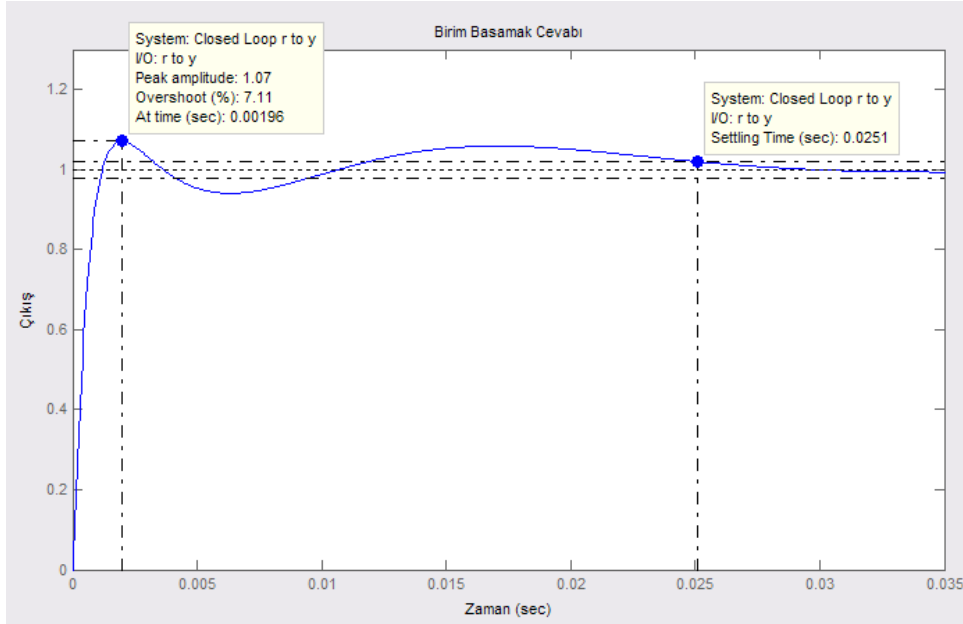
**Şekil 4.11 :** Tarayıcı kontrolörlü sisteme ait kök eğrisi.

Şekil 4.11’de baskın bölgeye odaklanılmış kök eğrisi ise Şekil 4.12’den incelenebilir. Eklenen kontrolör ile sistem dinamiğinde bulunan kompleks eşlenik kutuplar kompanse edilirken kararlılık da sağlanmıştır.



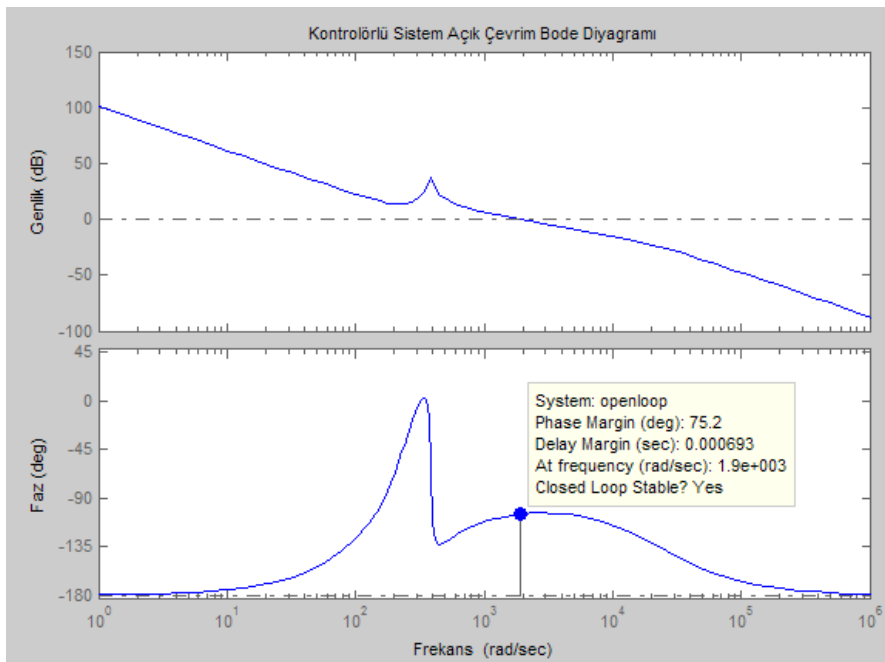
**Şekil 4.12 :** Tarayıcı kontrolörlü sistemi baskın bölge kök eğrisi.

Matlab Siso Tool® ile analizi yapılan bir diğer grafik de tarayıcı sisteminin birim basamak cevabıdır. Şekil 4.13’de verilen birim basamak cevabında sistem aşımı %7 civarında ve %2 bant için yerleşme zamanı 0.025sn civarındadır.



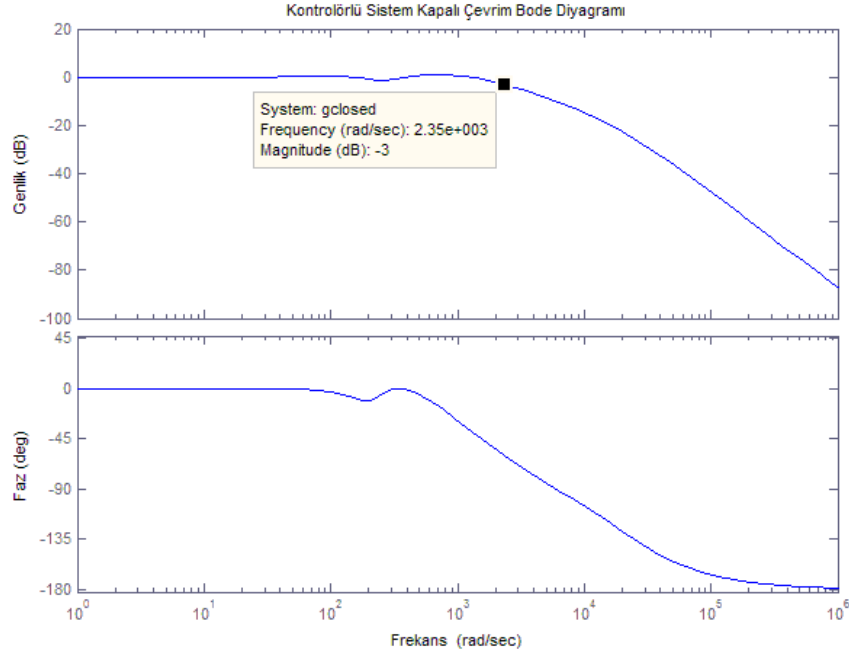
**Şekil 4.13 :** Tarayıcı kontrolörlü sistemi birim basamak cevabı.

Kontrolörlü sistem frekans tanım bölgesi analizi için ilk grafik açık çevrim bode diyagramıdır. Şekil 4.14’de bulunan açık çevrim bode diyagramı incelenirse faz payının  $75^\circ$  olduğu gözlemlenir. Bu hedeflenen kritere ( $70^\circ - 90^\circ$ ) uygundur.



**Şekil 4.14 :** Kontrolörlü sistem açık çevrim bode diyagramı.

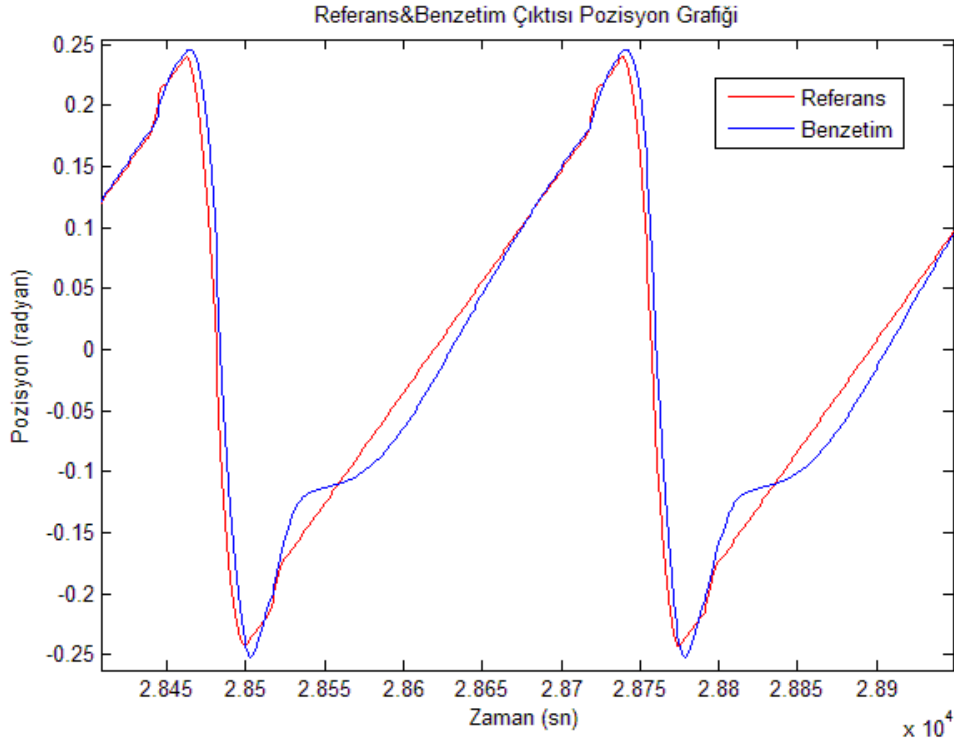
Kontrolörlü sistem frekans tanım bölgesi için bir diğer yararlı analiz de kapalı çevrim bode diyagramıdır. Bant genişliği Şekil 4.15’den 2350 rad/sn (374 Hz) olarak elde edilir. Hedeflenen bant genişliği 375 Hz başarı ile yakalanmıştır.



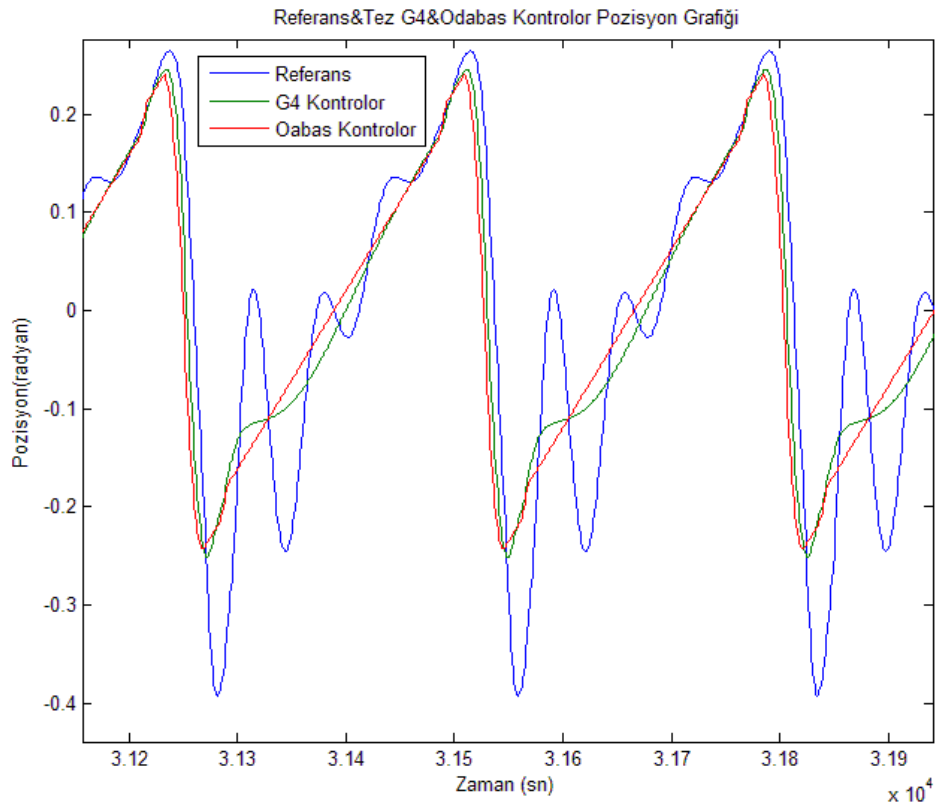
**Şekil 4.15 :** Kontrolörlü sistem kapalı çevrim bode diyagramı.

Zaman tanım bölgesi ve frekans tanım bölgesi analizlerinden sonra tasarlanan tarayıcı kontrol sisteminin tarayıcı referans pozisyonuna karşı tepkisini öngörmek amacıyla Matlab Simulink® aracında Şekil 4.9’da verilen kapalı çevrim kontrol sistemi oluşturulmuştur. Benzetim sonucu Şekil 4.16’da verilmiştir. Tarayıcı kapalı çevrim kontrolörü benzetimde başarılı sonuç vermiştir. Referans pozisyon grafiğinde geçiş bölgeleri ileri besleme ve uyarlamalı akım bileşenleri ile iyileştirilecektir.

Ayrıca kontrolörlü sistem faz ilerlemeli-gerilemeli kontrolör için Odabas V. makalesinde önerilen BG frekansının 1/3 değerinde sıfır ve 3 katı değerinde kutup eklenmiş kontrolör ile çalıştırılmıştır. Referans pozisyon & bu çalışmada önerilen kontrolör ve Odabas’ın makalesinde [6] önerilen kontrolöre ait karşılaştırmalı pozisyon grafiği Şekil 4.17’de verilmiştir. Odabas’ın makalesinde önerilen yapı tarayıcı sistemi için başarılı olamamıştır. Bunun nedeni frekans tanım bölgesinde BG çevresinde iki dekad boyunca yumuşak bir -1 eğimin sağlanamamasıdır.



**Şekil 4.16 :** Tarayıcı referans ve benzetim çıktısı pozisyon grafiği.



**Şekil 4.17 :** Referans & tezde önerilen & Odabas kontrolör pozisyon grafiği.

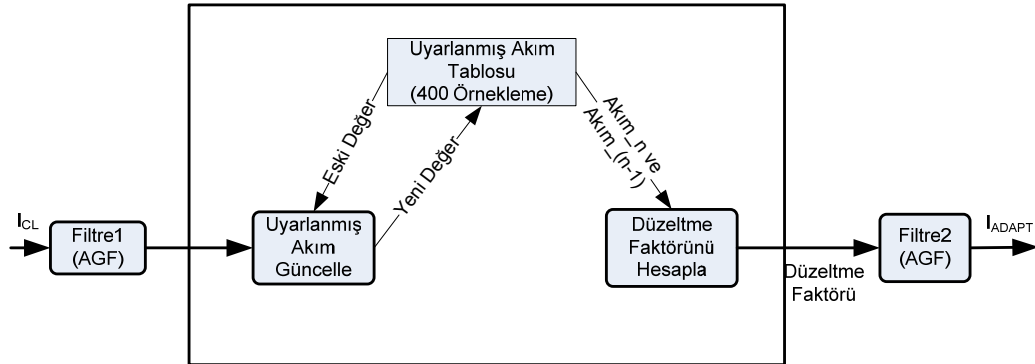
### 4.3 Uyarlamalı Akım Bileşeni Tasarımı

Tarayıcı kontrol sistemi periyodik bir referans giriş işaretini yüksek performansla takip etmeye yönelik tasarlanmaktadır. Sistemin çalışma süresinin artmasıyla ya da çevre koşullarındaki etkilerle sistem parametreleri değişmektedir. Parametrelerde meydana gelecek sabit veya yavaş değişimlere karşı kontrolörün tepkisi hızlandırılmalıdır. Uyarlamalı akım bileşeni bu tip sistem etkilerine karşı tasarlanmıştır.

Referans sinyal girişinin ya da sistem gürültülerinin periyodik olması durumunda periyodik kontrol tasarımı yöntemi geçici davranışta ve sürekli hal çalışmasında oldukça etkilidir [39], [40]. Periyodik kontrol tasarımı iç model kontrol prensibini baz alır. İç model kontrol prensibi, kararlı bir kapalı çevrim sistemde referans işaretleri üreteçleri çevrim içine dâhil edilirse sürekli hal hatası yapmadan giriş işareti takibi yapılabileceğini ifade eder. Örneğin basamak referans işaretli bir sistem tip 1 ise (1/s integratörüne yani basamak üreticine sahip) sürekli hal hatası yapmaz. Buradan yola çıkarak L periyotlu bir referans işarete karşılık  $e^{-Ls}$  biçiminde bir periyodik sinyal üreticinin (gecikme) çevrime dâhil edilmesi referans takibini kolaylaştırır. Çevrim hatasının önceki değerleri kapalı çevrim kontrol sistemine dâhil edilerek öğrenen bir sistem elde edilmeye çalışılır [40].

Ancak periyodik kontrol tasarımı yönteminin salt gecikme olarak uygulanmasının bazı sakıncaları mevcuttur. Yöntem ancak kararlılığı garanti edilmiş bir sistem üzerinde uygulanabilir. Bu amaçla tek başına kullanılamaz. Yöntem çevrim hatasını dolayısıyla bozucuları da çevrime ilave ederek kararsızlığa yola açabilir. Ayrıca yöntemin periyodik olmayan ya da harmonik olmayan işaretlere karşı tepkisi zayıftır. Bu nedenle periyodik kontrol yöntemi uygulanırken bazı iyileştirmeler yapılmalıdır. Periyodik kontrolörün yüksek frekansta meydana çıkan bozululara karşı tepki vermemesi için kontrolör tarayıcı sisteminde hedeflenen bant genişliği çevresinde çalışması sağlanmalıdır. Bu ise alçak geçirgen filtrelere karşılık gelir. Kontrolör girişine koyulacak ön filtre ile yüksek frekanslı işaretlerin süzülmesi gerçekleştirilir. Süzölmüş düşük frekanslı işaretin önceki değerlerini kullanarak kontrol çevrimine ilave edilecek bir akım bileşeni oluşturulur. Bu akım bileşeninin de periyodik kontrolör çıkışında alçak geçirgen filtreden geçirilmesiyle sistem kararlılığını bozmadan tarayıcı kapalı çevrim kontrolörüne bir katkı sağlanır. Bu uyarlama işlemi

tarayıcı sistemi algoritmasında kapalı çevrim akım bileşeni üzerinden yapılmıştır. Uyarlamalı akım bileşenine ait blok diyagram Şekil 4.18’de mevcuttur.



**Şekil 4.18 :** Tarayıcı uyarlamalı akım blok diyagramı.

Tarayıcı kontrol sisteminde uyarlamalı akım bloğunda kullanılacak alçak geçiren filtre 10kHz frekansında çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Filtre transfer fonksiyonu denklem (4-12)’de verilmiştir.

$$OnFiltre(s) = \frac{268 \times 10^{10}}{s^2 + 39 \times 10^5 s + 39 \times 10^7} \quad (4-12)$$

Ön filtrede süzülen kapalı çevrim akım bileşeni “uyarlanmış akım güncelle” bloğunda tabloda tutulan o örneklemeye ait eski uyarlanmış akım değeri ile toplanarak yeni değer olarak tabloya yazılır. İkinci kısımda ise tablodan “n” ve “n-1” örnekleme önceki değerler alınarak bir düzeltme faktörü hesaplanır. “n” değerinin önceden tasarlanması oldukça güçtür. Kontrolör - sistem entegrasyon testleri esnasında denemeler dizisi ile tespit edilir<sup>8</sup>. Hesaplanan bu düzeltme faktörü kapalı çevrim akımındaki ani oynamaları çevrime tekrar ilave etmemek amacıyla son filtreden geçirilir ve uyarlamalı akım bileşeni oluşturulur. Son filtre 10kHz frekansında çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Filtre transfer fonksiyonu denklem (4-13)’de verilmiştir.

$$SonFiltre(s) = \frac{41 \times 10^{10}}{s^2 + 208 \times 10^2 s + 218 \times 10^6} \quad (4-13)$$

<sup>8</sup> Tarayıcı sistemi çalışmalarında en iyi sonuç n =7 değeri için sağlanmıştır.

## 4.4 Yazılım Bileşenlerinin Benzetimi

### 4.4.1 Parametrik Simulink® yazılım blok modeli

Tarayıcı sistemi pozisyon kontrol çevrimi sayısal işlemci ile gerçekleştirilmektedir. Tarayıcı pozisyon kontrol çevrimi Şekil 4.1’de verilmiştir. Tarayıcı parametrik Simulink® modelinde motor çözücüsü ve analog işaret işleme blokları tarafından üretilen pozisyon hatası sayısal işlemcide işlenerek akım komutu oluşturulur ve motora uygulanmak üzere donanım bloğuna aktarılır. Toplam akım komutu ileri besleme akım ( $I_{FF}$ ), kapalı çevrim akım ( $I_{CL}$ ), uyarlamalı akım ( $I_{ADAPT}$ ) birleşimlerinden oluşmaktadır. Oluşturulan tarayıcı simülasyonunda ileri besleme ve kapalı çevrim akım bileşenleri kullanılmıştır.<sup>9</sup>

#### 4.4.1.1 Referans üretici

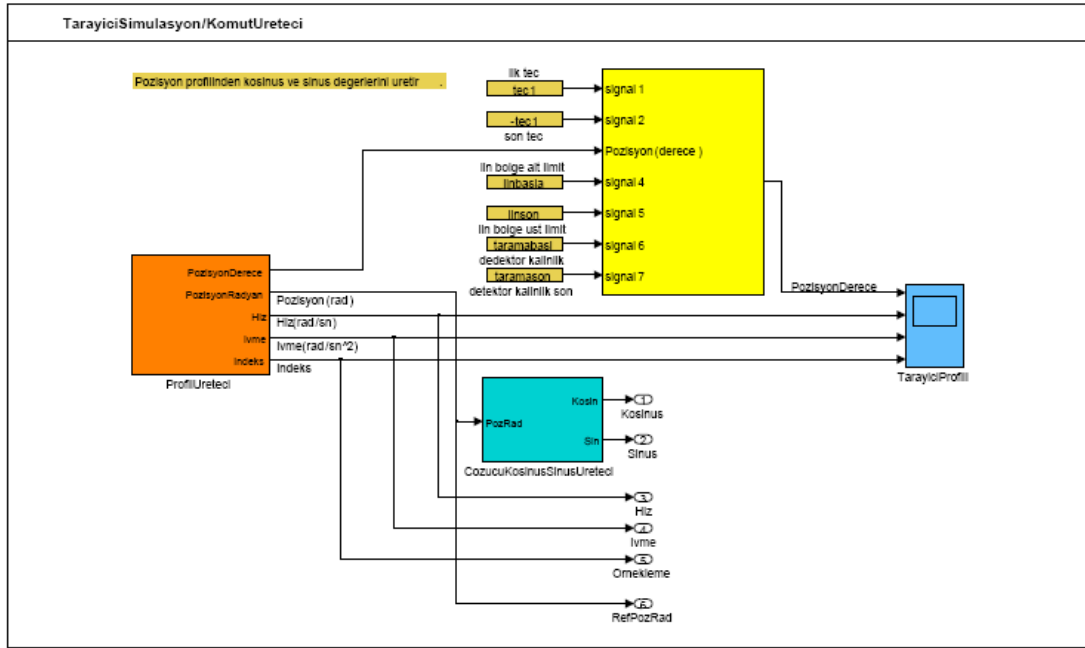
Yazılım bloğundaki ilk model pozisyon profilinden ivme ve hız profillerinin üretimini ve çözücüye uygulanacak sinüs ve kosinüs komutlarını oluşturan “*KomutUretici*” bloğudur.

Tarayıcı sistemi gerçek çalışmasında referans pozisyona ait sinüs ve kosinüs komutları ile ileri besleme akım bileşeni yazılıma eklenen bir tablo ile gerçekleştirilir. Tablo değerleri oluşturulan tarayıcı simülasyonu ile belirlenir. İlk başta *profil\_001.m* Matlab® m-file ile pozisyon profili üretilir. Daha sonra bu pozisyon profili *hiz\_ivme\_profil.mdl* Simulink® modeli ile hız ve ivme profillerine çevrilir. Oluşturulan bu ivme profili “*ProfilUretici*” bloğu içindeki “*IvmeKomutu*” bloğuna karşılık gelmektedir. Profil üretici bloğu Şekil 4.20’de verilmiştir.

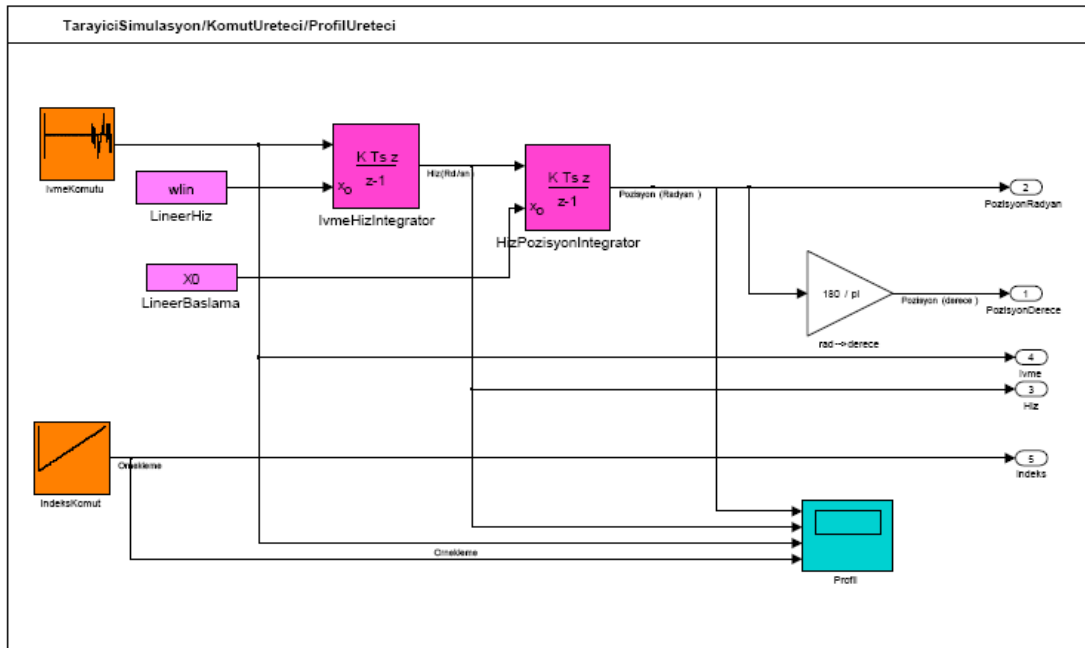
“*Ivme*” çıkışı IFF akım bileşenini oluşturmak amacıyla “*SayisalIslemci*” bloğuna gönderilir. İvme profilinden tekrar elde edilen pozisyon profili sistemdeki gecikmeler uygulanarak sinüs ve kosinüs komutlarını üretilmesi için “*CozucuKosinusSinusUretici*” bloğuna gönderilir. Gerçek çalışmada ise simülasyon tarafından çevrimdışı hesaplanan sinüs ve kosinüs komutları tablo yardımıyla kontrol çevrimine dâhil edilir.

---

<sup>9</sup> Benzetimde uyarlamalı filtreler ihmal edilmiştir. Gerçek çalışmada küçük de olsa bir uyarlamalı bileşenin oluşacağı dikkate alınmalıdır.



Şekil 4.19 : Tarayıcı simülasyonu referans üretici bloğu.



Şekil 4.20 : Tarayıcı simülasyonu profil üretici bloğu.

Gerçek çalışmada sayısal işlemci tarafından 12 bit veri yolundan MDAC(çarpıcı dijital analog çevirici) bloğuna aktarılan değerler:

$$SINREF = \frac{-2^{14} * \sin(4.\varphi)}{3.465} \quad (4-14)$$

$$COSREF = \frac{2^{14} * \cos(4\varphi)}{4} \quad (4-15)$$

şeklindedir.

Referans pozisyon açısına ait bu sinüs ve kosinüs değerleri MDAC bloğunda ~20kHz referans sinüs dalgası ile çarpılarak modüleli sinüs ve kosinüs değerleri oluşturulur.

MDAC çıkışında;

$$SINCMD = -\frac{V_{ref} * \sin(wt) * SINREF}{4096} \quad (4-16)$$

$$COSCMD = \frac{-V_{ref} * \sin(wt) * COSREF}{4096} \quad (4-17)$$

Referans pozisyon sinüs ve kosinüs bilgileri çözücüye uygulanmadan önce sinüs dalgasının işareti değişimini önlemek amacıyla opamplardan kurulu devreden geçirilir. Opampli devre çıkışı, çözücü girişindeki sinüs ve kosinüs komutları:

$$SINOUT = 0.866 * SINCMD \quad (4-18)$$

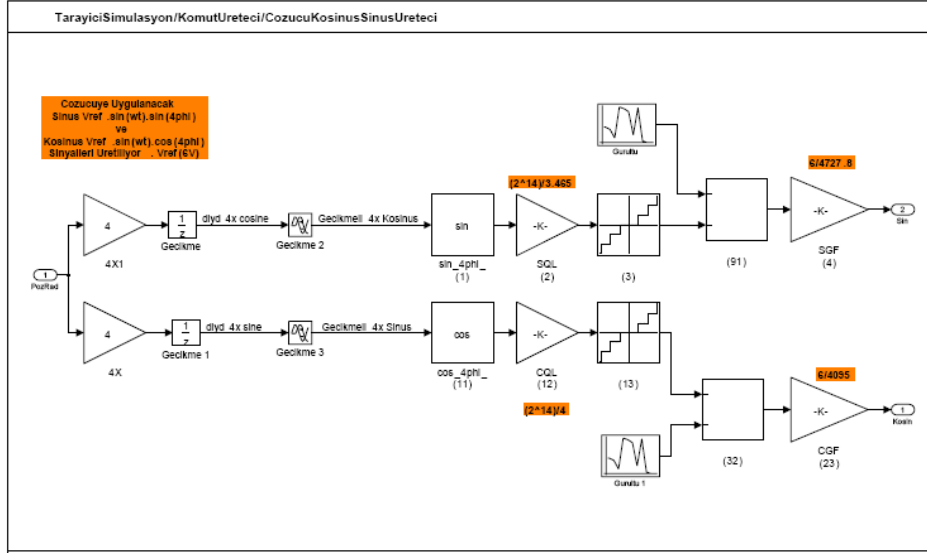
$$COSOUT = -COSCMD \quad (4-19)$$

Sonuç olarak çözücüye uygulanan sinüs ve kosinüs komut bilgileri:

$$SINOUT = \frac{V_{ref} * \sin(wt) * |-2^{14} \sin(4\varphi)|}{4 * 4096} \quad (4-20)$$

$$COSOUT = \frac{V_{ref} * \sin(wt) * 2^{14} \cos(4\varphi)}{4 * 4096} \quad (4-21)$$

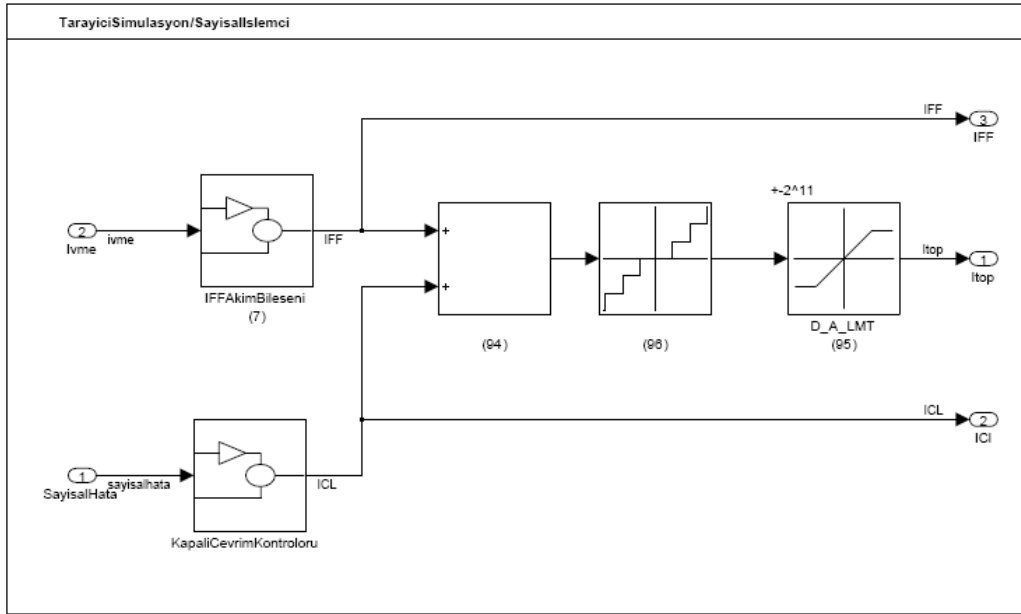
Denklem (4-20) ve (4-21) çözücüye uygulanacak sinüs ve kosinüs komutlarını üretmek amacıyla Şekil 4.21’de verilen “CozucuKosinusSinusUreteci” bloğunda modellenmiştir.



**Şekil 4.21 :** Tarayıcı sistemi çözücü kosinüs ve sinüs komutları üretimi.

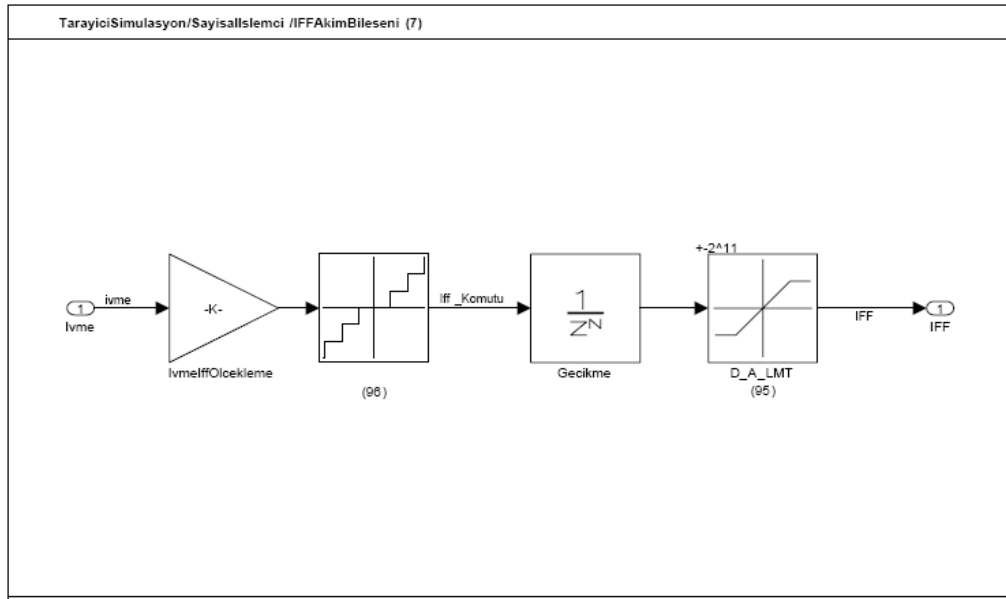
#### 4.4.1.2 İleri besleme akım bileşeni

Tarayıcı sistemi kontrol algoritması simülasyonda “Sayısalİşlemci” bloğu içinde modellenmiştir (bkz. Şekil 4.22). Modelin gerçeğe uyumluluğu açısından 16 bit işlemci ve 32 bit akümülatör kullanıldığı [41] göz önüne alınarak gerekli her bir sayısal işlemci işlemi sonrasında limitlemeler modele dâhil edilmiştir.



**Şekil 4.22 :** Tarayıcı simülasyonu kontrol algoritması bloğu.

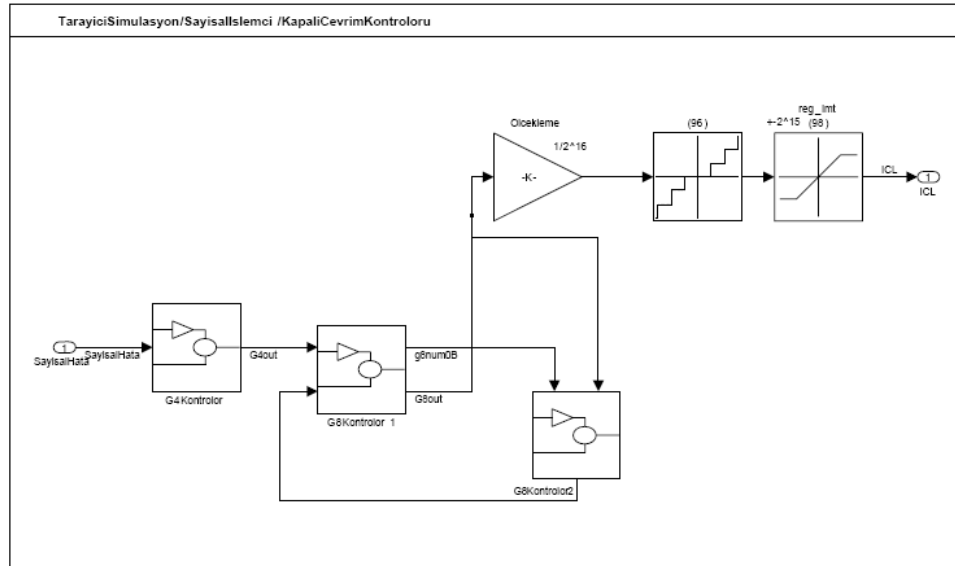
Tasarımı 4.1 İleri Besleme Akım Bileşeni Tasarımı bölümünde verilen ileri besleme akım bileşeninin simülasyona eklenmesi amacıyla “*İFFAkımBileseni*” bloğu modellenmiştir. Bu blok Şekil 4.23’de verilmiştir.



**Şekil 4.23 :** Tarayıcı simülasyonu ileri besleme akım bileşeni modeli.

#### 4.4.1.3 Kapalı çevrim akım bileşeni

Detaylı tasarımı 4.2 Kapalı Çevrim Kontrolörü Tasarımı bölümünde verilen kapalı çevrim akım bileşenin modellenmesi amacıyla Şekil 4.24’de verilen “KapaliCevrimKontroloru” bloğu modellenmiştir.



**Şekil 4.24 :** Tarayıcı simülasyonu kapalı çevrim akım bileşeni modeli.



## 5. DENEYSEL SONUÇLAR

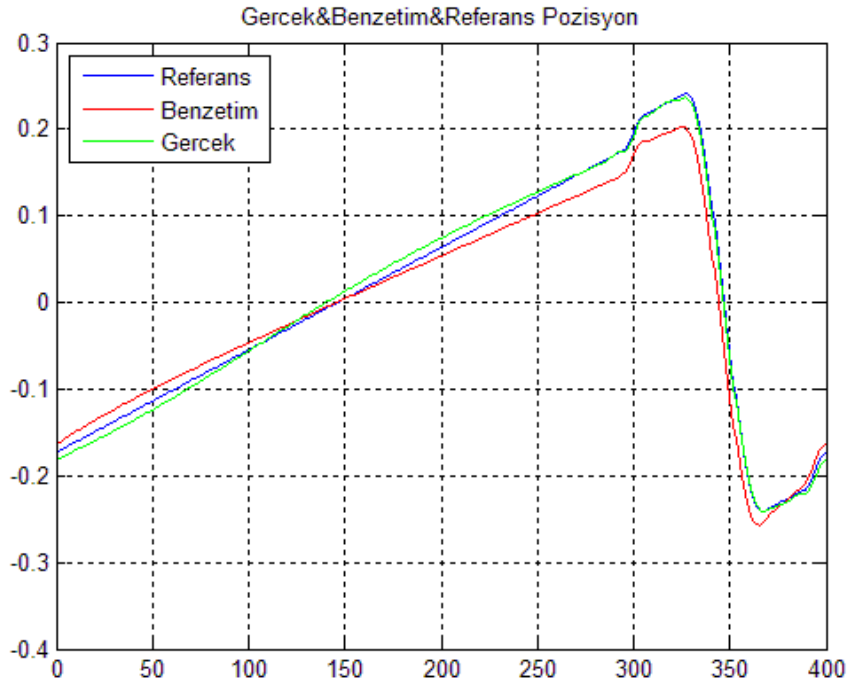
### 5.1 Parametrik Simulink® Modelinin Gerçek Çalışma Verileri ile Doğrulanması

Üçüncü ve dördüncü bölümde detaylandırılan tarayıcı sistem modelinin doğrulanması gerekmektedir. Doğrulama amacıyla tarayıcı sistemi açıklanan donanım, yazılım ve mekanik bileşenlerle çalıştırılmış, çalışan sistemden gerçek zamanlı veri toplanmıştır. Doğrulama amaçlı toplanan veriler pozisyon hatası, ileri besleme - kapalı çevrim - uyarlamalı akım bileşenleridir. Tarayıcı sisteminin geçici hal davranışı çalışma prensibinden dolayı kritik değildir. Geçici halde kritik olan sistemin kararsızlığa gitmemesidir. Görüntünün oluşması için tarayıcı sistemi termal görüntüleme sistemindeki diğer birimleri beklemek durumundadır. Bu süre zarfında tarayıcı kontrolü sağlanmıştır, sistem sürekli halde çalışmaya başlar. Bu nedenle çalışma kapsamında doğrulama amaçlı ilgilenilen kısım sürekli haldeki davranıştır. Veriler sistemden sürekli hal davranışı sergilenen bölümde toplanmıştır. Bu verilere ait benzetim sonuçları ile gerçek veriler karşılaştırılmıştır. Sistemden çalışma başlangıcından belirli süre sonra (sürekli hal çalışmasını sağlamak için) 24 tarama çevrimi boyunca bilgi alınmıştır. Karşılaştırmalarda bu 24 çevrime ait ortalama değerler kullanılmıştır.

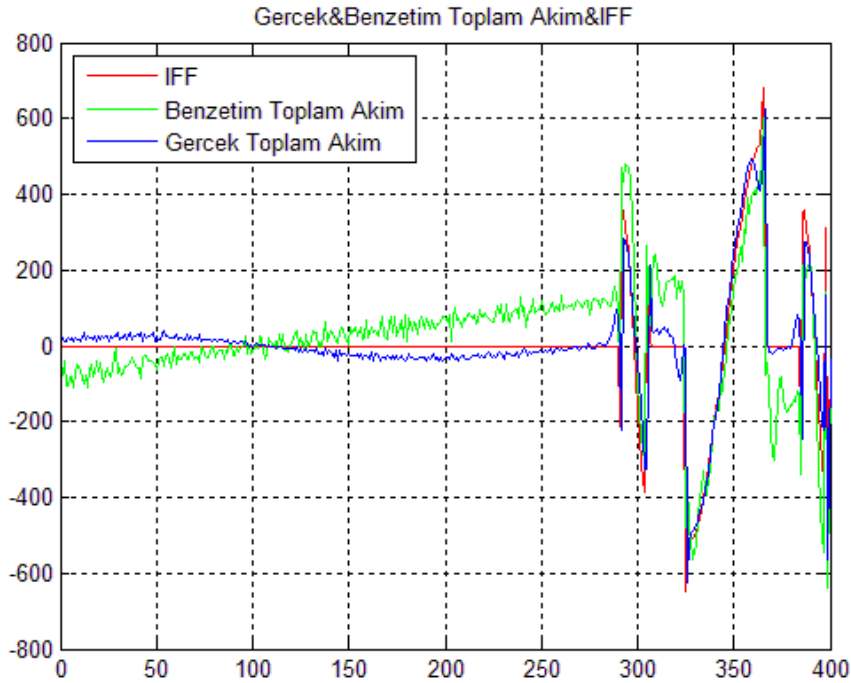
Doğrulama amaçlı ilk karşılaştırma için benzetim ve gerçek çalışmadaki pozisyon bilgileri değerlendirilmiştir. Karşılaştırmanın adil yapılması amacıyla tarayıcı sistemi simülasyonda olduğu gibi sadece ileri besleme ve kapalı çevrim akımları ile çalıştırılmıştır. Uyarlamalı akım çalışmaya dâhil edilmemiştir. Pozisyon hatası karşılaştırma grafiği Şekil 5.1’de verilmiştir. Gerçek ve benzetim çalışmasında ait pozisyon davranışları incelendiğinde simülasyonun kullanılabileceği görülmektedir.

Doğrulama amaçlı karşılaştırılan bir diğer büyüklük de akım bileşenleridir. Akım bileşenleri karşılaştırma grafiği Şekil 5.2’de verilmiştir. Benzetim ve gerçek çalışmaya ait akımlar birbirine genlik ve profil olarak çok yakındır. Bu sonuç da benzetimin başarılı olduğunu göstermektedir. Aynı şekil yardımıyla gerçek çalışmadaki toplam akım ve ileri besleme akımları da karşılaştırılabilir. Birbirine oldukça yakın olan bu iki akım ileri besleme akımının başarılı bir tahminden

geldiğini doğrular. Önceki bölümlerde belirtildiği üzere ileri besleme akımı sadece ivmeye bağlı olarak üretilmiştir.



**Şekil 5.1** : Benzetim&Gerçek Çalışma&Referans pozisyon karşılaştırma.



**Şekil 5.2** : Benzetim&Gerçek Çalışma&Referans pozisyon karşılaştırma.

Sonuç olarak gerçek ve benzetim çalışmasına ait veriler modelin kullanılabilir olduğunu göstermektedir. Tarayıcı sistem modeli özellikle sistem çalışması hakkında

genel bilgi vermede oldukça başarılıdır. Benzetim, sistemde planlanacak değişikliklerin önceden test edilmesini sağlar niteliktedir. Modelin parametrelere bağımlılığı bu parametrelerdeki (örneğin motor moment sabiti) hata olasılıklarına karşı modeli dayanıksız kılmasına karşın her bir parametrenin bağımsız olarak değiştirilebilmesini sağladığından oldukça kullanışlıdır. Sonuç olarak bu çalışma sistemde yapılabilecek değişikliklere karşı mevcut sistemin tepkisini öngörmeye oldukça başarılıdır.

## **5.2 Kontrol Sistem Tasarımı Analizi**

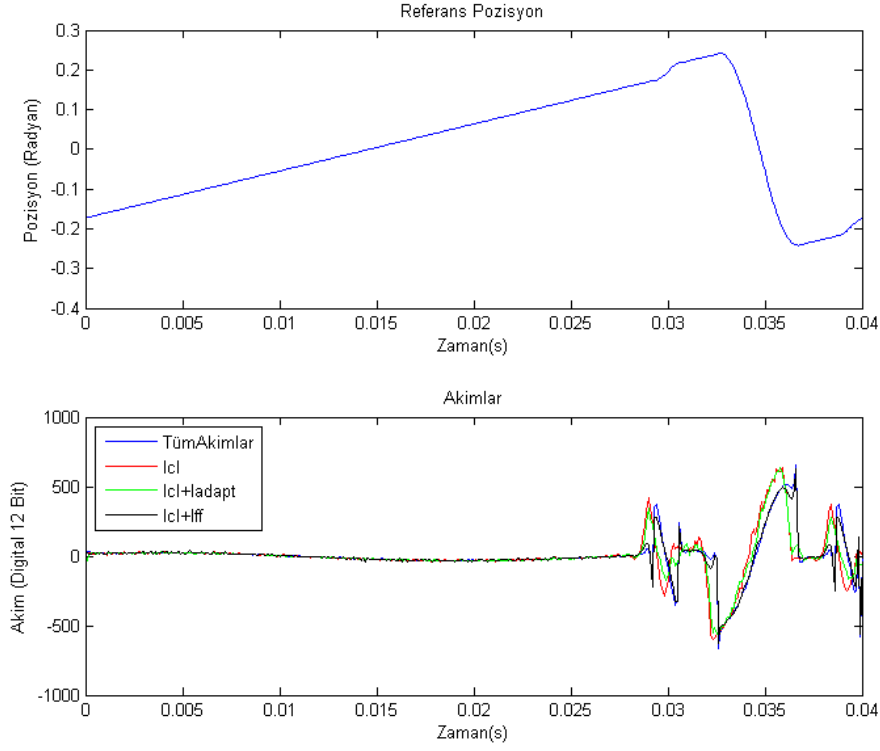
### **5.2.1 Kontrol işareti bileşenlerinin etkisinin analizi**

Kontrol sistem tasarımı analizinde yapılabilecek ilk uygulama kontrol işareti bileşenlerinin gerçek çalışma verisinden izlenerek yorumlanmasıdır. Böylece gerçek çalışmada akım bileşenlerinin bölgesel etkileri belirlenebilecektir. Bu amaçla tarayıcı sistemi tüm akımları içeren, kapalı çevrim ( $I_{CL}$ ) ve uyarlamalı akım ( $I_{ADAPT}$ ) bileşenlerini içeren, kapalı çevrim ve ileri besleme ( $I_{FF}$ ) akımlarını içeren ve sadece kapalı çevrim akımını içeren dört ayrı versiyon ile çalıştırılmıştır. Bu dört ayrı çalışmadan sürekli halde 24 çevrim veri toplanarak ortalaması alınmıştır. Bu dört versiyon çalışmasına ait işlemcide oluşturulan kontrol işareti (sayısal akım miktarı) grafiği Şekil 5.3’ de görülebilir. Şekil 5.3 incelediğinde değişik çalışma senaryolarında motora uygulanan akımın sürekli halde birbirlerine yakın olduğu gözlemlenir. Fakat bu küçük farklar kontrol sistemi açısından önemli farklara yol açabilir. Ayrıca grafikten toplam akım miktarının büyüklük sırasıyla ivmelenme, hızlanma ve pozisyon değişimine karşı üretildiği gözlemlenir<sup>10</sup>. Değişik çalışma senaryolarının performansı için oluşan hata miktarının incelenmesi gerekir.

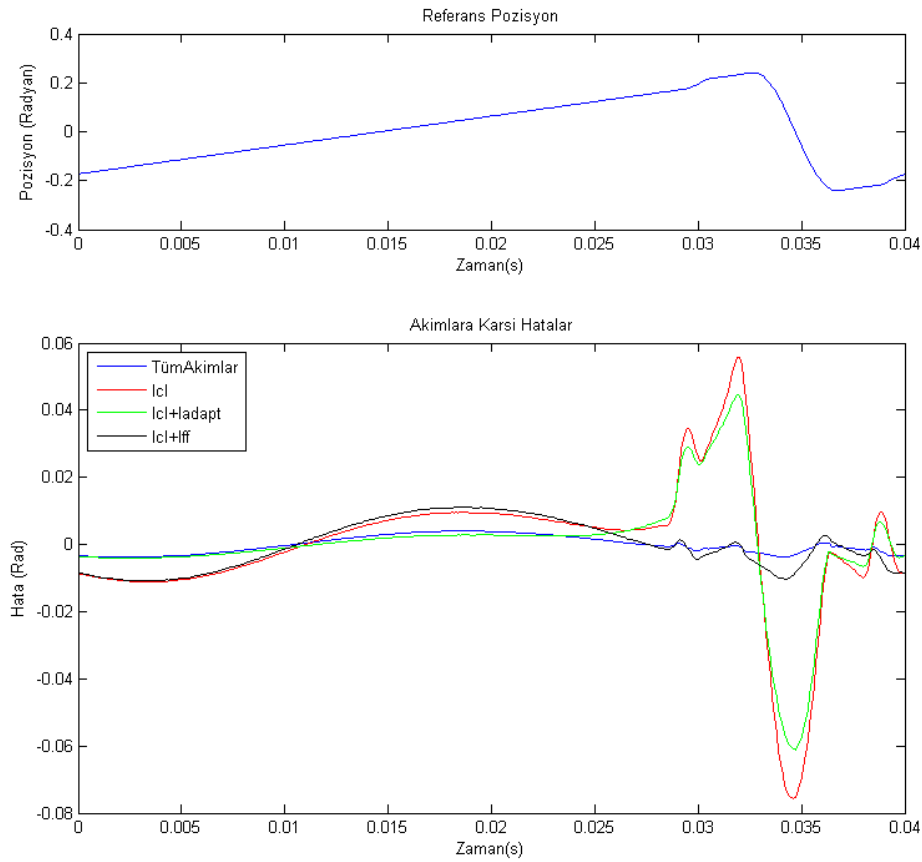
Şekil 5.4 incelediğinde en başarılı durumun tüm akımların dâhil edildiği durumda gerçekleştiği test edilmiş olur. İncelemenin önemli bir bölümü ise kapalı çevrim akım bileşenine ilave edilen uyarlamalı ve ileri besleme akım bileşenlerinin hangi bölgelerde ne kadar etkili olduğunun belirlenmesidir.

---

<sup>10</sup> Akım miktarı en büyük değerini ivmelenmenin en yüksek olduğu geriye dönüş bölgesinde almıştır. Bu bölgeyi hız bileşeninin etkili olduğu tec (thermo electric cooler) geçiş bölgeleri takip etmiştir. Akımın en az olduğu bölge lineer tarama bölgesidir. Bu bölgede ivmelenme yoktur (hız sabit).

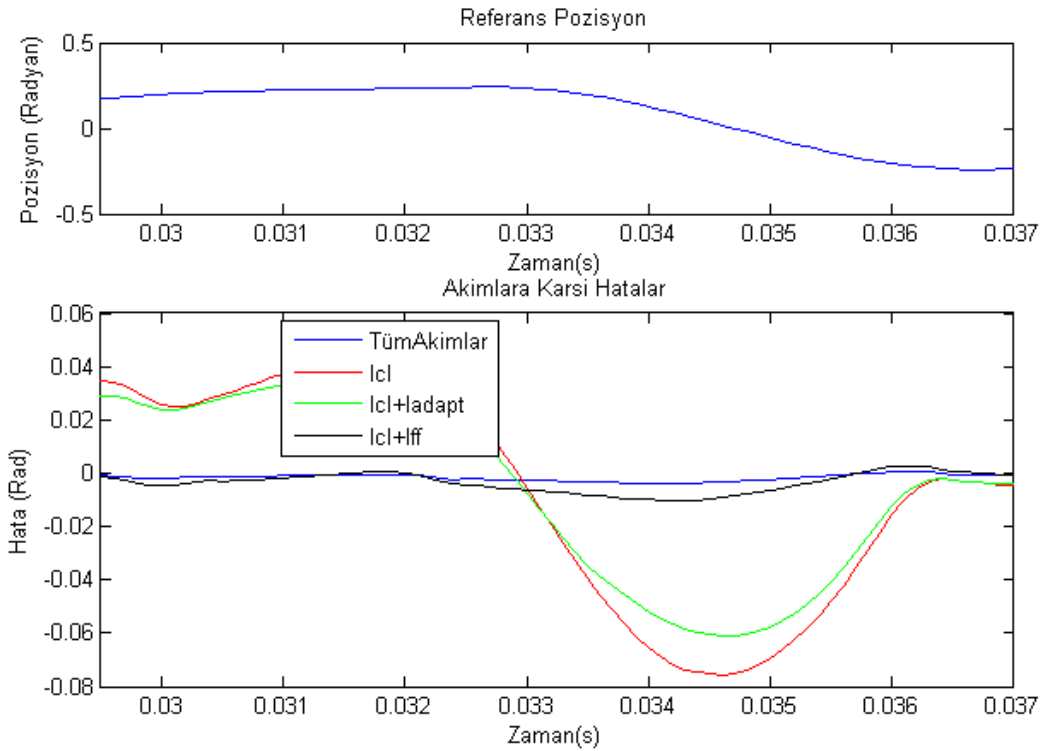


**Şekil 5.3** : Değişik akım bileşenlerinde toplam akım miktarı.



**Şekil 5.4** : Değişik akım bileşeni durumunda toplam hata miktarı.

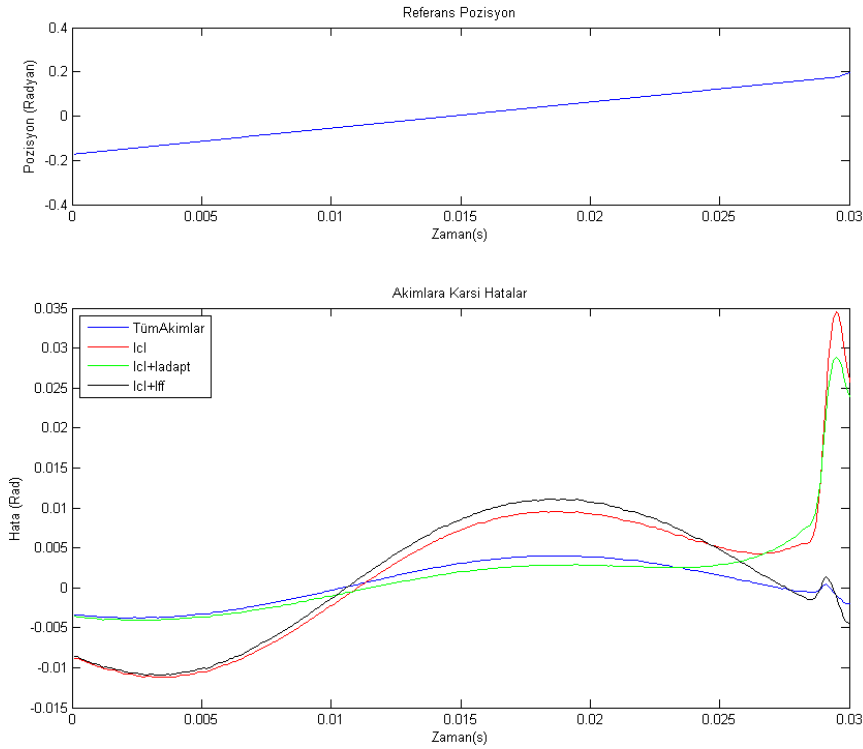
Bölüm 4.1’ de tasarımı anlatılan ileri besleme akım bileşeni yük eylemsizliğine dolayısıyla ivmelenmeye hızlı tepki verebilmek amacıyla tasarlanmıştır. Şekil 5.4’de 0.0327 s ile 0.0366 s arası geriye dönüş bölgesidir. Aynı grafikte 0.0293s ile 0.0306s bölgesi ise TEC geçiş bölgesidir. Bu bölgelerde ivmelenme olduğu için  $I_{FF}$  akımının etkili olması beklenir. Bu bölgeye odaklanmış hata grafiği Şekil 5.5 incelediğinde bu bölgede ileri besleme akım bileşeninin (  $I_{FF}$  ) ivmelenmeye karşı etkisi görülmektedir.  $I_{FF}$  ile beraber çalıştırılan versiyonlar ( $I_{cl}+I_{ff}$  ve  $TumAkımlar$ ) diğer versiyonlara göre bu bölgede üstünlük sağlamıştır.



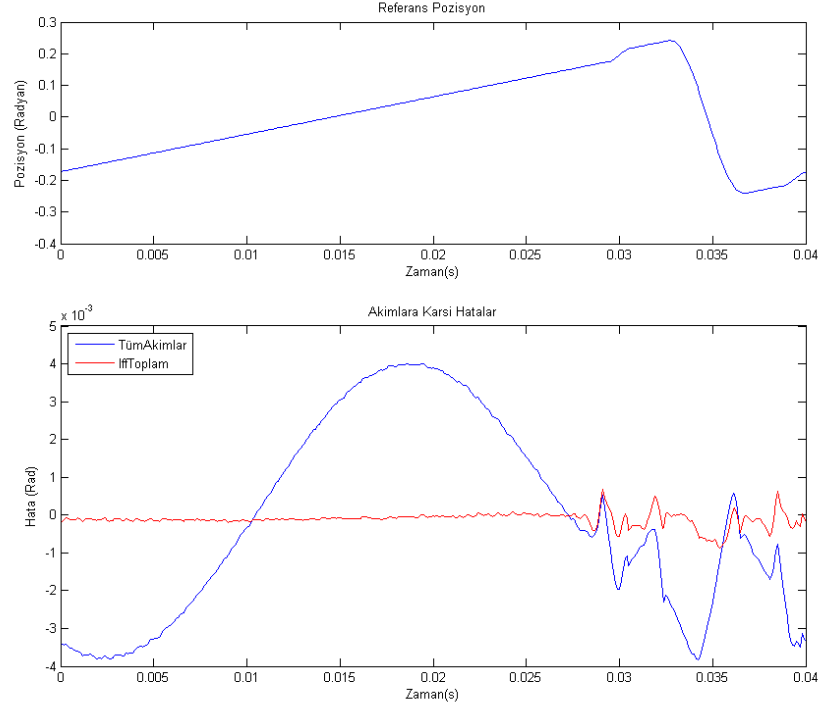
**Şekil 5.5** : TEC ve geriye dönüş bölgesi hata miktarları.

Kapalı çevrim bileşenine yapılan bir diğer ilave de uyarlamalı akım bileşenidir. Bölüm 4.3’de tasarımı verilen uyarlamalı akım bileşeni periyodik referans hareketlerine yönelik tasarlanmıştır. Uyarlamalı akım, lineer bölgede parametre değişiklikleri ve sürtünmeye karşı kontrol sisteminin hızlı tepki vermesini sağlamak amaçlı tasarlanmıştır. Bu amaçla toplanan verilere ait lineer bölgeye odaklı grafik çıktısı Şekil 5.6’da verilmiştir. Şekil 5.6 incelediğinde lineer bölgede uyarlamalı akım bileşeninin (  $I_{ADAPT}$  ) etkisi görülmektedir.  $I_{ADAPT}$  ile beraber çalıştırılan versiyonlar ( $I_{cl}+I_{adapt}$  ve  $TumAkımlar$ ) diğer versiyonlara göre bu bölgede üstünlük sağlamıştır.

Tarayıcı kontrolör performansı için yapılacak bir diğer iyileştirme de toplanan verilerden toplam akım bileşenini çevrimdışı olarak kaydetmek ve sonraki çalışmalarda ileri besleme akım tablosu olarak kontrol çevrimine dâhil etmektir. Bu sayede eylemsizliğe karşı oluşturulan ileri besleme akımının toplam akım bileşeninin tahmin etme başarısı yükselir ve kontrolör performansı artar. Bu deneye ait sonuçlar Şekil 5.7’de verilmiştir. Grafikten görülebildiği üzere çevrimdışı olarak ileri besleme akım bileşeninde yapılan bu iyileştirme kontrolör performansını olumlu yönde etkilemiştir.



**Şekil 5.6** : Lineer bölge hata miktarları.



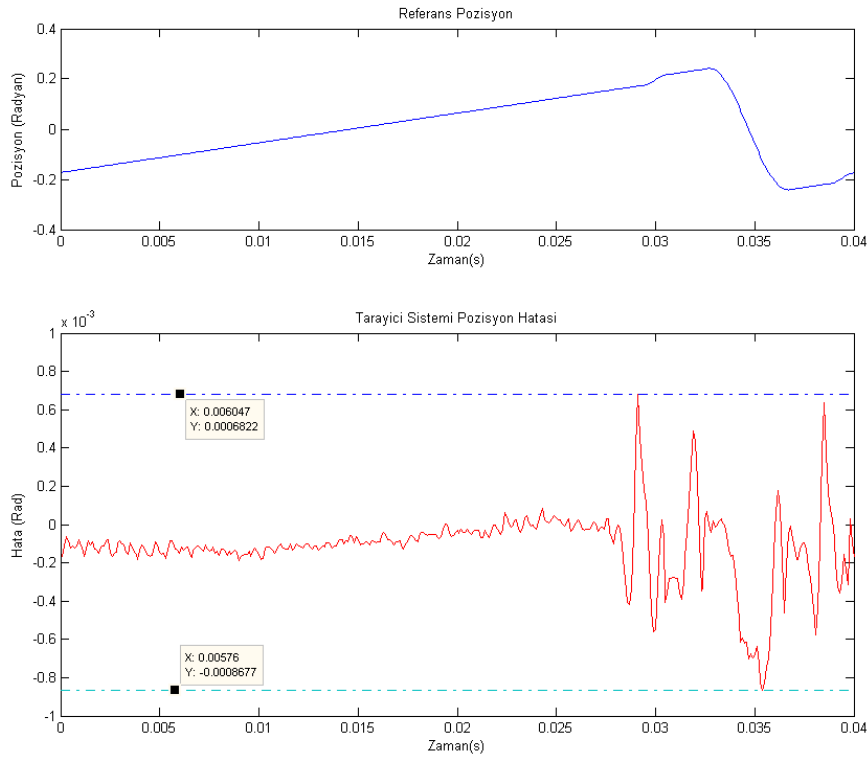
**Şekil 5.7** : Tüm akımlar ve çevrimdışı  $I_{FF}$  iyileştirmesine ait hata miktarları.

### 5.2.2 Kontrol sistem performansı

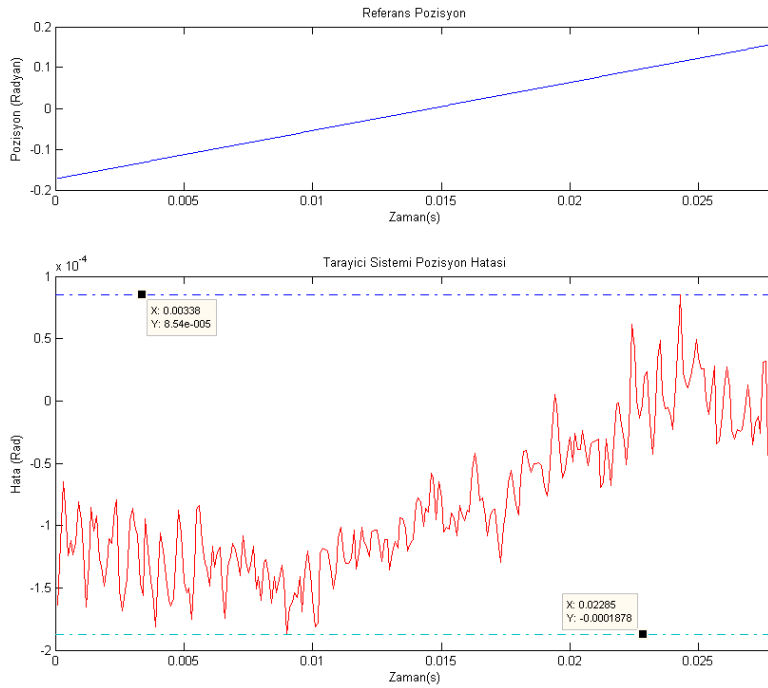
Kontrol sistem tasarımının başarısı elde edilen termal görüntü ile test edilmiştir. İstenen kriterlerde görüntü elde edilmiştir. Gerekli tasarım analizinin yapılması amacıyla sistemden sürekli halde veriler toplanmıştır. Bu veriler sonucunda sürekli halde 24 tarama çevrim verisine ait ortalama hata grafiği Şekil 5.8’de verilmiştir. Şekil 5.8’den gözlemlendiği üzere tarayıcı sistemi maksimum hatasını geriye dönüş bölgesinde yapmıştır. Maksimum hata miktarı 867  $\mu$ radyan olarak elde edilmiştir. Görüntü performansı için önemli olan bölge lineer tarama bölgesidir. Bu bölgeye odaklanılmış hata grafiği Şekil 5.9’da verilmiştir. Lineer bölge pozisyon hatası grafiğinde hata +80  $\mu$ radyan ile -100  $\mu$ radyan arasında değişmektedir. Bu değer 2.2 Kontrol Problemi bölümünde verilen hata kriteri (tepeden tepeye 600  $\mu$ radyan) değeri içindedir.

Kontrol sistem tasarımında kontrol işareti analizinin de yapılması gerekmektedir. Tarayıcı sisteminde kontrol işareti motora uygulanan akımdır. Bu amaçla sayısal işlemcide sürekli halde 24 çevrim akım bileşenleri  $I_{FF}$ ,  $I_{CL}$ ,  $I_{ADAPT}$  toplanarak çevrimdışı değerlendirme yapılmıştır. Şekil 5.10 akım bileşenleri grafiği incelenirse kontrol işaretinin limit değerlerinin oldukça altında kaldığı gözlenir. Maksimum

akım miktarı sayısal 12 bit olarak 800 civarındadır. Bu donanımsal olarak 1.95V mertebesindedir. Tarayıcı sistemi maksimum 5V akım değeri üretebilmektedir.

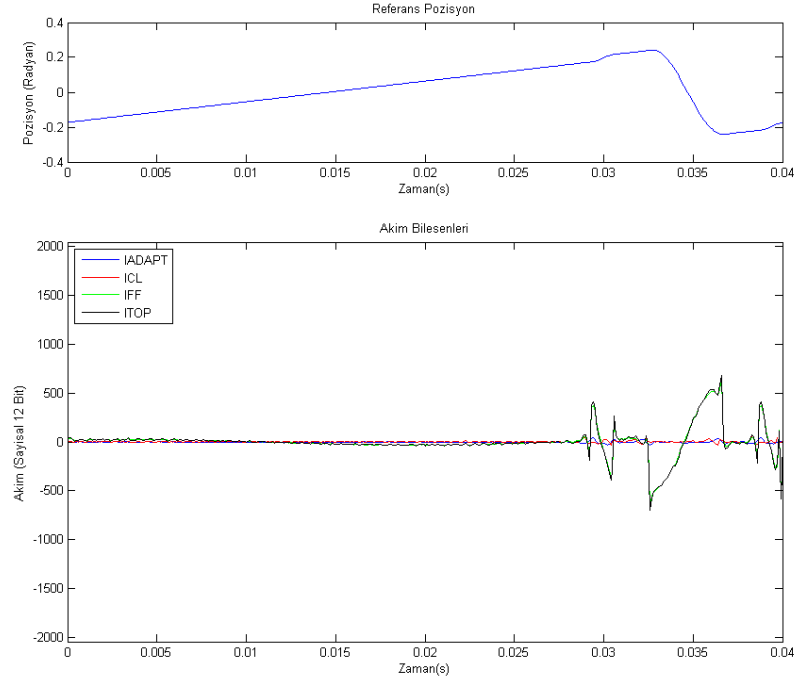


**Şekil 5.8 : Tarayıcı sistemi pozisyon hatası grafiği.**

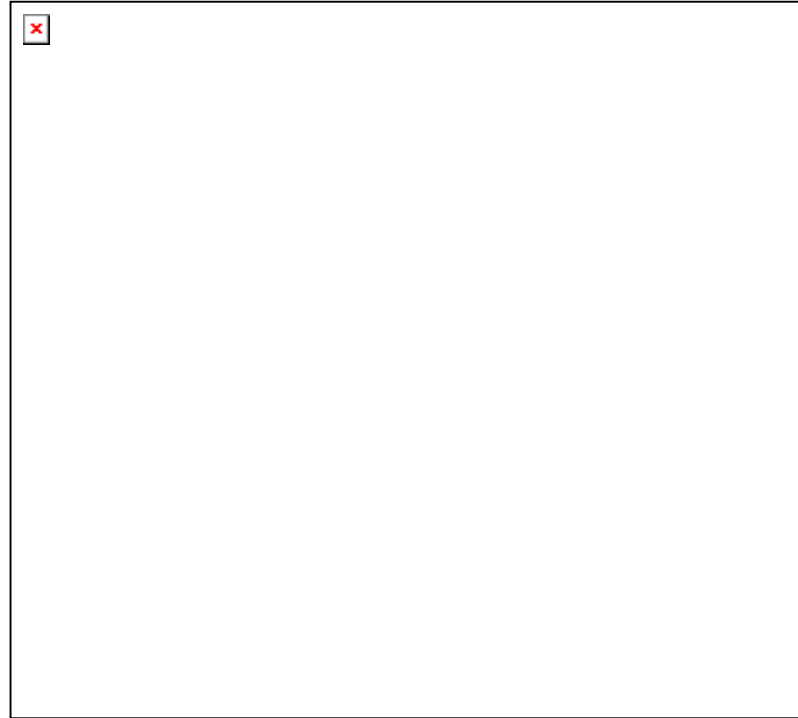


**Şekil 5.9 : Tarayıcı sistemi lineer bölge pozisyon hatası grafiği.**

Akım bileşenlerine ait bir diğer gözlem de ileri besleme akım bileşeninin toplam akımı tahmin etmedeki başarısıdır. Böylece kontrolör performansı artırılmıştır. Şekil 5.11’de ileri besleme ve toplam akım bileşenlerinin karşılaştırmalı grafiği verilmiştir.



**Şekil 5.10 :** Tarayıcı sistemi akım bileşenleri grafiği.



**Şekil 5.11 :** Tarayıcı sistemi ileri besleme ve toplam akım grafiği.



## 6. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında termal görüntüleme birimlerinde kullanılan bir tarayıcı sisteminin modellenmesi ve kontrolü detaylı olarak verilmiştir. Tarayıcı sistemi yüksek performans gerektiren bir pozisyon takip sistemidir. Literatür araştırması sonucunda tarayıcı sisteminin ikinci dereceden bir motor - yük sistemi olarak indirgenebileceği öngörülmüş ve sistem tanıma süreçleri ile sistem modeli elde edilmiştir.

Kontrol sistem tasarımı başlangıç noktası olarak literatürde tarayıcı sistemi kontrolü ile ilgili mevcut olan çalışma ele alınmıştır. İlgili makalede frekans tanım bölgesi tasarımı ile bant genişliği ve faz payı kriterleri hedef alınarak tasarım yapılmıştır. Kapalı çevrim kontrolörü makalede önerilen yapı temel alınmış, eğri uydurma yöntemi ile desteklenerek geliştirilmiştir. Eğri uydurma yöntemi ile kapalı çevrim sistemin frekans bölgesi davranışı istenen şekle uydurulur. Eğri uydurma tarayıcı sistemine eklenecek sistem dinamiğinin belirlenmesi ile başlar. Kapalı çevrim kontrolöründe referans işaretinde bulunan rampa giriş işareti bölgeleri için tasarlanan çift integratörlü PI ile gerekli sistem dinamiği eklenmiş olur. Tasarımda ikinci adım ise frekans tanım bölgesi eğri uydurması için eklenmesi gereken faz ilerlemeli-gerilemeli kontrolör parametrelerinin hesap edilmesidir.

Gereken takip performansının sağlanması amacıyla makalede önerilen iki seri kontrolörlü yapı üzerine kapalı çevrim kontrolörüne katkıda bulunacak ileri besleme ve uyarlamalı akım bileşenlerinin kullanımı öngörülmüştür. Referans pozisyon grafiğinin farklı bölgeleri için tasarlanan bu iki akım bileşeni ile ayna pozisyonunun referans işareti takip etme başarısı dolayısıyla görüntü performansı artırılmıştır.

İleri besleme akımı ile parametrik değeri çalışma öncesi bilinen motor ve yük eylemsizliklerine karşı kapalı çevrim kontrolörüne katkıda bulunmak amaçlanmıştır. Bu sayede yüksek ivmelenme içeren referans bölgeleri olan geriye dönüş ve TEC geçiş bölgelerinde hata miktarı azalmıştır.

Uyarlamalı akım bileşeni lineer tarama bölgesi iyileştirilmesi için eklenmiştir. Literatür araştırması sonucu periyodik referans işareti içeren sistemler için öngörülen

kontrol yöntemi tarayıcı sistemine uygulanmıştır. Sıcaklık, sürtünme ve çalışma bölgesi farklılıklarından kaynaklanan nonlineer davranışlar; sistem modeli parametrelerindeki (sönümleme, burulma sabiti vb.) değişimlere ve öngörülme-yen sistem parametrelerinin etkili olmasına karşılık gelmektedir. Bu değişimler sisteme anlık bozucu olarak yansıyabileceği gibi tüm çalışma boyunca da etkili olabilir. İlgili yöntem ile sürekli çalışma sırasında oluşan bu parametre değişikliklerine karşı tepki hızlandırılması sağlanmıştır. Anlık bozucuların sisteme etkisini engellemek amacıyla uyarlamalı kontrol tasarımı alçak geçirgen filtre yapısıyla desteklenmiştir. Tarama çevriminde oluşan kapalı çevrim bileşenleri filtre ve ölçekleme yapısından geçirilerek çevrimiçi olarak uyarlamalı akım tablosuna kaydedilmiş ve sonraki tarama çevrimleri için kontrol işareti tepkisinin hızlandırılması amacıyla sisteme ilave edilmiştir.

Kontrol sistem tasarımı performansı üretilen termal görüntüleme birimi üzerinde test edilmiştir. Termal görüntü performansı istenilen başarıyı yakalamıştır. Ayrıca kontrol sisteminin detaylı analizi için sistemden sürekli halde veri toplanmış ve değerlendirilmiştir. Değerlendirme sonucunda kontrol sisteminin kontrol işareti limit değerlerini zorlamadan hedeflenen pozisyon hatası kriterini sağladığı tespit edilmiştir.

## KAYNAKLAR

- [1] **Düzgün, M. B.** , *Mechatronic Design of a Scanner and Interlacer For Thermal Imaging System*, M.Sc. Thesis, The Middle East Technical University, The Department of Electrical and Electronics Engineering, Eylül 2000
- [2] **Tajime, T., Saheki, T., Kondo, M., Ito, K.**, “Serial scan thermal imaging system”, *Proceedings of the Modern Utilization of Infrared Technology IV Seminar* , Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, California, s: 241-245, 1978
- [3] **Yamashita, J., Takei, T., Takahashi, S., Kondo, M., Tajemi, T., Saheki, T.**, “Serial scan thermal imaging system adapted to midrange vehicle size target”, *Proceedings of Electro-optical technology for autonomous vehicles Seminar* , Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, California, s: 58-65, February 1980
- [4] **Karlsson, L.**, “A new type of infrared scanning system”, *Optical components and systems*, Proceedings of the Meeting, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers Netherlands, s: 72-76, April 1987
- [5] **Oliver, T., Anders, L.**, “Computer Control for a galvanometer scanner”, *Optical Engineering Vol. 33 No.11* , s: 3774-3780, November 1994
- [6] **Odabas, V.G. , Moulds, C.**, “An Integrated DSP-Based Architecture for FLIR Optical Scanning Mirror Calibration and Control”, *IEEE Transactions On Control Systems Technology, Vol.2, No.4*, s: 299 – 311, December 1994
- [7] **Gadhok, J. S.**, “Achieving high duty cycle sawtooth scanning with galvanometric scanners” , *Proceedings of SPIE Vol.3787*, s: 173-180, 1999
- [8] **Montagu, J.**, “Update of Scanner Selection, Performances and Multi-Axis Configurations” , *SPIE Vol. 1454 Beam Deflection and Scanning Technologies*, s: 160 - 172, 1991
- [9] **Montagu, J.**, “Galvanometric and Resonant Low-Inertia Scanners”, *Optical Scanning*, Marshall G. F. , Ed, s : 525-613, Marcel Dekker, New York, 1991
- [10] **Brosens, P. J.**, “Scanning speed and accuracy of moving magnet optical scanners”, *Optical Engineering Vol. 34 No.1* , s: 200 – 206, January 1995
- [11] **Şensoy, B. ,** “Türkiye’de Termal Görüntüleme Teknolojisi”, *SAVTEK 2002 Savunma Teknolojileri Kongresi Bildiriler Kitabı*, Cilt: 1, s: 371-379, 2002

- [12] Url-1, <[http://tr.wikipedia.org/wiki/Elektromanyetik\\_tayf](http://tr.wikipedia.org/wiki/Elektromanyetik_tayf)>, alındığı tarih 07.03.2009.
- [13] Atchison, D. A., Smith, G., *Optics of the Human Eye*, Somerset : Elsevier Health Sciences , 2000, s: 99-100
- [14] Lloyd, J. M. , *Thermal Imaging Systems*, Edition 3, New York : Springer , 1975
- [15] Bisbee, T. L., Pritchard, D. A. , “Today's Thermal Imaging Systems: Background and Applications for Civilian Law Enforcement and Military Force Protection”, *Proceedings of the 31<sup>st</sup> Security Technology The Institute of Electrical and Electronics Engineers International Carnahan Conference*, s: 202 – 208, 1997
- [16] Arslan, O. , *Kızılötesi Dalga Teknolojileri*, <<http://www.eee.deu.edu.tr/~erdas/sunum/20082009/kizilotesi.ppt>>, alındığı tarih 07.03.2009.
- [17] Bukys, A., “Considerations in the design of servo amplifiers for high performance scanning systems” , *SPIE Vol. 1454 Beam Deflection and Scanning Technologies*, s: 186 - 194, 1991
- [18] Kalkan, M., “Tarayıcı Sisteminin Simulink Modelinin Elde Edilmesi”, *TOK 08 Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı*, İTÜ, İstanbul, 2008
- [19] Tumer, I.Y., Wood, K.L., Busch, I.J., Mechanical Engineering Department, The University of Texas at Austin, “*Modeling of Dynamic Effects Caused by the Beam Delivery System in Selective Laser Sintering*”, Solid Freeform Fabrication Symposium, s: 353-361, Austin, Texas, Ağustos 1995
- [20] Kuo, B. C., “*Automatic Control Systems*”, Wiley , 7. Edition, 1995
- [21] Texas Instruments, “*Scanner Motor Specification*”, 1994
- [22] Agilent Technologies, “*35670A Dynamic Signal Analyzer Operator’s Guide*”, 2000
- [23] Semerci, E.A., Ateşoğlu, Ö., MGEO-TR-05-0004, ASELSAN A.Ş, MGEO Grubu, “*System Identification Studies using Dynamic Signal Analyzer, Matlab ® System Identification Toolbox and µ Analysis Toolbox on a Third Order RC Circuit*”, 2005
- [24] Ogata, K., “*Modern Control Engineering*”, s:475:484, Prentice Hall , 3. Edition, 1997.
- [25] Apex, “*Pulse Width Modulation Amplifiers SA07*” Datasheet, 1998
- [26] Ozbay, H., “*Introduction to Feedback Control Theory*”, s: 139:152, CRC Press, 2000
- [27] Olsson , H., Aström, K. J., Canudas de Wit, C., Gafvert , Lischinsky, M., P., “Friction Models and Friction Compensation”, *European Journal of Control*, Vol.4 -No.3 , s: 176-195, 1998.
- [28] Liang, L., Venugopal, S., “*Analysis and Simulation of Coulomb Friction*” Department of Mechanical Engineering, University of Texas, 2003

- [29] Canudas de Wit , Olsson , C., H., Aström , K. J., Lischinsky , P., “A New Model for Control Systems with Friction”, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol.40 -No.3 , s: 419 - 425, Mart 1995
- [30] Axsys Technologies, Inc. ”Pancake Resolvers Handbook”, [http://www.axsys.com/pdfdownloads/resolver\\_catalog.pdf](http://www.axsys.com/pdfdownloads/resolver_catalog.pdf), 2008
- [31] Baldor® Motors and Drives, Baldor Electric Company, “Servo Control Facts, A Handbook Explaining the Basics of Motion”, [www.baldor.com/pdf/manuals/1205-394.pdf](http://www.baldor.com/pdf/manuals/1205-394.pdf), 1998
- [32] Robinson, D. T., Advanced Motion Technology, Admotec Inc. , “Understanding Resolvers and Resolver-to-Digital Conversion”, <http://www.admotec.com/TT02.pdf>, 2000
- [33] Crowder, R., IAM Research Group, University of Southampton, “Electric Drives and Electromechanical Systems”, s:107-135, NEWNES Press, 2005
- [34] Ellis, G., Danaher Motion Systems, Radford, “Control System Design Guide, A Practical Guide”, Third Edition, s:275-301, Academic Press, 2004
- [35] Zimmerman, R., Control Sciences, Inc.,” Resolvers as Velocity and Position Encoding Devices”, [http://www.controlsciences.com/resolver\\_application\\_data.shtml](http://www.controlsciences.com/resolver_application_data.shtml) , 2008
- [36] Texas Instruments, “Scanner Motor Specification”, 1994
- [37] Sarma, S., Agrawal, V.K., Udupa, S., Parameswaran, K., ISRO Satellite Centre, Control System Group, Bangalore, India, “Instantaneous angular position and speed measurement using a DSP based resolver-to-digital converter”, *Measurement*, Volume 41, Issue 7, s: 788-796, Ağustos 2008
- [38] Sarma, S., Agrawal, V. K., Udupa, S., “Software-Based Resolver-to-Digital Conversion Using a DSP”, *Ieee Transactions On Industrial Electronics*, VOL. 55, NO. 1, s:371-379, Ocak 2008
- [39] Inoue, T., “Practical Repetitive Control System Design”, s: 1673:1678, *Proceedings of the 29th Conference on Decision and Control*, Honolulu, December 1990
- [40] Hara, S., Yamamoto, Y., Omata, T., Nakano, M. “Repetitive Control System: A New Type Servo System for Periodic Exogenous Signals”, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol.33 -No.7 , s: 659:668, July 1988
- [41] Texas Instruments, “TMS320C20x User’s Guide SPRU127C”, 1998



## **EKLER**

### **EK A.1 : Tarayıcı Simulink® Modeli Dosyaları**

## EK A.1

### tarayici.m

```
clear all;clc;close all;
%Pozisyon Profili Olustur.
profil_001
%Ivme-->Iff Olcekleme Hesapla.
ivme_iff_olcekle
%Donanim ve Kontrolor Parametreleri.
parametreler
%Simulasyonlari Baslat.
sim('hiz_ivme_profil')
sim('TarayiciSimulasyon')
%Tarayici Tablo Olustur.
tarayici_tablo
save taks.mat
```

### profil\_001.m

```
%Tarayici Pozisyon Profili
ts          = 100e-6;          %sn
nos          = 400;            %25Hz/10kHz(ts)
wlin         = 11.828195;      %rad/s
linbasla     = -9.835069;      %lineer bolge
baslangic - derece
taramabasi   = -12.5;          %tarama baslama
acisi
tec1          = -13.85;        %tec acisi - derece

%Tarama profili / x-->rad
X0           = (linbasla * pi) / 180;
X293         = X0 + (wlin * ts * (293 - 1)); %lineer bolge son
X307         = (12.5 * pi) / 180;          %tarama sonu
Xpp1         = (X307 - X293);
Xmid1        = X293 + (0.5 * Xpp1);
freq1        = 1 / (28 * ts);              %(kosinus frekansi
307-293)*2 357Hz
X327         = X307 + (wlin * ts * 20);    %tec2 sonu
X367         = -1 * X327;                  %tec1 basi
freq2        = 1 / (80 * ts);              %(kosinus frekansi
367-327)*2 125Hz
X387         = -1 * X307;                  %tec1 sonu

linson       = X293*180/pi;
taramason    = X307*180/pi;

pozisyon     = zeros(1,nos);
indekskomut  = zeros(1,nos);

% Bolgesel Gecisler
for indeks = 1:1:400
```

```

%lineer bolge
if ((indeks >= 1) && (indeks <= 292))
    pozisyon(indeks) = X0 + (wlin * ts * (indeks-1));
    %tarama sonu
elseif ((indeks >= 293) && (indeks <= 306))
    pozisyon(indeks) = Xmid1 - (0.5 * Xpp1 * cos(2 * pi * freq1
* ts * (indeks-293)));
    %tec2
elseif ((indeks >= 307) && (indeks <= 326))
    pozisyon(indeks) = X307 + (wlin * ts * (indeks-307));
    %geriye donus
elseif ((indeks >= 327) && (indeks <= 366))
    pozisyon(indeks) = X327 * cos(2 * pi * freq2 * ts * (indeks-
327));
    %tec1
elseif ((indeks >= 367) && (indeks <= 386))
    pozisyon(indeks) = X367 + (wlin * ts * (indeks-367));
    %tarama basi
else
    pozisyon(indeks) = -Xmid1 - (0.5 * Xpp1 * cos(2 * pi * freq1
* ts * (indeks-387)));
end;
indekskomut(indeks) = indeks;
end;

orneklemezamani = ts:ts:(nos)*ts;
plot(orneklemezamani,pozisyon)
grid on
title(['Tarayici Referansi wlin= ',num2str(wlin),' rad/s, ',
'linbolge= ',num2str(linbasla),'-',num2str(linbasla),'',tec1=
',num2str(tec1)])

```

### ivme\_iff\_olcekle.m

```

%Ivme IFF arasi olcekleme degeri hesapla
%SI Birim Sistemi
Jyuk          = 7.16295588672e-008;    %kg-m^2
% Jyuk        = 0.1525e-006;         %kg-m^2 BuyukAyna
Jmotor        = 8.33263136e-008;      %kg-m^2
J              = Jyuk + Jmotor;
kt            = 0.0148292592;          %Nm/amp Motor Tork
Sabiti
ksur          = 1.2;                   %amp/volt      6A/5V
ksac          = 0.00244;               %5V/2^12
ozin2NM       = 0.00706155;

%B            = 0.00038*ozin2NM;       %Nm/(rad/sn)
//Simulink Modelinden Alinan
k             = 0.625*ozin2NM;          %Nm/(rad)      //Simulink
Modelinden Alinan
B            = 2.38e-006;               %Nm/(rad/sn)
//DinamikAnalizor
% k          = 0.02308;                 %Nm/(rad)
//DinamikAnalizor

ivme_iff_faktoru = J/(ksur*kt*ksac);
J_1=1/J;

```

## parametreler.m

```
%Diger Parametreler
Vref = 6; %6V (Tasiyici Dalga
Tepe Degeri)
TrRatio = 0.64; %Cozucu
Transformator Orani
RefKosinusKazanc = 4095;
RefSinusKazanc = 4727.8;
kyuk = 10;
BGF = tf(16427.4,[1 19792]);
MotorL = 1.83e-003; %MotorInduktansi (H)
MotorR = 5; %MotorDirenci (ohm)
MotorSarim = tf(1,[MotorL MotorR]); %Motor Sarimlari
MotorPI = tf(5.36*[1 2732],[1 0]); %Motor Sarimlari
Goturucu PI(Analog)
RdsOn = 0.55; %Motor RdsOn Direnci
PwmKazanci = 28/1.25; %PWM Surucu Kazanci

%G4 Kontrolor Parametreleri
G4_A14 = 10268;
G4_A24 = -19;
G4_B04 = 250;
G4_B14 = -371;
G4_B24 = 123;

%G8 Kontrolor Parametreleri
G8_A18 = 2;
G8_A28 = -1;
G8_B08 = 16544;
G8_B18 = -32768;
G8_B28 = 16224;
```

## tarayici\_tablo.m

```
%SimulasyonDatalarini Kaydet
SimZaman = SimulasyonDatalar.time;
AynaPoz = SimulasyonDatalar.signals(1,1).values;
ITop = SimulasyonDatalar.signals(1,2).values;
ICL = SimulasyonDatalar.signals(1,3).values;
IFF = SimulasyonDatalar.signals(1,4).values;
Ornekleme = SimulasyonDatalar.signals(1,5).values;

SimDatalar = zeros(8000,6);
TarayiciTablo = zeros(8000,10);

k = 1;
%Simulayon Datalarindan 10kHz Orneklemeleri Topla.
minval = SimZaman(1);
for i = 1:1:8000
    if(SimZaman(i) >= minval + ts)
        SimDatalar(k,1) = SimZaman(i); %zaman
        SimDatalar(k,2) = AynaPoz(i); %Pozisyon
        SimDatalar(k,3) = Ornekleme(i); %OrneklemeIndeksi
        SimDatalar(k,4) = ICL(i); %ICL
        SimDatalar(k,5) = IFF(i); %IFF
        SimDatalar(k,6) = ITop(i); %ITop

        k = k+1;
    end
end
```

```

        minval          = SimZaman(i);
    else
    end
end

%Tarama Cevrimi Tablosunu Baslangic Acisindan Itibaren Olustur.
m = 1;
for j = 1:1:length(SimDatalar)
    if(SimDatalar(j,3)==1)
        refindeks = 1;
        for indeks = j:1:(j+399)
            if(indeks < length(SimDatalar))
                TarayiciTablo(m,1:6) = SimDatalar(indeks,:);
                TarayiciTablo(m,7)   = pozisyon(refindeks);
                m                     = m + 1;
                refindeks             = refindeks + 1;
            end
        end
    end
end

%Sifir Gecisi Yakala
for z = 801:1:1200
    if(sign(TarayiciTablo(z,7))==1)
        max_radian = TarayiciTablo(z,7);
        min_radian = TarayiciTablo(z-1,7);
        break
    else
    end
end

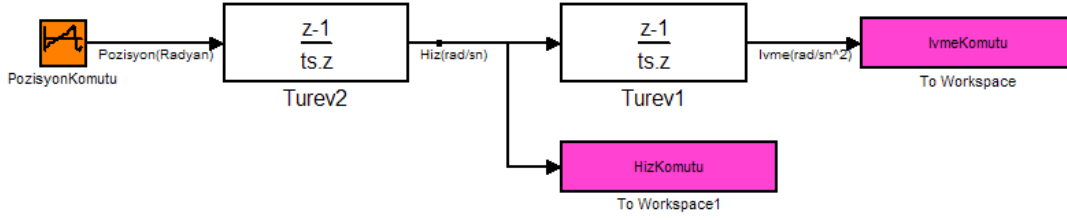
%Kayma Acisini Hesapla
sim('MaxMinBulucu')
shift = half.signals.values(1);
TarayiciTablo(:,8) = TarayiciTablo(:,7) - shift;
TarayiciTablo(:,9) = -(2^14)*sin(TarayiciTablo(:,8)*4); %Sinus
Komut
TarayiciTablo(:,10) = (2^14)*cos(TarayiciTablo(:,8)*4); %Kosinus
Komut

%Excele Kaydet
text = {'IFF', 'ITop', 'Poz(rad)', 'sincmd', 'coscmd'};
xlswrite('matlabdata.xls',text,1)
xlswrite('matlabdata.xls',TarayiciTablo(801:1200,5:6),1,'A2:B401')
xlswrite('matlabdata.xls',TarayiciTablo(801:1200,8:10),1,'C2:E401')

%Kontrol Icin IFF Tablosunu Goster.
plot(IFF,'color','blue')
grid on
hold on
plot(ITop,'color','red')
legend(['max iff= ',num2str(max(IFF))],['max idri= ',num2str(max(ITop))])

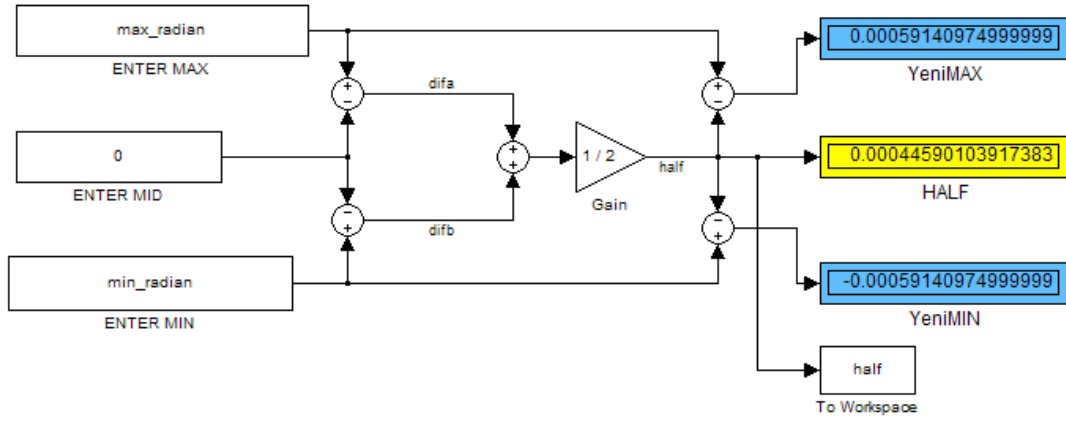
```

### hiz\_ivme\_profil.mdl



Şekil A.1 : Tarayıcı simülasyonu hız ve ivme profili üretimi.

### MaxMinBulucu.mdl



Şekil A.2 : Tarayıcı simülasyonu kayma açısı bulma modeli.

## ÖZGEÇMİŞ



**Ad Soyad:** Murat KALKAN

**Doğum Yeri ve Tarihi:** Mersin, 1983

**Adres:** Umut Mah. Serhat Sok. Levent Apt. No:23/13  
Seyranbağları, ÇANKAYA/ANKARA

**Lisans Üniversitesi:** İstanbul Teknik Üniversitesi, Kontrol Mühendisliği

**Yayın Listesi:** Kalkan, M., 2008: Tarayıcı Sisteminin SIMULINK® Modelinin Elde Edilmesi. *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı*, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2008.