

T.C.  
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KESİR DERECELİ KONTROL SİSTEMLERİNİN FREKANS CEVAPLARININ ANALİZİ  
İÇİN MATLAB ORTAMINDA TOOLBOX GELİŞTİRİLMESİ

BİLAL ŞENOL  
ELEKTRİK – ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI

MALATYA  
HAZİRAN 2011

**Tezin Başlığı :** Kesir Dereceli Kontrol Sistemlerinin Frekans Cevaplarının Analizi İçin Matlab Ortamında Toolbox Geliştirilmesi

**Tezi Hazırlayan :** Bilal ŞENOL

**Sınav Tarihi :** 17 Haziran 2011

Yukarıda adı geçen tez jürimizce değerlendirilerek Elektrik – Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

**Sınav Jürisi Üyeleri :**

Prof. Dr. Nusret TAN (Jüri Başkanı)

Yrd. Doç. Dr. Celaleddin YEROĞLU (Danışman)

Doç. Dr. Serdar E. HAMAMCI

İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

Prof. Dr. Asım KÜNKÜL  
Enstitü Müdürü

## **ONUR SÖZÜ**

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Kesir Dereceli Kontrol Sistemlerinin Frekans Cevaplarının Analizi İçin Matlab Ortamında Toolbox Geliştirilmesi” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların, hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Bilal ŞENOL

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### KESİR DERECELİ KONTROL SİSTEMLERİNİN FREKANS CEVAPLARININ ANALİZİ İÇİN MATLAB ORTAMINDA TOOLBOX GELİŞTİRİLMESİ

Bilal ŞENOL

İnönü Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik – Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

76+viii sayfa

2011

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Celaleddin YEROĞLU

Bu tez çalışmasında kesir dereceli kontrol sistemlerinin analizi için MATLAB ortamında kullanılabilecek bir program geliştirilmiştir. Bu konuda literatürde mevcut olan programlar incelenmiş, bu programların avantajları ve dezavantajları ele alınmıştır. Bu bilgiler ışığında geliştirilen programın son kullanıcılar için kolay kullanılabilir olması hedeflenmiştir.

Bu program kullanılarak tamsayı dereceli ve kesir dereceli sistemlerin zaman bölgesinde birim basamak tepkisi, frekans bölgesinde de Bode, Nyquist ve Nichols grafikleri kolayca elde edilebilmektedir. Bu grafikler parametre belirsizliği içeren tamsayı dereceli ve kesir dereceli sistemler için de elde edilebilmektedir. Ayrıca parametre belirsizliği içeren sistemlerin Bode ve Nyquist zarflarını elde etmek için gerekli olan algoritmalar da programa dahil edilmiştir. Bu analiz araçlarının kolayca kullanılabilmesi için bir arayüz programı geliştirilmiştir.

Bu tez çalışmasında geliştirilen kolay kullanımlı program “UFT-FOCS” olarak adlandırılmıştır. Programın uluslar arası nitelik taşınması için UFT-FOCS (User Friendly Toolbox for Fractional Order Control) ismi İngilizce seçilmiş, programın kullanım menüleri de İngilizce olarak hazırlanmıştır.

UFT – FOCS programının literatürdeki mevcut programlardan en büyük farkı kullanımının oldukça kolay tutulmuş olması ve parametre belirsizliği içeren kesir dereceli kontrol sistemlerini de kapsamasıdır. Dolayısıyla sadece bu konuyla profesyonel olarak ilgilenenlerin değil, lisansüstü öğrencilerin de rahatça kullanabileceği bir program oluşturulmuştur.

ANAHTAR KELİMELER: Kesir dereceli kontrol sistemleri, toolbox, Bode eğrileri, Nyquist eğrisi, Nichols eğrisi, Bode zarfı, Nyquist zarfı

## **ABSTRACT**

Master Thesis

### **DEVELOPMENT OF A MATLAB TOOLBOX FOR FREQUENCY RESPONSE ANALYSIS OF FRACTIONAL ORDER CONTROL SYSTEMS**

Bilal ŞENOL

İnönü University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Electrical and Electronics Engineering

76+viii pages

2011

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Celalettin YEROĞLU

In this thesis, a program has been developed in MATLAB environment, for the analysis of fractional order control systems. The programs in the literature developed for this subject are examined and the advantages and disadvantages of these programs are investigated. In the light of these information, the program developed in this thesis has been aimed to be easy to use for end users.

The step response in time domain, the Bode, Nyquist and Nichols plots in frequency domain can be easily obtained for integer order and fractional order control systems using the program. These plots can also be obtained for the integer order and fractional order control systems with parametric uncertainty. On the other hand, the algorithms to obtain the Bode and Nyquist envelopes of the systems with parametric uncertainty are included in the program. A user friendly interface has been developed to use these analysis tools easily.

The program developed in this thesis is named “UFT-FOCS” (User Friendly Toolbox for Fractional Order Control Systems). For international usage, the name of the program is given in English, and interface menu of the program is prepared in English.

The main difference of the “UFT-FOCS” from the programs available in the literature is that the usage of the “UFT-FOCS” is relatively easy and “UFT-FOCS” also includes the tools for systems with parametric uncertainty. Consequently, the program has been developed to be used not only by professionals but also by master and doctorate students.

**KEYWORDS:** Fractional order control systems, toolbox, Bode plots, Nyquist plot, Nichols plot, Bode envelope, Nyquist envelope

## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının her aŐamasında yardım, öneri ve desteklerini esirgemedeni beni her konuda yönlendiren danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Celaleddin YEROĞLU'na;

Kesir dereceli kontrol sistemlerinin analizi konusunda yayınlarından faydalandığım ve bu konuda her türlü yardımlarını gördüğüm hocalarım Prof. Dr. Nusret TAN ve Doç. Dr. Serdar E. HAMAMCI'ya;

Bu tezi yazdığım süre boyunca her aşamayı takip eden ve beni motive eden Bilgisayar Mühendisliği Bölüm Başkanı hocam Doç. Dr. Ali KARCI'ya ve bu süre boyunca bana hep destek olan çalışma arkadaşlarıma;

Ayrıca tüm hayatım boyunca olduğu gibi bu çalıŐmalarım süresince de benden her türlü desteklerini esirgemeyen değerli AİLEM'e ve niŐanlım Őerife İLHAN'a

teşekkür ederim

## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
İÇİNDEKİLER .....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	v
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	viii
1. <b>GİRİŞ</b> .....	1
2. <b>KURAMSAL TEMELLER</b> .....	5
2.1. Kesirli Matematiğin Tarihsel Gelişimi .....	5
2.2. Kesirli Matematiğin Temelleri .....	5
2.3. Kesirli Diferansiyel Denklemlerin Kontrol Sistemlerinde Kullanımı .....	8
3. <b>MATERYAL VE YÖNTEM</b> .....	11
3.1. Materyal .....	11
3.1.1. MATLAB ile Grafikselle Kullanıcı Arayüzü (GUI) Oluşturma .....	11
3.2. Yöntem .....	13
4. <b>KESİR DERECELİ KONTROL SİSTEMLERİNİN ANALİZİ İÇİN KOLAY KULLANIMLI PROGRAM GELİŞTİRİLMESİ</b> .....	14
4.1. Literatürde Bu Konuda Yapılmış Mevcut Bazı Çalışmalar .....	14
4.1.1. CRONE Toolbox .....	14
4.1.2. Toolbox “ninteger” for MATLAB .....	15
4.1.3. PID Control Laboratory 3.0 .....	17
4.2. Kesir Dereceli Sistemlerin Analizi İçin Program Geliştirilmesi (UFT-FOCS) ..	18
4.2.1. Program Pencerelelerinin Tanıtımı .....	18
4.2.2. Programın Tamsayı Dereceli ve Kesir Dereceli Sistemler için Kullanımı .....	37
5. <b>UYGULAMA ÖRNEKLERİ</b> .....	46
6. <b>SONUÇLAR</b> .....	68
7. <b>KAYNAKLAR</b> .....	69
8. <b>EKLER</b> .....	73

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	$PI^{\lambda}D^{\mu}$ kontrolör iç yapısı .....	9
Şekil 3.1	MATLAB GUIDE ana pencere görüntüsü .....	12
Şekil 4.1	CRONE ana pencere görüntüsü .....	15
Şekil 4.2.	“ninteger” programının Simulink kütüphanesinden bir görüntü .....	16
Şekil 4.3.	“ninteger” programının PID kontrolör analiz ekranı .....	17
Şekil 4.4.	PID Control Laboratory 3.0 ana pencere görüntüsü .....	18
Şekil 4.5.	UFT – FOCS v.1.0 programının ana pencere görüntüsü .....	19
Şekil 4.6.	Sistem tipi seçim paneli .....	20
Şekil 4.7.	Sistem tipi seçilmediğinde beliren hata mesajı .....	20
Şekil 4.8.	Yönlendirme paneli .....	20
Şekil 4.9.	Yönlendirme paneli (tamsayı dereceli sistem) .....	21
Şekil 4.10.	Yönlendirme paneli (kesir dereceli sistem) .....	21
Şekil 4.11.	Kontrol edilmek istenen sistem giriş paneli .....	22
Şekil 4.12.	Tamsayı dereceli sistemler için yönlendirme .....	22
Şekil 4.13.	Kesir dereceli sistemler için yönlendirme .....	22
Şekil 4.14.	Kontrol edilmek istenen sistem giriş paneli açılır menü seçenekleri ....	23
Şekil 4.15.	Uyumsuz seçim yapıldığında ekrana gelen hata mesajı (tamsayı dereceli sistem) .....	23
Şekil 4.16.	Uyumsuz seçim yapıldığında ekrana gelen hata mesajı (kesir dereceli sistem).....	23
Şekil 4.17.	Tamsayı dereceli sistem giriş alanları .....	24
Şekil 4.18.	Kesir dereceli sistem giriş alanları .....	25
Şekil 4.19.	Parametre belirsizliği içeren tamsayı dereceli sistem giriş alanları .....	26
Şekil 4.20.	Parametre belirsizliği içeren kesir dereceli sistem giriş alanları .....	27
Şekil 4.21.	Kontrolör giriş paneli .....	29
Şekil 4.22.	Tamsayı dereceli sistemler için yönlendirme .....	29
Şekil 4.23.	Kesir dereceli sistemler için yönlendirme .....	29
Şekil 4.24.	Kontrolör giriş paneli açılır menü seçenekleri .....	30
Şekil 4.25.	Uyumsuz seçim yapıldığında ekrana gelen hata mesajı (tamsayı dereceli kontrolör) .....	30
Şekil 4.26.	Uyumsuz seçim yapıldığında ekrana gelen hata mesajı (kesir dereceli kontrolör) .....	30
Şekil 4.27.	Tamsayı dereceli kontrolör giriş alanları .....	31
Şekil 4.28.	Kesir dereceli kontrolör giriş alanları .....	32
Şekil 4.29.	PID kontrolör giriş alanları .....	33
Şekil 4.30.	Kesir dereceli PID kontrolör giriş alanları .....	33
Şekil 4.31.	Ekler paneli .....	34
Şekil 4.32.	Bode ve Nyquist zarfları paneli .....	35
Şekil 4.33.	Çizim paneli .....	36
Şekil 4.34.	Tamsayı dereceli sistem tipinin seçilmesi .....	37
Şekil 4.35.	Tamsayı dereceli transfer fonksiyonu tanımlanması .....	38
Şekil 4.36.	PID kontrolör tanımlanması .....	38

Şekil 4.37.	Çizdirilmek istenen grafiklerin seçilmesi .....	39
Şekil 4.38.	Birim basamak tepkisi grafiği çizim seçenekleri .....	39
Şekil 4.39.	Bode, Nyquist ve Nichols grafikleri çizim seçenekleri .....	40
Şekil 4.40.	Kesir dereceli sistem tipi seçilmesi .....	40
Şekil 4.41.	Kesir dereceli transfer fonksiyonu tanımlanması .....	41
Şekil 4.42.	Kesir dereceli PID kontrolör tanımlanması .....	41
Şekil 4.43.	Parametre belirsizliği içeren tamsayı dereceli sistemler için transfer fonksiyonu tanımlanması .....	43
Şekil 4.44.	Parametre belirsizliği içeren kesir dereceli sistemler için transfer fonksiyonu tanımlanması .....	44
Şekil 4.45.	Çizim panelindeki zarflar bölümü .....	45
Şekil 5.1.	$G_{(1)}(s)$ transfer fonksiyonu girişi .....	47
Şekil 5.2.	$C_{(1)PID}(s)$ kontrolör girişi .....	47
Şekil 5.3.	$C_{(1)PID}(s)G_{(1)}(s)$ sistemine ait birim basamak tepkisi .....	48
Şekil 5.4.	$C_{(1)PID}(s)G_{(1)}(s)$ sistemine ait Bode grafiği .....	48
Şekil 5.5.	$C_{(1)PID}(s)G_{(1)}(s)$ sistemine ait Nyquist grafiği .....	49
Şekil 5.6.	$C_{(1)PID}(s)G_{(1)}(s)$ sistemine ait Nichols grafiği .....	49
Şekil 5.7.	$G_{(2)}(s)$ transfer fonksiyonu girişi .....	50
Şekil 5.8.	$C_{(2)PI}(s)$ kontrolör girişi .....	50
Şekil 5.9.	Belirsiz parametrelerin limitleri arasındaki basamak sayısının girilmesi .....	50
Şekil 5.10.	$C_{(2)PI}(s)G_{(2)}(s)$ sistemine ait birim basamak tepkisi .....	51
Şekil 5.11.	$C_{(2)PI}(s)G_{(2)}(s)$ sistemine ait Bode grafiği .....	51
Şekil 5.12.	$C_{(2)PI}(s)G_{(2)}(s)$ sistemine ait Nyquist grafiği .....	52
Şekil 5.13.	$C_{(2)PI}(s)G_{(2)}(s)$ sistemine ait Nichols grafiği .....	52
Şekil 5.14.	$G_{(3)}(s)$ transfer fonksiyonu girişi .....	53
Şekil 5.15.	$C_{(3)}(s)$ kontrolör girişi .....	53
Şekil 5.16.	$C_{(3)}(s)G_{(3)}(s)$ sistemine ait birim basamak tepkisi .....	54
Şekil 5.17.	$C_{(3)}(s)G_{(3)}(s)$ sistemine ait Bode grafiği .....	54
Şekil 5.18.	$C_{(3)}(s)G_{(3)}(s)$ sistemine ait Nyquist grafiği .....	55
Şekil 5.19.	$C_{(3)}(s)G_{(3)}(s)$ sistemine ait Nichols grafiği .....	55
Şekil 5.20.	$G_{(4)}(s)$ transfer fonksiyonu girişi .....	56
Şekil 5.21.	$C_{(4)PI^2D^\mu}(s)$ kontrolör girişi .....	56
Şekil 5.22.	$C_{(4)PI^2D^\mu}(s)G_{(4)}(s)$ sistemine zaman gecikmesi eklenmesi .....	56
Şekil 5.23.	$C_{(4)PI^2D^\mu}(s)G_{(4)}(s)$ sistemine ait birim basamak tepkisi .....	57
Şekil 5.24.	$C_{(4)PI^2D^\mu}(s)G_{(4)}(s)$ sistemine ait Bode grafiği .....	57

Şekil 5.25.	$C_{(4)PI^2D^\mu}(s)G_{(4)}(s)$ sistemine ait Nyquist grafiği .....	58
Şekil 5.26.	$C_{(4)PI^2D^\mu}(s)G_{(4)}(s)$ sistemine ait Nichols grafiği .....	58
Şekil 5.27.	$G_{(5)}(s)$ transfer fonksiyonu girişi (Kontrol edilmek istenen sistem giriş paneli) .....	59
Şekil 5.28.	$G_{(5)}(s)$ transfer fonksiyonu girişi (Bode ve Nyquist zarfları paneli) ...	59
Şekil 5.29.	$C_{(5)}(s) = 1$ kontrolör girişi .....	59
Şekil 5.30.	$G_{(5)}(s)$ sistemine ait Bode grafiği .....	60
Şekil 5.31.	$G_{(5)}(s)$ sistemine ait Nyquist grafiği .....	60
Şekil 5.32.	$G_{(5)}(s)$ sistemine ait Bode zarfı .....	61
Şekil 5.33.	$G_{(5)}(s)$ sistemine ait Nyquist zarfı .....	61
Şekil 5.34.	$G_{(6)}(s)$ transfer fonksiyonu girişi .....	62
Şekil 5.35.	$C_{(6)PD}(s)$ kontrolör girişi .....	62
Şekil 5.36.	$C_{(6)PD}(s)G_{(6)}(s)$ sistemine ait birim basamak tepkisi .....	63
Şekil 5.37.	$C_{(6)PD}(s)G_{(6)}(s)$ sistemine ait Bode grafiği .....	63
Şekil 5.38.	$C_{(6)PD}(s)G_{(6)}(s)$ sistemine ait Nyquist grafiği .....	64
Şekil 5.39.	$C_{(6)PD}(s)G_{(6)}(s)$ sistemine ait Nichols grafiği .....	64
Şekil 5.40.	$G_{(7)}(s)$ transfer fonksiyonu girişi .....	65
Şekil 5.41	$C_{(7)PI^2D^\mu}(s)$ kontrolör girişi .....	65
Şekil 5.42	Sisteme zaman gecikmesi eklenmesi .....	65
Şekil 5.43.	$C_{(7)PI^2D^\mu}(s)G_{(7)}(s)$ sistemine ait birim basamak tepkisi .....	66
Şekil 5.44.	$C_{(7)PI^2D^\mu}(s)G_{(7)}(s)$ sistemine ait Nyquist grafiği .....	66
Şekil 5.45.	$C_{(7)PI^2D^\mu}(s)G_{(7)}(s)$ sistemine ait Bode zarfı grafiği .....	67
Şekil 5.46.	$C_{(7)PI^2D^\mu}(s)G_{(7)}(s)$ sistemine ait Nyquist zarfı grafiği .....	67

## SİMGELER VE KISALTMALAR

UFT-FOCS .....	Kesir Dereceli Kontrol Sistemleri İçin Kullanıcı Dostu Araç
PID .....	Oransal-İntegral- Türev (Proportional-Integral-Derivative) Kontrolör
$PI^\lambda D^\mu$ .....	Kesir dereceli PID kontrolör
$K_p$ .....	Oransal sabit
$K_i$ .....	İntegral sabiti
$K_d$ .....	Türev sabiti
$\lambda$ .....	İntegral sabitinin derecesi
$\mu$ .....	Türev sabitinin derecesi
CFE .....	Continued Fractional Expansions
GUI .....	Grafiksel Kullanıcı Arayüzü
CRONE .....	Comande Robuste D'ordre Non Entire
CSD .....	Kontrol Sistemi Tasarımı
$G(s)$ .....	Kontrol edilmek istenen sistemin transfer fonksiyonu
$C(s)$ .....	Kontrolör

## 1. GİRİŞ

Kesirli matematik çok önceden bilinmesine rağmen son 20 yılda bu konuda yapılan çalışmalarda önemli bir artış görülmüştür. Kontrol sistemlerinin analizinde de kesirli türev ve integral karşımıza çıkmaktadır. Kesir dereceli integro-diferansiyel denklemlerle ifade edilen sistem ve süreçlerin matematiksel modellenmesi ve simülasyonu kesir dereceli diferansiyel denklemlerin çözülmesi ihtiyacına yol açmaktadır.

Kesir dereceli türev ve integral fikri, anlaşılması zor ve biraz yabancı bir başlık olarak görünmektedir. Bu nedenle bu matematiksel araç “gerçeklikten uzak” olarak görülebilir. Fakat birçok fiziksel materyalin kesir dereceli ifadesi vardır ve bunları açıklamak için kesir dereceli matematik gereklidir. Aslında “kesirli matematik” ismi tam doğru olmayan bir ifadedir. Daha iyi bir açıklama, “derecesi tamsayı olmayan türevleme ve integrasyon” olabilir [1]. Fakat bu tez çalışmasında alışılmış kullanıma uygun olarak kesirli matematik ifadesi kullanılacaktır.

Kesir dereceli matematiğin uygulamalarından biri olan kesir dereceli kontrol sistemleri yarım yüzyıl önce Tustin tarafından büyük objelerin pozisyon kontrolü için tanıtılmıştır [2]. 60’lı yıllarda ise bu konuya öncülük eden bazı çalışmalar Manabe tarafından gerçekleştirilmiştir [3]. Son yıllarda bazı araştırmacılar kesir dereceli durum denklemleri ile ifade edilen mekanik sistemler üzerinde çalışma yapmışlardır [4-6]. Elektrik alanında yakın zamanda yapılan bazı uygulamalar da mevcuttur. Le M’ehaut’e ve Crepy [7] fraktans adı verilen ve direnç ile kapasitans arasında özellikler gösteren bir devre elemanı önermişlerdir. Benzer bir eleman da deneysel olarak Nakawaga ve Sorimachi tarafından çalışılmıştır [8]. Oldham ve Zoski [9] tarafından önerilen bir devre de fraktansın bir başka örneğini teşkil etmiştir. Bu çalışmalarla beraber kesirli matematiğin kontrol sistemlerine uygulaması ile ilgili bazı önemli çalışmalar yapılmıştır [10-16]. Bu sistemler için kontrolör tasarım yöntemleri ve kararlılık analizi çalışmaları da literatürde yer almaktadır [17-19]. Westerlund [20] tarafından geliştirilen yeni bir kapasitör teorisi, kesirli türevlerin kullanımına dayanmaktadır. Yeni, kesir dereceli türev tabanlı modellerin, önceki tamsayı dereceli modellere göre daha iyi sonuç verdiği Caputo [21], Nonnenmacher ve Glöcke [22], Friedrich [23] ve Westerlund [20] tarafından deneysel olarak test edilmiştir. Kesir dereceli türev tabanlı modellerin kullanımındaki önemli temel fiziksel varsayımlar Caputo ve Mainardi [24] ve Westerlund [25] tarafından verilmiştir. Kesir dereceli türevler çeşitli maddelerdeki

hafıza ve kalıtsal etkilerin tanımlanmasında güçlü bir araçtır [12]. Bu durum kesir dereceli modellerin, tamsayı dereceli modellerle karşılaştırıldığında en belirgin avantajı olarak karşımıza çıkmaktadır. Kesir dereceli dinamik sistemler, kontrol sistemlerinde de geniş kullanım alanı bulmaktadır. Buna örnek olarak kesir dereceli integro-diferansiyel ifadelerin kontrol uygulamalarında ve robotikte kullanımı verilebilir [12, 26-30].

Kontrol sistemlerinde geniş bir yelpazede kullanılan kontrolörlerin de kesir dereceli yaklaşımdan etkilendiği görülmektedir. Endüstriyel kontrolörlere hükmeden PID kontrolörler, kesir dereceli integralleyici ve diferansiyelleyici düşüncesi kullanılarak modifiye edilmiş ve  $PI^\lambda D^\mu$  kontrolör parametre belirleme çalışmalarına büyük ilgi gösterilmiştir [31-34]. Kesir dereceli PID ( $PI^\lambda D^\mu$ ) kontrolör fikri ilk olarak [12] 'de çalışılmıştır. O zamandan sonra kesir dereceli kontrolörler ve uygulamaları konusunda çok sayıda çalışma yapılmıştır. Kesir dereceli  $PI^\lambda D^\mu$  kontrolörlerin frekans bölgesi yaklaşımları [35]'te, kesir dereceli kontrolör tasarımı çalışması [36]'da, kesir dereceli türevleyici ve integralleyicilerin ayrıştırma şemaları hakkında bir çalışma [37]'de, kesir dereceli zaman gecikmeli sistemler hakkında bir çalışma da [38]'de bulunabilir. Kesir dereceli kontrol sistemleri ile ilgili diğer bazı çalışmalar da [39-41]'de verilmiştir.  $PI^\lambda D^\mu$  kontrolör kullanılarak yapılan frekans tabanlı bir çalışma da [31]'de mevcuttur. PID kontrolörlerin yaygın şekilde kullanımı, araştırmacıları daha iyi tasarım yöntemleri veya alternatif kontrolör çeşitleri bulma konusunda motive etmiştir [42, 43]. PID kontrolörlerin endüstride geniş kullanım alan bulması nedeniyle bu konuda yapılan çalışmalar literatüre önemli katkı sağlamaktadır [44, 45]. Otomatik kontrol alanında kesir dereceli sistem uygulamaları için oluşturulan diğer bir yapı da CRONE kontrolördür. Fransızca bir kısaltma olan CRONE, (Commande Robuste d'Ordre Non Entier), kesir dereceli sistemlerin dayanıklı kontrolü anlamına gelmektedir [46-49].

Zaman içinde kesir dereceli kontrol sistemlerinin bilgisayar ortamında analizini yapabilmek için yardımcı programlara ihtiyaç duyulmuş ve bu konuda çalışmalar yoğunlaşmıştır. Bütün bu gelişmeler göz önüne alındığında görülüyor ki kesir dereceli kontrol uygulamaları kontrol mühendisliği alanında önemli kullanım alanı bulmaktadır [12, 46-49]. Bu nedenle kesir dereceli kontrol sistemlerinin analizi ve tasarımı için araçların geliştirilmesi önemli bir ihtiyaç olarak karşımıza çıkmaktadır.

### **Bu konuda şimdiye kadar yapılmış olan çalışmalar şöyle özetlenebilir:**

Yaptığımız literatür taramasına göre kesir dereceli kontrol sistemlerinin analizi için Oustaloup tarafından geliştirilen ve yaygın bir kullanıma sahip olan CRONE, bu konuda geliştirilen ilk uygulamadır [46-49]. Valerio [50], 2005 yılında “Toolbox *ninteger* for MATLAB v. 2.3” adlı, MATLAB ortamında çalışan bir program yayınlamıştır. Ayrıca halen internet üzerinde [www.pidlab.com](http://www.pidlab.com) adresinden kullanılabilinen bir Java uygulama programı mevcuttur [51]. Yeroğlu ve Tan ise 2009 yılında kesir dereceli kontrol sistemlerinin analizi için yardımcı bir toolbox geliştirilmesi yönünde bazı başlangıç çalışmaları yapmıştır [52]. Bütün bu çalışmalarda geliştirilen programların ortak özelliği kullanımlarının zor olması ve bu programların kullanımında kesirli matematik bilgisine ihtiyaç duyulmasıdır.

### **Bu konuda yapılabilecek çalışmalar şöyle sıralanabilir:**

- Kolay kullanılmalı programlar geliştirilebilir.
- Geliştirilmiş programlar birleştirilip daha kapsamlı bir analiz aracı oluşturulabilir.
- Literatüre farklı program geliştirme ortamları kazandırılabilir.
- Bu konuda ortak program geliştirme forumları kurulmaya çalışılabilir.

### **Bu tezde yapılan çalışmalar:**

Bu tez çalışması ile beraber literatüre tamsayı ve kesir dereceli kontrol sistemlerinin analizinde kullanılabilecek kolay kullanılmalı bir program kazandırılmıştır. Bu program ile tamsayı dereceli ve kesir dereceli kontrol sistemlerine ait birim basamak tepkisi, Bode, Nyquist ve Nichols grafikleri kolayca elde edilebilmektedir. Aynı şekilde söz konusu grafikler, parametre belirsizliği içeren sistemler için de kolayca çizilebilmekte, bu sistemlerin Bode ve Nyquist zarfları da elde edilebilmektedir.

Geliştirilen bu programın mevcut programlardan en önemli farkı, genel kullanıma hitap etmesi ve kolay kullanılmalı olmasıdır. Programın kullanımını kolaylaştıran en önemli özelliği, tüm fonksiyonların tek pencere üzerinde yer aldığı kullanıcı dostu bir arayüz içermesidir. Program üzerinde gerçekleştirilmek istenen her işlem yönlendirme açıklamaları sayesinde kolayca yapılabilmektedir. Bu programın mevcut programlardan önemli bir farkı da parametre belirsizliği içeren sistemlerin analizinde kullanılabilecek algoritmalar içermesidir.

Bu tez çalışmasında Bölüm 2’de çalışmanın kuramsal temelleri hakkında bilgi verilmiştir. Bölüm 3’te, çalışma yapılırken kullanılan materyal ve yöntemden bahsedilmiştir. Bölüm 4’te, bu konuda literatürde mevcut bazı programlar hakkında özet bilgi verilmiş, daha sonra geliştirilen program tanıtılmıştır. Bölüm 5’te uygulama örneklerine yer verilmiştir. Bölüm 6’da sonuçlar kısaca açıklanmıştır. Geliştirilen programda, kesir dereceli sistemlerin analizinde kullanılan temel MATLAB kodları Ekler’de yer almaktadır.

## 2. KURAMSAL TEMELLER

### 2.1. Kesirli Matematiğin Tarihsel Gelişimi

Temel türevleme operatörü olan  $D = \frac{d}{dx}$ , temel matematik çalışmış herkes tarafından bilinir. Uygun seçilmiş bir  $f(x)$  fonksiyonunun  $n$ . dereceden türevi olan  $D^n f(x) = \frac{d^n f(x)}{dx^n}$ ,  $n$  pozitif bir sayı olduğunda kolayca hesaplanabilmektedir. Kesir dereceli sistem demek, kontrol edilmek istenen sistem ve/veya kontrolörün kesir dereceli diferansiyel denklemlerle ifade edildiği sistem demektir. Matematiği kesir dereceli hale genelleştirmek uzun bir süreçten sonra gerçekleşmeye başlamıştır. 1695 yılında L'Hospital,  $n$  değerinin tamsayı olmadığı durumda  $D^n f$ 'ye nasıl bir anlam yükleneceğini fikrinden Leibniz'e bahsetmiştir ve o zamandan beri kesirli matematik ilgi çekmeye başlamıştır. Bu konu Euler ve Lagrange gibi matematikçilerin daha önceden dikkatini çekmiş olsa da bu konudaki sistematik çalışmalar Liouville (1832), Holmgren (1864) ve Riemann (1953) tarafından 19. yy başlarında ve ortalarında gerçekleştirilmiştir. Modern matematikçiler için esas başlangıç noktası ise 1884 yılında genelleştirilmiş operatörlerin geliştirilmesi olmuştur. O günden sonra teori genişletilerek  $m$  değerinin rasyonel, irrasyonel, pozitif, negatif, reel veya kompleks olabildiği  $D^m$  operatörlerini de kapsamıştır [53, 54].

Giriş bölümünde de belirtildiği gibi kesirli matematik, kontrol mühendisliğinde önemli uygulama alanı bulmaktadır. Bu bölümde, kesir dereceli kontrol sistemleri hakkında özet bilgiler yer alacaktır. Bu bilgilerin derlenmesinde çoğunlukla [1] nolu kaynaktan faydalanılmıştır.

### 2.2. Kesirli Matematiğin Temelleri

Kesirli sistemler, tamsayı dereceli sistemlerin genelleştirilmiş hali olarak ele alınabilir [55-59]. Kesirli matematik, temel tamsayı dereceli operatör  ${}_a D_t^r$ 'nin integrasyon ve türevleme için genelleştirilmiş halidir. Burada  $a$  ve  $t$ , operasyon limitleri ve  $r \in \mathbb{R}$ 'dir. Bu durumda sürekli zamanlı bir integro-diferansiyel operatör aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$${}_a D_t^r = \begin{cases} \frac{d^r}{dt^r} & : r > 0 \\ 1 & : r = 0 \\ \int_a^t (d\tau)^{-r} & : r < 0 \end{cases} \quad (2.1)$$

Bir  $f(t)$  fonksiyonunun kesirli integral veya türevini doğrudan hesaplamak çok zor olduğundan bazı yaklaşıklık tanımlarından faydalanılır. Bu konuda en çok kullanılan tanımlar Grünwald-Letnikov, Riemann-Liouville ve Caputo tanımlarıdır [54, 55].

Grünwald-Letnikov tanımı aşağıdaki şekilde verilmiştir:

$${}_a D_t^r f(t) = \lim_{h \rightarrow 0} h^{-r} \sum_{j=0}^{\lfloor \frac{t-a}{h} \rfloor} (-1)^j \binom{r}{j} f(t - jh) \quad (2.2)$$

Burada  $[\cdot]$ , tamsayılı kısımdır.  $h$  ise zaman artış miktarıdır.

Riemann-Liouville tanımı aşağıdaki şekilde verilmiştir:

$${}_a D_t^r f(t) = \frac{1}{\Gamma(n-r)} \frac{d^n}{dt^n} \int_a^t \frac{f(\tau)}{(t-\tau)^{r-n+1}} d\tau, \quad (n-1 < r < n) \quad (2.3)$$

Burada  $\Gamma(\cdot)$ , Euler gamma fonksiyonudur.

Caputo tanımı ise aşağıdaki şekilde verilmiştir:

$${}_a D_t^r f(t) = \frac{1}{\Gamma(n-r)} \int_a^t \frac{f^{(n)}(\tau)}{(t-\tau)^{r-n+1}} d\tau, \quad (n-1 < r < n) \quad (2.4)$$

Caputo türevleyicileri ile kesir dereceli diferansiyel denklemlerin başlangıç koşulları, tamsayı dereceli diferansiyel denklemlerle aynı formdadır.

Yukarıdaki tanımda  $\Gamma(m)$ , pozitif  $m$  için tanımlanan aşağıdaki faktöriyel fonksiyonudur:

$$\Gamma(m) = \int_0^{\infty} e^{-u} u^{m-1} du \quad (2.5)$$

Burada  $m$ , tamsayı olduğunda gamma fonksiyonu şöyle ifade edilebilir:

$$\Gamma(m+1) = m! \quad (2.6)$$

Sistem teorisinde dinamik davranışların analizi için genellikle transfer fonksiyonları kullanılır. Bu nedenle optimal bir çalışma için tamsayılı olmayan türevlerin Laplace dönüşümünün kullanımı gereklidir. Klasik duruma göre büyük değişikliklerin olmaması bu matematik aracının kesir dereceli sistemler için uygun olmasını sağlamaktadır. Ters Laplace dönüşümü de sistemlerin zaman bölgesi tanımlamaları için oldukça kullanışlıdır. Laplace dönüşümü için en genel formül aşağıdaki şekildedir [55]:

$$L\left\{\frac{d^m f(t)}{dt^m}\right\} = s^m L\{f(t)\} - \sum_{k=0}^{n-1} s^k \left[ \frac{d^{m-1-k} f(t)}{dt^{m-1-k}} \right]_{t=0}, \quad n-1 < m < n \quad (2.7)$$

Türevlere ait tüm başlangıç şartları sıfır olduğunda yukarıdaki gösterim oldukça basit bir hale gelmektedir:

$$L\left\{\frac{d^m f(t)}{dt^m}\right\} = s^m L\{f(t)\} \quad (2.8)$$

Derecesi tamsayı olmayan integratör  $\frac{1}{s^m}$  gibi temel transfer fonksiyonlarının ters Laplace dönüşümlerini hesaplamada yukarıdaki denklem çok kullanışlıdır.  $m$  yerine  $-m$  alırsak ve  $f(t) = \delta(t)$  olduğunu hesaba katarsak, tamsayılı olmayan bir integratörün darbe tepkisini aşağıdaki gibi elde edebiliriz:

$$L\left\{\frac{t^{m-1}}{\Gamma(m)}\right\} = \frac{1}{s^m}; \quad L^{-1}\left\{\frac{1}{s^m}\right\} = \frac{t^{m-1}}{\Gamma(m)} \quad (2.9)$$

İyi bilinen frekans dönüşüm formülü  $L^{-1}\{F(s+a)\} = e^{-at} f(t)$ , yukarıdaki denkleme uygulanırsa bir başka önemli sonuç elde edilebilir:

$$L^{-1}\left\{\frac{1}{(s+a)^m}\right\} = \frac{t^{m-1} e^{-at}}{\Gamma(m)} \quad (2.10)$$

Bu denklem kesirli matematikte bir çok sebepten dolayı temel teşkil etmektedir.

Öncelikle bu denklem, genel kesirli sistem  $F(s) = \frac{k}{(s+a)^m}$ 'nin darbe cevabını vermektedir. İkinci olarak da bu denklem sınırlı sayıda terim ile zaman bölgesi gösterimini türetmek için bir araç sağlamaktadır. Aslında geleneksel yöntemler

aşağıdaki tip diferansiyel denklemi elde etmek için, verilen transfer fonksiyonunun Taylor açılımına ihtiyaç duyar:

$$\sum_{k=0}^{\infty} a_k \frac{d^k y(t)}{dt^k} = u(t) \quad (2.11)$$

Burada  $u(t)$  giriş,  $y(t)$  ise kesirli sistemin çıkışıdır.

Yukarıdaki denklem için,  $a_k$  'nın aşağıdaki tanımı hesaplanabilir:

$$a_k = \frac{(-1)^k \Gamma(k-m)}{k! \Gamma(-m) a^{k-m}} = u(t) \quad (2.12)$$

ve,  $\lim_{k \rightarrow \infty} |a_k| = 0$  durumunda aşağıdaki denklemi sağlayan bir N sayısı var olacaktır:

$$\sum_{k=0}^{\infty} a_k \frac{d^k y(t)}{dt^k} \approx \sum_{k=0}^N a_k \frac{d^k y(t)}{dt^k} \quad (2.13)$$

(2.10) ve (2.12) denklemleri kullanılarak aşağıdaki alternatif gösterim de bulunabilir:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{1}{(s+a)^m}; \quad (s+a)^m Y(s) = U(s) \quad (2.14)$$

İki tarafta da  $s$  yerine  $(s-a)$  yazılarak aşağıdaki deklemler elde edilebilir:

$$s^m Y(s-a) = U(s-a) \quad (2.15)$$

Bu denklemin ters Laplace dönüşümü yaparsak da şu sonucu elde edebiliriz:

$$L^{-1} \{s^m Y(s-a)\} = L^{-1} \{U(s-a)\}; \quad \frac{d^m}{dt^m} [e^{at} y(t)] = e^{at} u(t) \quad (2.16)$$

### 2.3. Kesirli Diferansiyel Denklemlerin Kontrol Sistemlerinde Kullanımı

Genel bir kesirli dereceli sistem, kesirli türevin aşağıdaki formu ile ifade edilebilir.

$$\begin{aligned} & a_n D^{\alpha_n} y(t) + a_{n-1} D^{\alpha_{n-1}} y(t) + \dots + a_0 D^{\alpha_0} y(t) \\ & = b_m D^{\beta_m} u(t) + b_{m-1} D^{\beta_{m-1}} u(t) + \dots + b_0 D^{\beta_0} u(t) \end{aligned} \quad (2.17)$$

Burada,  $D^\gamma \equiv {}_0D_t^\gamma$ , Riemann-Liouville veya Caputo kesirli türevini göstermektedir. Yukarıdaki gösterimi transfer fonksiyonu şeklinde yazmak da mümkündür [54].

$$G(s) = \frac{b_m s^{\beta_m} + \dots + b_1 s^{\beta_1} + b_0 s^{\beta_0}}{a_n s^{\alpha_n} + \dots + a_1 s^{\alpha_1} + a_0 s^{\alpha_0}} = \frac{Q(s^{\beta_k})}{P(s^{\alpha_k})} \quad (2.18)$$

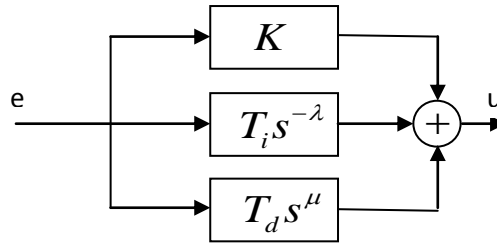
Burada  $a_k (k=0, \dots, n), b_k (k=0, \dots, m)$  sabitlerdir ve  $\alpha_k (k=0, \dots, n), \beta_k (k=0, \dots, m)$  keyfi reel veya rasyonel sayılardır ve genelleştirme ile  $\alpha_n > \alpha_{n-1} > \dots > \alpha_0$  ve  $\beta_m > \beta_{m-1} > \dots > \beta_0$  şeklinde düzenlenebilirler.

Kesir dereceli PID ( $PI^\lambda D^\mu$ ) kontrolörlerle ilgili bazı çalışmalar [12, 54, 60]'da sunulmuştur. Bu referanslarda PID kontrolör genelleştirilmiş olarak reel dereceli integralleyici  $\lambda$  ve reel dereceli türevleyici  $\mu$  halinde verilmiştir. Bu kontrolörün Laplace tabanında transfer fonksiyonu aşağıdaki formda verilebilir.

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K + T_i s^{-\lambda} + T_d s^\mu \quad (0 < \lambda, \mu < 2) \quad (2.19)$$

Burada  $K$  oransal sabit,  $T_i$  integral sabiti ve  $T_d$  ise türev sabitidir.

Şekil 2.1'de kesir dereceli PID ( $PI^\lambda D^\mu$ ) kontrolörün genel yapısı verilmektedir.



Şekil 2.1.  $PI^\lambda D^\mu$  kontrolör iç yapısı

Burada  $\lambda = 1$  ve  $\mu = 1$  olarak alındığında klasik PID kontrolör elde edilir. Buna benzer olarak  $T_i = 0$  alındığında da  $PD^\mu$  kontrolör ya da  $T_d = 0$  alındığında  $PI^\lambda$  kontrolör elde edilir.

Kesir dereceli kontrol sistemlerinin zaman bölgesi analizini doğrudan yapmak oldukça zor bir işlemdir. Bu nedenle birim basamak tepkisinin hesaplanması için kesir dereceli sistemlerin eşdeğer modellerinin kullanılması gerekmektedir. Bu sistemlerin

eşdeğer modelleri CFE (Continued Fractional Expansion) gibi yöntemlerle elde edilebilir. CFE yönteminde fonksiyonun sürekli kesirli açılımı kullanılarak eşdeğer modeli elde edilebilir.

İrrasyonel bir fonksiyonun bu şekilde bir yaklaşımı, denklem (2.18)'de verilen  $G(s)$  için aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\begin{aligned}
 G(s) &\approx a_0(s) + \frac{b_1(s)}{a_1(s) + \frac{b_2(s)}{a_2(s) + \frac{b_3(s)}{a_3(s) + \dots}}} \\
 &= a_0(s) + \frac{b_1(s)}{a_1(s) + \frac{b_2(s)}{a_2(s) + \frac{b_3(s)}{a_3(s) + \dots}}}, \quad (2.20)
 \end{aligned}$$

Burada  $a_i(s)$  ve  $b_i(s)$ ,  $s$  değişkeninin rasyonel fonksiyonları veya sabitlerdir. Bu yöntemin uygulanması irrasyonel fonksiyon olan  $G(s)$ 'in yaklaşımı olan bir rasyonel fonksiyon ortaya çıkarır.

Bu tez çalışmasında frekans analizi için kesir dereceli sistemlerin matematiksel ifadelerinin Laplace dönüşümü kullanılmıştır. Denklem (2.18) ile verilen kesir dereceli bir sistemin transfer fonksiyonunda  $s = j\omega$  değişikliği yapılarak sistemin frekans tepkisi incelenebilir.  $G(s) = s^\mu$  gösteriminde bu değişikliği aşağıdaki şekilde yapabiliriz [52].

$$G(j\omega) = (j\omega)^\mu = \omega^\mu \left( \cos \frac{\pi}{2} + j \sin \frac{\pi}{2} \right)^\mu = \omega^\mu \left( \cos \frac{\pi}{2} \mu + j \sin \frac{\pi}{2} \mu \right) \quad (2.21)$$

Sistemlerin frekans bölgesi analizi, Bode, Nyquist ve Nichols gibi frekans tabanlı eğrileri elde etmek ve parametre belirsizliği içeren sistemlerin frekans cevaplarını hesaplamak için kullanılabilir.

### **3. MATERYAL VE YÖNTEM**

#### **3.1. Materyal**

Bu tez çalışmasında program geliştirme ortamı olarak MATLAB r2009b sürümü kullanılmıştır. MATLAB, yüksek seviye bir teknik bilgisayar programlama dilidir ve algoritma geliştirme, bilgi görselleştirme, bilgi analizi ve nümerik hesaplamalar için interaktif bir ortam sunmaktadır [61].

#### **MATLAB programının temel özellikleri şöyle verilebilir:**

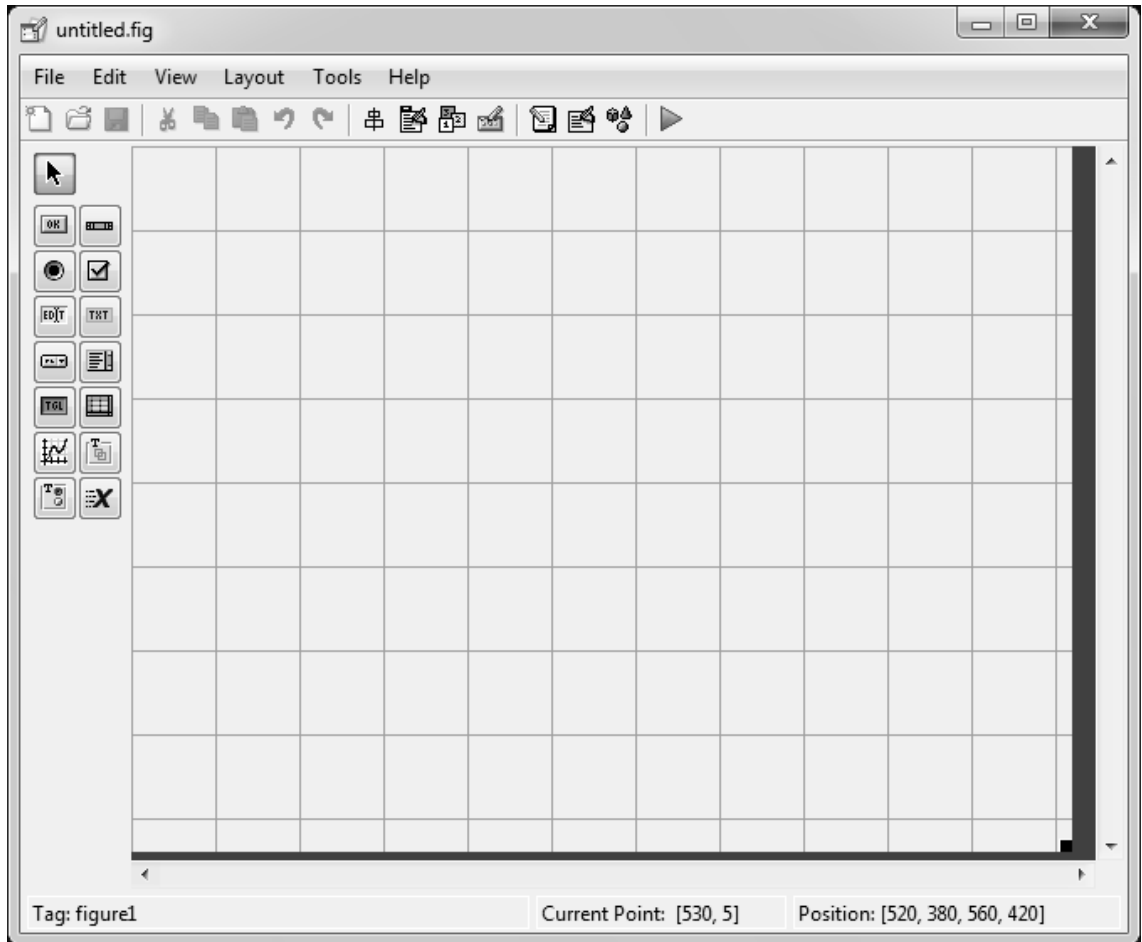
- Teknik hesap problemlerini, C, C++ ve Fortran gibi geleneksel programlama dillerinde olduğundan daha hızlı çözebilme,
- sinyal ve görüntü işleme, haberleşme, kontrol tasarımı, deneme ve ölçme, finansal modelleme ve analizi de içeren geniş bir uygulama alanı sağlama,
- ek araçlar (programdan bağımsız olarak bulunan özel amaçlı MATLAB fonksiyonları) ile MATLAB programının kullanım alanını, özel problemleri çözebilecek şekilde genişletme,
- teknik programlama için yüksek seviye dil ortamı sağlama,
- kod, dosya ve bilgi düzenleme için geliştirme ortamı içermeye,
- tekrarlayan araştırmalar, tasarım ve problem çözme için interaktif bir araç sunma,
- lineer cebir, istatistik, Fourier analizi, filtreleme, optimizasyon ve nümerik integrasyon için matematiksel fonksiyonlar içermeye,
- bilgi görselleştirme için 2-D ve 3-D grafik fonksiyonları içermeye,
- özel görsel arayüzler geliştirmek için araçlar sunma,
- MATLAB tabanlı algoritmaların C, C++, Fortran, Java, COM ve Microsoft Excel gibi dış uygulamalar ve diller ile entegrasyonu için fonksiyonlar içermeye,

#### **3.1.1. MATLAB ile Grafiksel Kullanıcı Arayüzü (GUI) Oluşturma**

Bu tez çalışmasında anlatılan program için geliştirme ortamı olarak “MATLAB GUIDE” kullanılmıştır. “GUIDE”, MATLAB için grafiksel kullanıcı arayüzü GUI (Graphical User Interface) oluşturmak için bir araç setinden oluşmuştur. Bu araçlar, GUI oluşturma işlemini oldukça basit bir hale getirmiştir. GUIDE kullanılarak aşağıdaki işlemler yapılabilmektedir [61]:

- GUIDE düzenleme editörü ile kullanıcı arayüzü elemanlarına tıklayarak ve sürükleyerek kolayca arayüzler oluşturulabilir.
- Bu elemanlar, paneller, butonlar, metin alanları, kaydırıcılar, menüler vb. olabilir. GUIDE, oluşturulan arayüz dosyasını \*.fig biçiminde kaydeder.
- GUIDE, kullanıcı arayüzünün nasıl çalışacağını kontrol eden bir MATLAB fonksiyonunu otomatik olarak oluşturur.
- Bu fonksiyondaki kod, programı başlatır ve her eleman için alt fonksiyonlar şeklinde fonksiyon şablonları (elemanlara tıklandığında yerine getirilecek işlemler) içerir.
- MATLAB editörünü kullanarak bu şablonlara istenilen işlemleri yerine getiren kodlar eklenebilmektedir.

MATLAB GUIDE programı, komut satırına guide yazıp “enter” tuşuna basılmasıyla başlar. GUIDE ana pencere görüntüsü Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. MATLAB GUIDE ana pencere görüntüsü

### 3.2. Yöntem

Bu tez çalışmasında sunulan program geliştirilmeden önce literatürdeki programlar incelenmiş olup, aralarındaki avantajlar ve dezavantajlar not edilmiştir. Literatürdeki programların hemen hepsinin ortak dezavantajı kullanımlarının karmaşık olması ve etkin kullanımları için kesir dereceli matematik bilgisi gerektirmesidir. Ayrıca literatür çalışmasında parametre belirsizliği içeren kesir dereceli kontrol sistemlerinin frekans cevaplarının hesaplanması için genel kullanımlı bir aracın mevcut olmadığı görülmüştür. Bu boşluğun doldurulmasına katkı sağlamak amacıyla aşağıda belirtilen çalışmalar yapılmıştır:

- Bütün fonksiyonların tek pencere üzerinde bulunduğu kolay kullanımlı bir program geliştirilmesi.
- Bu program ile tamsayı ve kesir dereceli sistemlerin birim basamak tepkisi, Bode, Nyquist ve Nichols grafiklerinin kolayca elde edilebilmesi.
- Parametre belirsizliği içeren sistemlerin birim basamak tepkisi, Bode, Nyquist ve Nichols grafiklerinin elde edilebilmesi.
- Ayrıca, parametre belirsizliği içeren sistemlerin Bode ve Nyquist zarflarının elde edilebilmesi.

## **4. KESİR DERECELİ KONTROL SİSTEMLERİNİN ANALİZİ İÇİN KOLAY KULLANIMLI PROGRAM GELİŞTİRİLMESİ**

Bu bölümde kesir dereceli kontrol sistemlerinin analizinde kullanılabilir bir program geliştirilmiştir. Bilindiği gibi kontrol sistemlerinin analizini yapabilmek için bu sistemlerin birim basamak tepkisi, Bode, Nyquist ve Nichols grafikleri kullanılabilir. Klasik MATLAB komutları kullanılarak kesir dereceli kontrol sistemlerinin analizini yapabilmek mümkün değildir. Bunun için bazı ek fonksiyonlara ihtiyaç vardır. Şimdiye kadar bu ek fonksiyonları içeren bazı uygulamalar geliştirilmiştir ancak Bölüm 3.2’de bahsedildiği gibi bu konuda geliştirilmiş programların kullanımı için genellikle daha fazla teorik bilgiye sahip olmak gerekmektedir. Bu alanda kesir dereceli kontrol sistemlerinin analizinde kullanılabilir kolay kullanımlı bir programa ihtiyaç olduğu açıktır. Bu tez çalışmasında geliştirilen programın amacı bu açığın kapatılmasına katkı sağlamaktır.

Bu tezde geliştirilen programla parametre belirsizliği içeren sistemlerin belirsiz parametre aralığında birim basamak tepkisi, Bode, Nyquist ve Nichols çizimleri elde edilebilmekte, ayrıca bu sistemlerin Bode ve Nyquist zarfları oluşturulabilmektedir. Dolayısıyla, bu tezle genel kullanıma hitap eden, özellikle lisansüstü öğrencilerinin daha kolay kullanabileceği bir araç geliştirilmeye çalışılmıştır.

Bu bölümde, kesir dereceli kontrol sistemlerinin analizi konusunda literatürde mevcut bazı programlar hakkında özet bilgi verilmiştir. Daha sonra tez çalışmasında geliştirilen programdan ve bu programın kullanımından söz edilmiştir.

### **4.1. Literatürde Bu Konuda Yapılmış Mevcut Bazı Çalışmalar**

Yaptığımız literatür çalışmasında, kesir dereceli kontrol sistemlerinin analizi için kullanılabilir mevcut bazı programlar incelenmiştir. Bu bölümde, incelenen üç program hakkında kısaca bilgi verilmektedir.

#### **4.1.1. CRONE Toolbox**

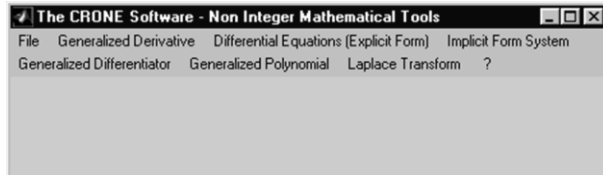
MATLAB ortamında kesir dereceli sistemlerin dayanıklı kontrolü için geliştirilmiş olan CRONE programı, mühendislere ve matematik alanında çalışan araştırmacılara, özellikle elektrik – elektronik mühendisliğine ve otomatik kontrol ile ilgilenenlere

sunulmuştur [46]. Bu program üç modülden oluşmuştur. Her modül kesirli türevin özel bazı uygulamaları ile ilgilenir.

Matematik araçları modülü, kesir dereceli veya kompleks dereceli türevlerin kullanımına olanak sağlayan bütün algoritmaları içerir. Bu modül de kendi içinde 6 üniteden oluşmaktadır.

Kesirli model tanımlama modülü sistemlerin kesir dereceli modeli için kullanılmaktadır. Sistem tanımlamanın hedefi, sistemin fiziksel davranışını en iyi şekilde gösteren matematik modelini, bir takım gözlemlerden sonra elde etmektir. Kesir dereceli sistemlerin analizinde, sistemlerin tam sayı dereceli karşılığını kullanmak çok uygun olmamaktadır. Bu nedenle kesir dereceli model elde edilmektedir [46].

CRONE CSD (Control System Design) modülü, tek giriş tek çıkışlı, birim geri beslemeli sistemlerin dayanıklı kontrolü için lineer bir frekans bölgesi yaklaşımıdır. Üç adet CRONE CSD yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemlerde kesir dereceli türevleme kullanılarak kontrolör veya açık çevrim transfer fonksiyonu tanımlanmıştır. CRONE programı ana pencere görüntüsü Şekil 4.1’de gösterilmektedir.



Şekil 4.1. CRONE ana pencere görüntüsü

Daha fazla bilgi için aşağıdaki internet adresinden ilgili belge indirilebilir:

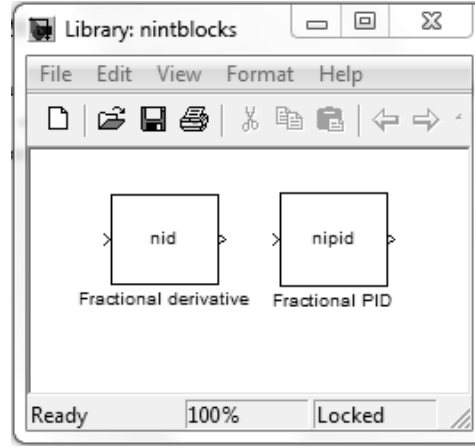
<http://mechatronics.ece.usu.edu/foc/cdc02tw/cdrom/Lectures/AppendixA/CACSD2000.pdf>

İç içe entegre edilmiş birçok pencereden oluşan CRONE programının görsel açıdan karışık olması ve kullanımı için matematiksel denklemlerin iyi bilinmesinin gerekmesi birer dezavantaj olarak ortaya çıkmaktadır.

#### 4.1.2. Toolbox “ninteger” for MATLAB

Valerio [50], ilk olarak 2000 yılında portekizce bir toolbox geliştirmiş ve son şeklini 2005 yılında “Toolbox ‘ninteger’ for MATLAB v. 2.3” adıyla yayınlamıştır. Bu program, MATLAB’da kesir dereceli kontrol sistemlerinin analizi için gerekli bir algoritma seti ihtiyacından dolayı geliştirilmiştir. “ninteger”, hem zaman bölgesinde,

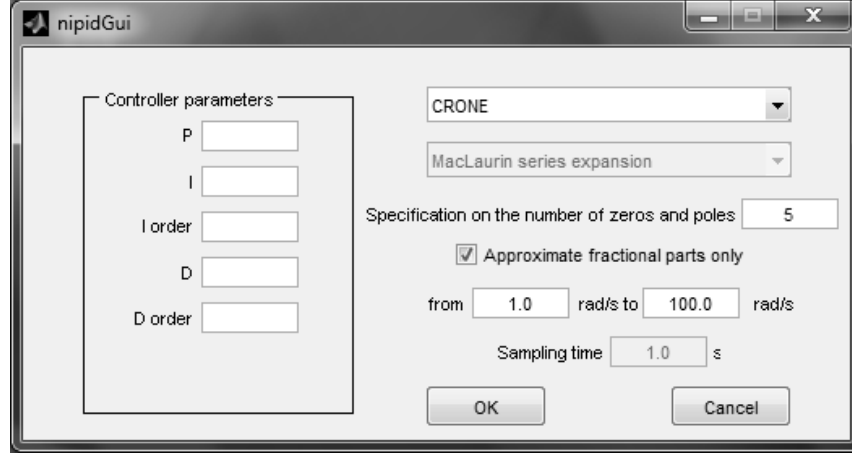
hem de frekans bölgesinde kesir dereceli, tek giriş tek çıkış kontrolörler geliştirmeye yardımcı olmak için MATLAB ortamında yazılmış bir programdır. İnternet üzerinden ücretsiz indirilip kullanılmaya uygundur. Bu program, frekans ve ayırık zaman bölgelerinde kesir dereceli kontrolörler oluşturmada kullanılabilir. Kesir dereceli türevler oluşturmak için 30 ‘dan fazla formül ve yaklaşım kullanılmıştır. Tam sayılı olmayan PID gibi yapılar doğrudan mevcuttur. Bu programla ikinci ve üçüncü nesil CRONE kontrolörler de hesaplanabilir [50]. Modelleri tanımlamak ve frekans diyagramlarını çizdirmek için fonksiyonlar vardır. Bir görsel arayüz ile interaktif olarak parametreler seçilebilir ve performansın nasıl olacağı görülebilir. Ayrıca program, bir simulink kütüphanesi içerir. Şekil 4.2’de “ninteger” programının simulink kütüphanesinden bir pencere gösterilmiştir. Şekil 4.3’te ise “ninteger” programının PID kontrolör analiz ekranı görülmektedir.



Şekil 4.2. “ninteger” programının Simulink kütüphanesinden bir görüntü

“Toolbox ‘ninteger’ for MATLAB v. 2.3” programının simulink kütüphanesi basit yapılmış ama MATLAB konsol ortamında çalışan kısmı, çok sayıda \*.m dosyası içermekte ve kullanımı konusunda zorluklar karşımıza çıkmaktadır. Bu programı kullanmak için kesir dereceli kontrol sistemlerinin teorisinin iyi bilinmesine ve programa ait kullanma klavuzunun dikkatle incelenmesine ihtiyaç vardır. Daha fazla bilgi için aşağıdaki internet adresinden ilgili dosya indirilebilir:

<http://web.ist.utl.pt/duarte.valerio/FDA04T.pdf>



Şekil 4.3. “ninteger” programının PID kontrolör analiz ekranı

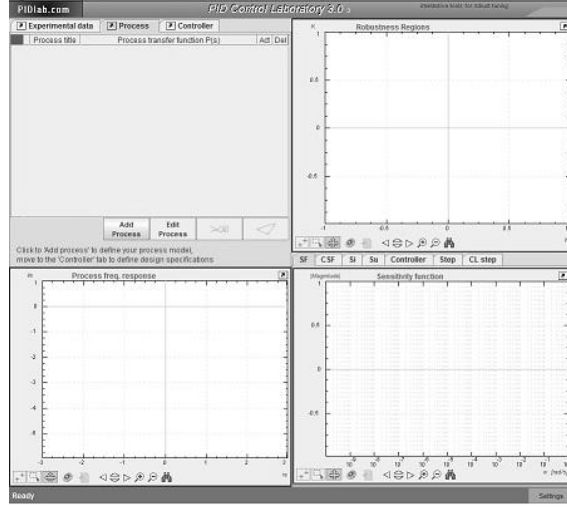
#### 4.1.3. PID Control Laboratory 3.0

“PID Control Laboratory 3.0”, doğrudan internet üzerinden kullanılabileceği gibi, bilgisayarınıza indirip kullanabileceğiniz bir Java uygulama programıdır [51]. [www.pidlab.com](http://www.pidlab.com) adresinden erişilebilen PID Control Laboratory, önceki programların aksine bir MATLAB tabanlı program değildir. Java Runtime Environment (JRE) kurulu bütün bilgisayarlarda çalışmaktadır. Görsel bakımdan başarılı olan bu programda, transfer fonksiyonu girişi 4 farklı şekilde yapılabilmektedir. Kontrolör girişi de “PID”, “PI”, “PD” ve “FPID” olarak 4 şekilde yapılabilmektedir. Site üzerinde ayrıca PID kontrolör tasarımı için hazırlanmış “PID Controller Designer 2.5” ve “PID Controller Designer 2.0” adlı iki Java uygulaması da mevcuttur. PID Control Laboratory 3.0 programında elde edilebilecek çizimlerden bazıları aşağıda gösterilmiştir:

- Sistemin frekans cevabı
- Nyquist grafiği
- Faz ve kazanç payları
- Hassaslık ve tamamlayıcı hassaslık fonksiyonları
- M daireleri

Şekil 4.4’te “PID Control Laboratory 3.0” ana pencere görüntüsü verilmiştir. Bu program görsel bakımdan başarılı olsa da kullanımının oldukça karmaşık olması bir dezavantaj olarak karşımıza çıkmaktadır. Program kullanılmadan önce aşağıdaki internet adresinde verilen kullanma klavuzunun dikkatle incelenmesinde yarar vardır.

[http://www.rexcontrols.com/downloads/clanky/fpidlabGuide\\_ENG.pdf](http://www.rexcontrols.com/downloads/clanky/fpidlabGuide_ENG.pdf)



Şekil 4.4. PID Control Laboratory 3.0 ana pencere görüntüsü

## 4.2. Kesir Dereceli Kontrol Sistemlerinin Analizi İçin Program Geliştirilmesi

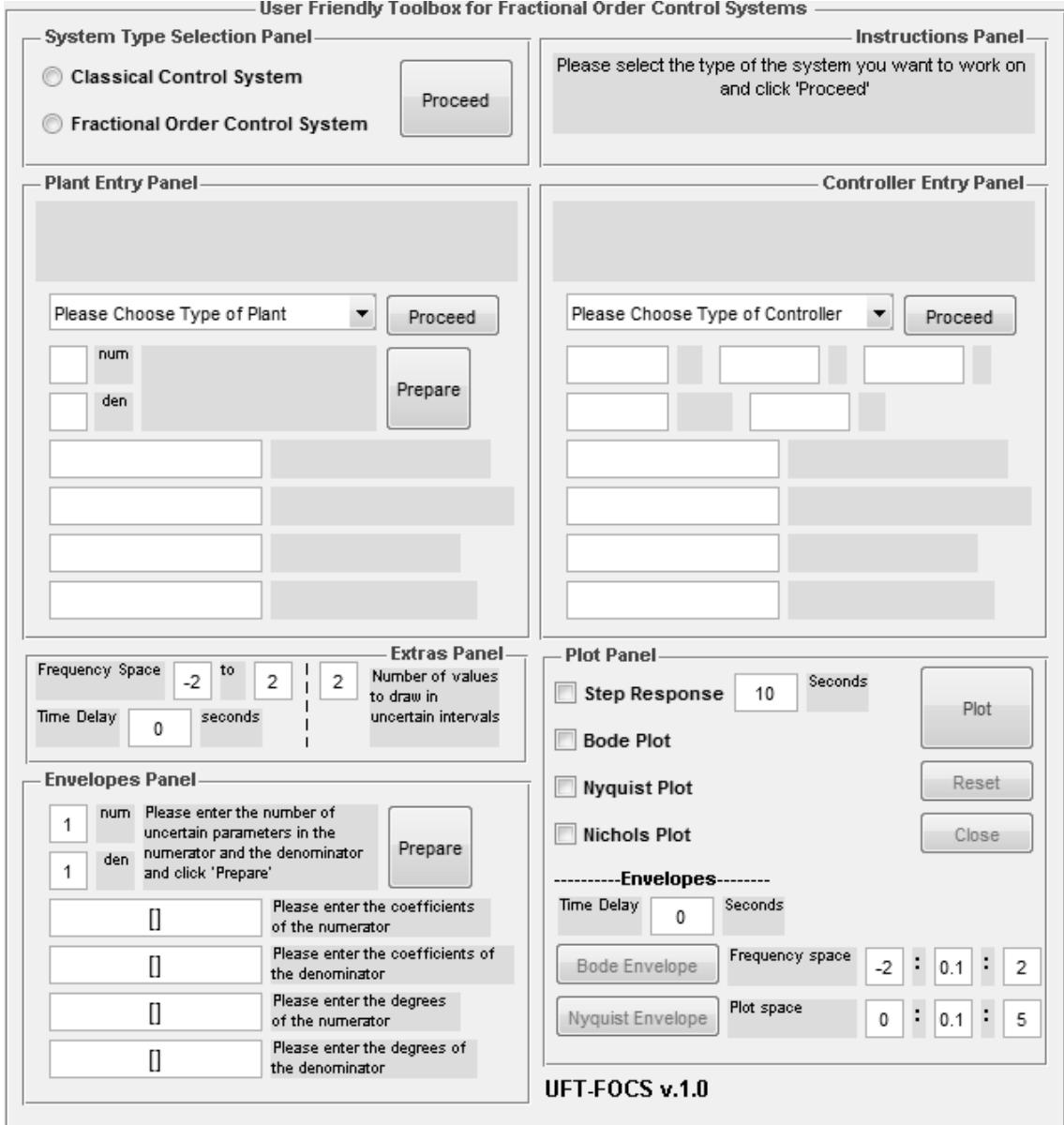
Bu bölümde geliştirilen program “UFT-FOCS” olarak adlandırılmıştır. UFT-FOCS programında kesir dereceli kontrol sistemlerinin analizi için kullanılan bazı MATLAB fonksiyonları bulunmaktadır. Kesir dereceli transfer fonksiyonlarına ait birim basamak tepkisi, Bode, Nichols ve Nyquist grafiklerinin elde edilmesinde yardımcı fonksiyonlar için [62]’den faydalanılmıştır. Bode ve Nyquist zarflarının çizilmesinde yardımcı fonksiyonlar için [63]’den faydalanılmıştır.

Programı çalıştırmak için MATLAB konsol ekranına (command window) *main\_window* komutunu yazıp “enter” tuşuna basmak yeterlidir. Bu komutu yazarken “current folder” penceresinden programın yüklü olduğu klasörün seçilmiş olmasına dikkat edilmelidir.

Programın ilk açıldığındaki ekran görüntüsü Şekil 4.5’te verilmiştir. Daha önce de bahsedildiği gibi genel kullanıma hitap etmesi açısından UFT – FOCS menüleri İngilizce olarak hazırlanmıştır.

### 4.2.1. Program pencerelerinin tanıtımı

Görüldüğü gibi UFT-FOCS programının arayüzü 7 adet pencereden oluşmuştur. Bu bölümde tek tek bütün pencereler ve yerine getirdikleri işlevler hakkında bilgi verilmiştir. Bütün fonksiyonların tek pencere üzerinde toplanmış olması kullanım kolaylığı açısından önemli avantaj sağlamaktadır.



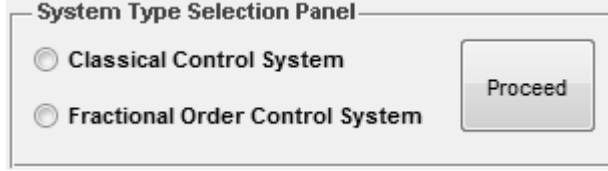
Şekil 4.5. UFT – FOCS v.1.0 programının ana pencere görüntüsü

**a) Sistem Tipi Seçim Paneli (System Type Selection Panel):**

“System Type Selection Panel”, üzerinde çalışılmak istenen sistemin tamsayı dereceli mi yoksa kesir dereceli mi olduğunun seçildiği penceredir. Bu panelde şu bölümler mevcuttur:

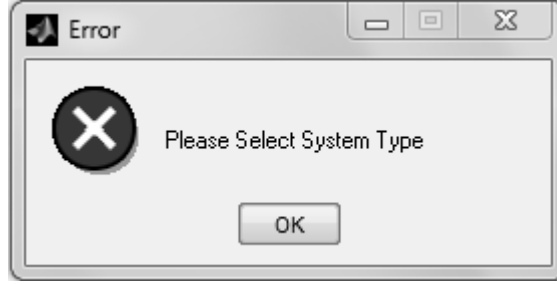
- sistem tipi seçmek için iki adet seçme alanı,
- fonksiyonların çalışması için bir adet buton.

Pencereye ait görüntü Şekil 4.6’da verilmiştir. Bu pencerede sistem tipi seçildikten sonra “Proceed” butonu tıklanmalıdır.



Şekil 4.6. Sistem tipi seçim paneli

Gerekli seçim yapılmadan “*Proceed*” butonuna tıklanıldığında veya seçim yapılmadan transfer fonksiyonu oluşturma pencereleri kullanıldığında ekranda Şekil 4.7’de görülen hata mesajı belirmektedir.



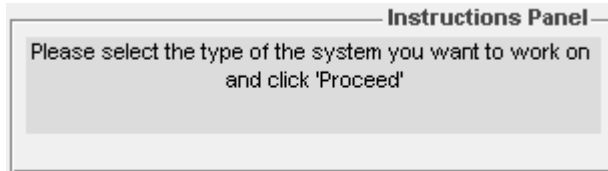
Şekil 4.7. Sistem tipi seçilmediğinde beliren hata mesajı

#### **b) Yönlendirme Paneli (Instructions Panel):**

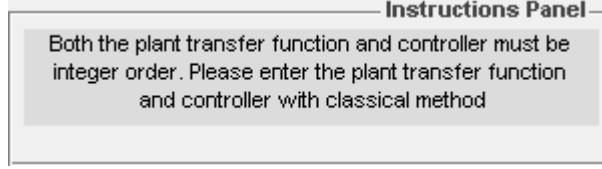
Sistem tipi seçildikten sonra yapılması gereken işlemin açıklamasının yer aldığı penceredir. Bu panelde açıklamaların yer aldığı bir alan mevcuttur.

İlk anda bu alanda Şekil 4.8’de görüldüğü gibi “*Lütfen çalışmak istediğiniz kontrol sistemi tipini seçiniz ve ‘Proceed’ butonuna tıklayınız*” ifadesi vardır.

Sistem tipi seçim panelinden klasik kontrol sistemi seçildiğinde bu pencerede Şekil 4.9’da görüldüğü gibi “*Hem kontrol edilmek istenen sistem transfer fonksiyonu, hem de kontrolör tamsayı dereceli olmalıdır. Lütfen sistem transfer fonksiyonunu ve kontrolörü klasik yöntem ile giriniz*” ifadesi belirmektedir.

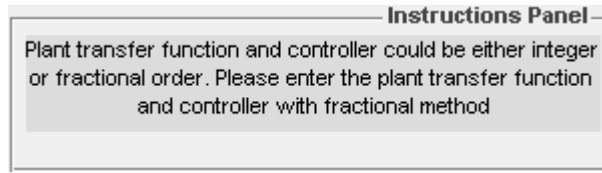


Şekil 4.8. Yönlendirme paneli



Şekil 4.9. Yönlendirme paneli (tamsayı dereceli sistem)

Sistem tipi seçim penceresinden kesir dereceli kontrol sistemi seçildiğinde ise Şekil 4.10'da gösterilen “*Kontrol edilmek istenen sistem transfer fonksiyonu ve kontrolör tamsayı dereceli veya kesir dereceli olabilir. Lütfen sistem transfer fonksiyonunu ve kontrolörü kesir dereceli yöntem ile giriniz*” ifadesi belirmektedir.



Şekil 4.10. Yönlendirme paneli (kesir dereceli sistem)

### c) Kontrol Edilmek İstenen Sistem Giriş Paneli (Plant Entry Panel)

Kontrol edilmek istenen sistemin transfer fonksiyonunun tanımlandığı penceredir. Bu panelin genel görüntüsü Şekil 4.11'de verilmiştir. Bu panelde aşağıdaki bölümler mevcuttur:

- Bir adet genel açıklama bölümü,
- transfer fonksiyonu tipini seçmek için bir adet açılır menü,
- transfer fonksiyonunu tanımlamak için altı adet giriş alanı,
- giriş alanları için açıklama bölümleri,
- fonksiyonları çalıştıran iki adet buton.

Sistem giriş paneli genel açıklama bölümünde seçilen kontrol sisteminin tipine göre gerekli yönlendirme ekrana gelmektedir.

Sistem tipi seçim panelinden klasik kontrol sistemi seçildiğinde bu bölümde Şekil 4.12'de görülen, “*Lütfen ‘tamsayı dereceli transfer fonksiyonu’ veya ‘belirsiz parametre içeren tamsayı dereceli transfer fonksiyonu’ seçeneğini işaretleyiniz ve ‘Proceed’ butonuna tıklayınız. Gerekli alanlara ‘[ ]’ (köşeli parantez) simgeleri yerleştirilecektir*” ifadesi belirmektedir.

Şekil 4.11. Kontrol edilmek istenen sistem giriş paneli

Sistem tipi seçim penceresinden kesir dereceli kontrol sistemi seçildiğinde ise Şekil 4.13'te verilen “*Lütfen ‘kesir dereceli transfer fonksiyonu’ veya ‘belirsiz parametre içeren kesir dereceli transfer fonksiyonu’ seçeneğini işaretleyiniz ve ‘Proceed’ butonuna tıklayınız. Gerekli alanlara ‘[ ]’ (köşeli parantez) simgeleri yerleştirilecektir*” ifadesi belirmektedir.

Please select "Integer Order TF" or "Integer Order TF with Parametric Uncertainty" and click Proceed. Required fields will already have "[ ]" written

Şekil 4.12. Tamsayı dereceli sistemler için yönlendirme

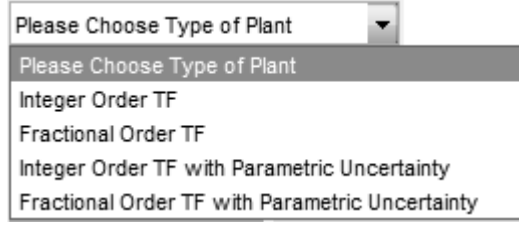
Please select "Fractional Order TF" or "Fractional Order TF with Parametric Uncertainty" and click Proceed. Required fields will already have "[ ]" written

Şekil 4.13. Kesir dereceli sistemler için yönlendirme

Sistem tipi seçim panelindeki açılır menüde Şekil 4.14'te görüldüğü gibi seçilen sistem tipine göre alınabilecek toplam dört adet transfer fonksiyonu tipi mevcuttur. Aşağıda verilen seçeneklerden istenilen işaretlenebilir:

- Klasik tamsayı dereceli sistemler için “*Integer Order TF*”,
- kesir dereceli sistemler için “*Fractional Order TF*”,
- parametre belirsizliği içeren tamsayı dereceli sistemler için “*Integer Order TF with Parametric Uncertainty*”,

- parametre belirsizliği içeren kesir dereceli sistemler için de “*Fractional Order TF with Parametric Uncertainty*”.



Şekil 4.14. Kontrol edilmek istenen sistem giriş paneli açılır menü seçenekleri

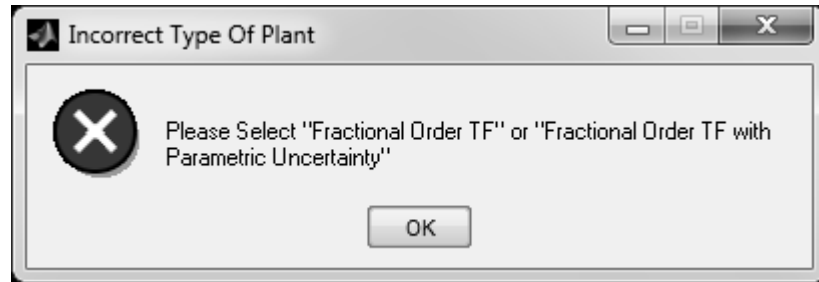
Bu seçimi yaparken sistem tipi seçim panelinden yapılan tercih gözönünde bulundurulmalı ve şu bilgiler dikkate alınmalıdır.

Sistem tipi olarak klasik kontrol sistemi seçilmiş ise açılır menüden “*Integer Order TF*” veya “*Integer Order TF with Parametric Uncertainty*” seçeneklerinden biri seçilmelidir. Sistem tipi olarak kesir dereceli sistem seçilmiş ise de açılır menüden “*Fractional Order TF*” veya “*Fractional Order TF with Parametric Uncertainty*” seçeneklerinden biri seçilmelidir.

Bu seçimler birbiri ile uyumsuz yapıldığı takdirde Şekil 4.15 ve Şekil 4.16’da verilen hata mesajları ekranda belirlemektedir.



Şekil 4.15. Uyumsuz seçim yapıldığında ekrana gelen hata mesajı (tamsayı dereceli sistem)

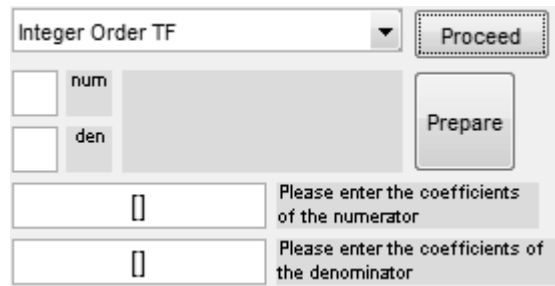


Şekil 4.16. Uyumsuz seçim yapıldığında ekrana gelen hata mesajı (kesir dereceli sistem)

Açılır menüden seçim yapıldıktan sonra “Proceed” butonuna tıklanmalıdır. Bu buton açılır menüden yapılan seçime göre doldurulması gereken alanları ve bu alanlara ait açıklamaları ekrana getirir. Açılır menüdeki seçeneklerde bulunan transfer fonksiyonları sırasıyla şöyle kullanılabilir:

**i. Tamsayı Dereceli Transfer Fonksiyonu (Integer Order TF)**

Menüden “Integer Order TF” seçeneği işaretlenmiş ise, Şekil 4.17’de görülen ve köşeli parantez simgeleri olan iki alana transfer fonksiyonunun pay ve paydasına ait katsayılar sırasıyla girilmelidir. Bu alandaki giriş şekli standart MATLAB transfer fonksiyonu tanımlama işlemi ile aynıdır.



Şekil 4.17. Tamsayı dereceli sistem giriş alanları

- Şekil 4.17’de köşeli parantezlerle belirtilen alanlardan üstteki pay (coefficients of the numerator) alanına girilen katsayılar  $[a_n \dots a_2 a_1 a_0]$  transfer fonksiyonunun payına ait katsayılar olacaktır.
- Alttaki payda (coefficients of the denominator) alanına girilen katsayılar  $[b_m \dots b_2 b_1 b_0]$  da transfer fonksiyonunun paydasına ait katsayılardır.

Bu şekilde yapılan girişte transfer fonksiyonu aşağıdaki şekilde tamsayı dereceli olarak tanımlanmış olur.

$$G(s) = \frac{a_n s^n + \dots + a_2 s^2 + a_1 s + a_0}{b_m s^m + \dots + b_2 s^2 + b_1 s + b_0} \quad (4.1)$$

**ii. Kesir Dereceli Transfer Fonksiyonu (Fractional Order TF)**

Açılır menüden “Fractional Order TF” seçeneği işaretlenmiş ise Şekil 4.18’de görülen ve köşeli parantez simgeleri olan dört adet giriş alanının uygun şekilde doldurulması gerekmektedir.

Şekil 4.18. Kesir dereceli sistem giriş alanları

Bu alandaki giriş şekli standart MATLAB transfer fonksiyonu giriş işleminden farklılık göstermektedir. Fazladan istenen iki giriş alanındaki veriler sırasıyla transfer fonksiyonunun pay ve paydasına ait dereceleri belirtmektedir. Pay, payda, payın derecesi ve paydanın derecesi sırasıyla şöyle girilir.

- Şekil 4.18’de görülen ve köşeli parantezlerle belirtilen pay katsayıları (coefficients of the numerator) alanına girilen değerler  $[a_n \dots a_2 a_1 a_0]$  transfer fonksiyonunun payına ait katsayılar olarak kullanılacaktır.
- Payda katsayıları (coefficients of the denominator) alanına girilen değerler  $[b_m \dots b_2 b_1 b_0]$  de transfer fonksiyonunun paydasına ait katsayılar olarak kullanılacaktır.
- Pay dereceleri (degrees of the numerator) alanına girilen değerler,  $[\alpha_n \dots \alpha_2 \alpha_1 \alpha_0]$  transfer fonksiyonunun payına ait girilen katsayıların derecelerini oluşturmaktadır.
- Payda dereceleri (degrees of the denominator) alanına girilen değerler  $[\beta_m \dots \beta_2 \beta_1 \beta_0]$  ise transfer fonksiyonunun paydasına ait girilen katsayıların derecelerini oluşturmaktadır.

Pay ve payda dereceleri alanlarına girilen değerler tamsayı olduğunda tamsayı dereceli bir transfer fonksiyonu elde edilmiş olur. Bu şekilde yapılan girişte transfer fonksiyonu aşağıdaki şekilde kesir dereceli olarak tanımlanmış olmaktadır.

$$G(s) = \frac{a_n s^{\alpha_n} + \dots + a_2 s^{\alpha_2} + a_1 s^{\alpha_1} + a_0 s^{\alpha_0}}{b_m s^{\beta_m} + \dots + b_2 s^{\beta_2} + b_1 s^{\beta_1} + b_0 s^{\beta_0}} \quad (4.2)$$

Burada, pay için ve payda için girilen katsayı ve derece değerlerinin kendi içlerinde eşit sayıda olmasına dikkat edilmelidir.

### iii. Parametre Belirsizliği İçeren Tamsayı Dereceli Transfer Fonksiyonu (Integer Order TF with Parametric Uncertainty)

Açılır menüden “Integer Order TF with Parametric Uncertainty” seçeneği işaretlendiğinde Şekil 4.19’da gösterilen ve “num”, “den” ile işaret edilen alanların ve köşeli parantez simgeleri olan iki alanın uygun şekilde doldurulması gerekmektedir.

Integer Order TF with Parametric ...		Proceed	
1	num	Please enter the number of uncertain parameters in the numerator and the denominator and click Prepare	Prepare
1	den		
		Please enter the coefficients of the numerator	
		Please enter the coefficients of the denominator	

Şekil 4.19. Parametre belirsizliği içeren tamsayı dereceli sistem giriş alanları

Bu şekilde gösterilen transfer fonksiyonu giriş alanları standart MATLAB transfer fonksiyonu tanımlama işlemi ile aynıdır. Tek farklı yanı, bu giriş şeklinde katsayıların tek bir değer değil, bir aralık şeklinde girilmesidir. Bu alanlara veri girişi şöyle yapılabilir:

- Yukarıdaki “num” ve “den” kutularına girilen değerler sırasıyla pay ve paydadaki değişken aralıkların kaç adet olduğunu belirlemektedir. Bu program için belirsiz parametre aralığı sayısı en fazla “5” olacak şekilde belirlenmiştir. Programın sonraki sürümlerinde bu özelliğe iyileştirme yapılabilir.
- Bu değerler girildiğinde ve “Prepare” butonuna tıklandığında katsayıların girileceği alanda, girilen değerlere göre kolaylık sağlayacak bir düzenleme yapılacaktır.
- Belirsiz parametre içeren transfer fonksiyonu girişi için pay ve paydadaki belirsiz parametrelerin alt ve üst limitleri, belli bir düzen içinde girilmelidir.
- Şekil 4.19’da görülen ve köşeli parantezlerle belirtilen pay katsayıları (coefficients of the numerator) alanına girilen değerler  $[[\underline{a}_n \bar{a}_n], \dots, [\underline{a}_2 \bar{a}_2], [\underline{a}_1 \bar{a}_1], [\underline{a}_0 \bar{a}_0]]$  transfer fonksiyonunun payına ait katsayıların alt ve üst limitleri olacaktır.
- Payda katsayıları (coefficients of the denominator) alanına girilen değerler  $[[\underline{b}_m \bar{b}_m], \dots, [\underline{b}_2 \bar{b}_2], [\underline{b}_1 \bar{b}_1], [\underline{b}_0 \bar{b}_0]]$  de transfer fonksiyonunun paydasına ait katsayıların alt ve üst limitleri olacaktır.

Bu şekilde giriş yapıldıktan sonra aşağıda gösterilen transfer fonksiyonu elde edilmiş olmaktadır.

$$G(s) = \frac{[\underline{a}_n \bar{a}_n]s^n + \dots + [\underline{a}_2 \bar{a}_2]s^2 + [\underline{a}_1 \bar{a}_1]s + [\underline{a}_0 \bar{a}_0]}{[\underline{b}_m \bar{b}_m]s^m + \dots + [\underline{b}_2 \bar{b}_2]s^2 + [\underline{b}_1 \bar{b}_1]s + [\underline{b}_0 \bar{b}_0]} \quad (4.3)$$

Buradaki altı çizili değerler belirsiz parametrenin alt sınırını, üstü çizili değerler de belirsiz parametrenin üst sınırını belirlemektedir.

#### iv. Parametre Belirsizliği İçeren Kesir Dereceli Transfer Fonksiyonu (Fractional Order TF with Parametric Uncertainty)

Açılır menüden “Fractional Order TF with Parametric Uncertainty” seçeneği işaretlendiğinde Şekil 4.20’de gösterilen ve “num”, “den” ile işaret edilen alanların ve köşeli parantez simgeleri olan dört alanın uygun şekilde doldurulması gerekmektedir. Bu şekildeki girişte yukarıda anlatılan kesir dereceli transfer fonksiyonu tanımlama yöntemi kullanılacaktır. Tek fark, pay ve paydanın belirsiz parametreler içeriyor olmasıdır. Bu seçenekte girişler şöyle yapılabilir:

- Yukarıdaki “num” ve “den” kutularına girilen değerler sırasıyla pay ve paydadaki değişken aralıkların kaç adet olduğunu belirlemektedir. Bu alanlara girilen değerler en fazla “5” olabilir.
- Bu değerler girildiğinde ve “Prepare” butonuna tıkladığında katsayıların ve üslerin girileceği alanda, girilen değerlere göre kolaylık sağlayacak bir düzenleme yapılacaktır.
- Belirsiz parametre içeren transfer fonksiyonu girişi için pay ve paydadaki belirsiz parametrelerin alt ve üst limitleri ve girilen aralıklara ait üsler belli bir düzen içinde girilmelidir.

The screenshot shows a software interface for entering parameters for a fractional order transfer function with parametric uncertainty. At the top, there is a dropdown menu labeled "Fractional Order TF with Parametr..." and a "Proceed" button. Below this, there are two input fields: "num" and "den", both set to "1". To the right of these fields is a "Prepare" button. Below the "num" and "den" fields, there are four input fields for coefficients and degrees. The first two fields are for coefficients, and the last two are for degrees. Each of these four fields has a corresponding instruction: "Please enter the coefficients of the numerator", "Please enter the coefficients of the denominator", "Please enter the degrees of the numerator", and "Please enter the degrees of the denominator".

Şekil 4.20. Parametre belirsizliği içeren kesir dereceli sistem giriş alanları

- Şekil 4.20’de görülen ve köşeli parantezlerle belirtilen pay katsayıları (coefficients of the numerator) alanına girilen değerler  $[[\underline{a}_n \bar{a}_n], \dots, [\underline{a}_2 \bar{a}_2], [\underline{a}_1 \bar{a}_1], [\underline{a}_0 \bar{a}_0]]$  transfer fonksiyonunun payına ait katsayıların alt ve üst limitleri olacaktır.
- Payda katsayıları (coefficients of the denominator) alanına girilen değerler  $[[\underline{b}_m \bar{b}_m], \dots, [\underline{b}_2 \bar{b}_2], [\underline{b}_1 \bar{b}_1], [\underline{b}_0 \bar{b}_0]]$  de transfer fonksiyonunun paydasına ait katsayıların alt ve üst limitleri olacaktır.
- Pay dereceleri (degrees of the numerator) alanına girilen değerler,  $[\alpha_n \dots \alpha_2 \alpha_1 \alpha_0]$  transfer fonksiyonunun payına ait girilen katsayı aralıklarının derecelerini oluşturmaktadır.
- Payda dereceleri (degrees of the denominator) alanına girilen değerler  $[\beta_m \dots \beta_2 \beta_1 \beta_0]$  ise transfer fonksiyonunun paydasına ait girilen katsayı aralıklarının derecelerini oluşturmaktadır.

Bu şekilde giriş yapıldıktan sonra aşağıdaki, parametre belirsizliği içeren kesir dereceli transfer fonksiyonu elde edilmiş olur. Burada, pay için ve payda için girilen aralık sayısının ve üs sayısının kendi içlerinde eşit olmasına dikkat edilmelidir.

$$G(s) = \frac{[\underline{a}_n \bar{a}_n]s^{\alpha_n} + \dots + [\underline{a}_2 \bar{a}_2]s^{\alpha_2} + [\underline{a}_1 \bar{a}_1]s^{\alpha_1} + [\underline{a}_0 \bar{a}_0]s^{\alpha_0}}{[\underline{b}_m \bar{b}_m]s^{\beta_m} + \dots + [\underline{b}_2 \bar{b}_2]s^{\beta_2} + [\underline{b}_1 \bar{b}_1]s^{\beta_1} + [\underline{b}_0 \bar{b}_0]s^{\beta_0}} \quad (4.4)$$

Pay ve payda dereceleri alanlarına girilen değerler tamsayı olduğunda parametre belirsizliği içeren tamsayı dereceli bir transfer fonksiyonu elde edilmiş olur.

#### **d) Kontrolör Giriş Paneli (Controller Entry Panel)**

Kontrolör transfer fonksiyonunun tanımlandığı penceredir. Bu pencereye ait görüntü Şekil 4.21’de verilmiştir. Bu panelde aşağıdaki bölümler mevcuttur:

- bir adet genel açıklama bölümü,
- transfer fonksiyonu tipini seçmek için bir adet açılır menü,
- transfer fonksiyonunu tanımlamak için dokuz adet giriş alanı,
- giriş alanları için açıklama bölümleri,
- fonksiyonları çalıştıran bir adet buton.

Şekil 4.21. Kontrolör giriş paneli

Genel açıklama bölümünde seçilen kontrol sisteminin tipine göre gerekli yönlendirme ekrana gelmektedir.

Sistem tipi seçim panelinden klasik kontrol sistemi seçildiğinde Şekil 4.22’de görüldüğü gibi bu bölümde, “*Lütfen ‘tamsayı dereceli kontrolör’ veya ‘PID’ seçeneğini işaretleyiniz ve ‘Proceed’ butonuna tıklayınız. Gerekli alanlara ‘[ ]’ (köşeli parantez) simgeleri yerleştirilecektir*” ifadesi belirmektedir.

Sistem tipi seçim penceresinden kesir dereceli kontrol sistemi seçildiğinde ise Şekil 4.23’te görüldüğü gibi “*Lütfen ‘kesir dereceli kontrolör’ veya ‘kesir dereceli PID’ seçeneğini işaretleyiniz ve ‘Proceed’ butonuna tıklayınız. Gerekli alanlara ‘[ ]’ (köşeli parantez) simgeleri yerleştirilecektir*” ifadesi belirmektedir.

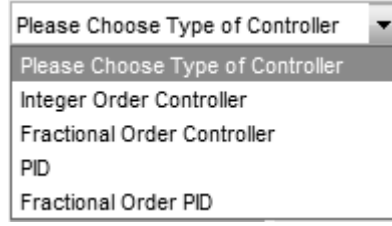
Please select "Integer Order Controller" or "PID" and click Proceed. Required fields will already have "[ ]" written

Şekil 4.22. Tamsayı dereceli sistemler için yönlendirme

Please select "Fractional Order Controller" or "Fractional Order PID" and click Proceed. Required fields will already have "[ ]" written

Şekil 4.23. Kesir dereceli sistemler için yönlendirme

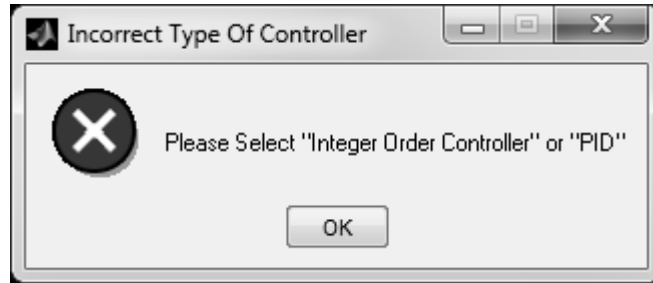
Kontrolör giriş panelindeki açılır menüde seçilen sistem tipine göre kullanılacak Şekil 4.24’te görülen toplam dört adet transfer fonksiyonu tipi mevcuttur. İstenilen kontrolör tipine göre aşağıdaki seçeneklerden biri işaretlenebilir:



Şekil 4.24. Kontrolör giriş paneli açılır menü seçenekleri

- Klasik tamsayı dereceli transfer fonksiyonu formundaki kontrolör için “*Integer Order Controller*”,
- kesir dereceli transfer fonksiyonu formundaki kontrolör için “*Fractional Order Controller*”
- klasik oransal-integral-türevsel (PID) kontrolör için “*PID*”,
- kesir dereceli PID ( $PI^\lambda D^\mu$ ) için “*Fractional Order PID*”.

Bu seçimi yaparken sistem tipi seçim panelinden yapılan tercih gözönünde bulundurulmalıdır. Seçimler birbiri ile uyumsuz yapıldığı takdirde ekranda Şekil 4.25 ve Şekil 4.26’da gösterilen hata mesajları belirmektedir. Açılır menüden seçim yapıldıktan sonra “Proceed” butonuna tıklanmalıdır. Bu buton açılır menüden yapılan seçime göre doldurulması gereken alanları ve bu alanlara ait açıklamaları ekrana getirir.



Şekil 4.25. Uyumsuz seçim yapıldığında ekrana gelen hata mesajı (tamsayı dereceli kontrolör)

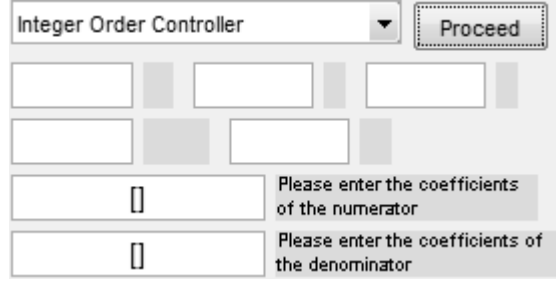


Şekil 4.26. Uyumsuz seçim yapıldığında ekrana gelen hata mesajı (kesir dereceli kontrolör)

Açılır menüden seçilen kontrolör tipine göre veri girişi sırasıyla şöyle yapılabilir:

### i. Tamsayı Dereceli Kontrolör (Integer Order Controller)

Eğer kullanılan kontrolör transfer fonksiyonu formunda ise bu seçenek kullanılır. Menüden “Integer Order Controller” seçeneği işaretlenmiş ise, Şekil 4.27’de görülen ve köşeli parantez simgeleri olan iki alana kontrolör transfer fonksiyonunun pay ve paydasına ait katsayılar girilmelidir.



Şekil 4.27. Tamsayı dereceli kontrolör giriş alanları

Bu alandaki giriş şekli Bölüm 4.2.1’de c başlığı, i alt başlığında anlatıldığı gibidir ve standart MATLAB transfer fonksiyonu tanımlama işlemi ile aynıdır.

Bu şekilde yapılan girişte kontrolör aşağıdaki şekilde tamsayı dereceli transfer fonksiyonu formunda tanımlanmış olur.

$$C(s) = \frac{a_n s^n + \dots + a_2 s^2 + a_1 s + a_0}{b_m s^m + \dots + b_2 s^2 + b_1 s + b_0} \quad (4.5)$$

Sistemde kontrolör olmadığı durumda  $C(s) = 1$  durumunu sağlamak için köşeli parantezlerle gösterilen iki alana da [1] yazılması yeterlidir.

### ii. Kesir Dereceli Kontrolör (Fractional Order Controller)

Eğer kullanılan kontrolör kesir dereceli transfer fonksiyonu formunda ise bu seçenek kullanılır. Açılır menüden “Fractional Order Controller” seçeneği işaretlenmiş ise Şekil 4.28’de görülen ve köşeli parantez simgeleri olan dört adet giriş alanının uygun şekilde doldurulması gerekmektedir.

Bu alandaki giriş şekli Bölüm 4.2.1’de c başlığı, ii alt başlığında anlatıldığı gibidir ve standart MATLAB transfer fonksiyonu giriş işleminden farklılık göstermektedir.

Şekil 4.28. Kesir dereceli kontrolör giriş alanları

Bu şekilde yapılan girişte kontrolörün transfer fonksiyonu aşağıdaki şekilde kesir dereceli olarak tanımlanmış olmaktadır.

$$C(s) = \frac{a_n s^{\alpha_n} + \dots + a_2 s^{\alpha_2} + a_1 s^{\alpha_1} + a_0 s^{\alpha_0}}{b_m s^{\beta_m} + \dots + b_2 s^{\beta_2} + b_1 s^{\beta_1} + b_0 s^{\beta_0}} \quad (4.6)$$

Sistemde kontrolör olmadığı durumda  $C(s)=1$  durumunu sağlamak için katsayıların giriş alanlarına [1] yazılması ve üslerin giriş alanlarına da [0] yazılması yeterlidir.

### iii. PID

Açılır menüden “PID” seçeneği işaretlendiğinde Şekil 4.29’da gösterilen üç alanın ( $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ ) doldurulması gerekmektedir. Oransal terim “ $K_p$ ”, integral terimi “ $K_i$ ” ve türevsel terim “ $K_d$ ” PID kontrolörün tanımlanması için girilmesi gereken değerlerdir. İlk anda tüm değerler sıfır olarak atanmıştır. Farklı kontrolör tipleri için şöyle giriş yapılmalıdır:

- P kontrolör için “ $K_p = \text{değer}$ ”, “ $K_i = 0$ ” ve “ $K_d = 0$ ”.
- PI kontrolör için “ $K_p = \text{değer}$ ”, “ $K_i = \text{değer}$ ” ve “ $K_d = 0$ ”.
- PD kontrolör için “ $K_p = \text{değer}$ ”, “ $K_d = \text{değer}$ ” ve “ $K_i = 0$ ”.
- PID kontrolör için ise “ $K_p$ ”, “ $K_i$ ” ve “ $K_d$ ” değerlerinin sıfırdan farklı olarak girilmesi gerekmektedir.

Girilen bu değerlere göre programda kontrolör aşağıdaki şekilde oluşturulacaktır.

$$C_{PID}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (4.7)$$

Kontrolör istenmeyen bir sistemde ise “ $K_p = 1$ ”, “ $K_i = 0$ ” ve “ $K_d = 0$ ” değerleri girilmelidir.

Şekil 4.29. PID kontrolör giriş alanları

#### iv. Kesir Dereceli PID (Fractional Order PID)

Açılır menüden “Fractional Order PID” seçeneği işaretlendiğinde Şekil 4.30’da gösterilen alanların doldurulması gerekmektedir.

“ $K_p$ ”, “ $K_i$ ” ve “ $K_d$ ” değerleri PID kontrolörün tanımlanması için girilmesi gereken değerlerdir. Standart PID kontrolöre göre burada girilmesi gereken iki parametre daha mevcuttur. “lambda” parametresi integralleyici “ $K_i$ ” nin derecesidir. “mu” parametresi ise türevleyici “ $K_d$ ” nin derecesidir. “lambda” ve “mu” parametreleri reel sayılardır.

Şekil 4.30. Kesir dereceli PID kontrolör giriş alanları

Böylece kesir dereceli  $PI^\lambda D^\mu$  kontrolör elde edilmiş olmaktadır. “ $\lambda = 1$ ” ve “ $\mu = 1$ ” değerlerinde standart PID kontrolör elde edilmektedir. Girilen bu değerlere göre programda kontrolör aşağıdaki şekilde oluşturulacaktır.

$$C_{PI^\lambda D^\mu}(s) = K_p + \frac{K_i}{s^\lambda} + K_d s^\mu \quad (4.8)$$

“ $K_d = 0$ ” girilerek  $PI^\lambda$  kontrolör elde edilebilir. Aynı şekilde “ $K_i = 0$ ” girilerek  $PD^\mu$  kontrolör elde edilebilir. Kontrolörün istenmediği durumda “ $K_p = 1$ ”, “ $K_i = 0$ ”, “ $K_d = 0$ ”, “ $\lambda = 0$ ” ve “ $\mu = 0$ ” değerleri girilmelidir.

### e) Ekler Paneli (Extras Panel)

Tanımlanan kontrol sistemine zaman gecikmesi eklemek, frekans bölgesi çizimlerin hangi frekans aralığında çizileceğini belirlemek ve parametre belirsizliği içeren sistemlerde parametrelerin alt ve üst limitleri arasında kaç basamak alınacağını belirlemek için kullanılan penceredir. Bu panelde dört adet giriş alanı ve açıklama bölümleri bulunmaktadır. Bu panele ait görüntü Şekil 4.31’de gösterilmiştir.



Şekil 4.31. Ekler Paneli

“Frequency Space” bölümündeki sayılar, Bode grafiğinin hangi frekans aralığında çizileceğini göstermektedir. Bu alanlara girilen -m (alt değer) ve n (üst değer) parametrelerine göre Bode grafiği  $10^{-m} - 10^n$  rad/sn aralığında çizilmektedir. Program ilk açıldığında bu değerler “-2” ve “2” şeklinde atanmıştır. Tamsayı dereceli sistemler için bu değerler sadece Bode grafiğinin çiziminde kullanılmaktadır. Nyquist ve Nichols grafiklerinin çizimi ise program tarafından, çizim penceresine sığacak şekilde yapılmaktadır. Kesir dereceli sistemler için girilen frekans değerleri ise Bode, Nyquist ve Nichols grafiklerinin çiziminde kullanılmaktadır.

Time Delay bölümüne girilen değer ise sisteme saniye cinsinden zaman gecikmesi olarak eklenmektedir. Bu girilen değer ile 3. dereceden pade yaklaşımı kullanılarak bir zaman gecikmesi fonksiyonu elde edilmektedir. Bu değer, program ilk başlatıldığında yukarıda gösterildiği gibi sıfır “0” olarak atanmıştır.

Panelin sağında yer alan kutuya girilen değer ise parametre belirsizliği içeren sistemlerin transfer fonksiyonunda alt ve üst limitler arasında kaç değer alınacağını göstermektedir. İlk anda bu değer “2” olarak atanmıştır.

### f) Bode ve Nyquist Zarfları Paneli (Bode and Nyquist Envelopes Panel)

Parametre belirsizliği içeren sistemlerin Bode ve Nyquist zarflarının çizilebilmesi için kullanılan penceredir. Bode ve Nyquist zarfları paneli, parametre belirsizliği içeren kesir dereceli transfer fonksiyonu tanımlama işlemi ile benzer görev yapmasına rağmen farklı bir panel olarak yerleştirilmiştir. Bunun nedeni, burada çalışan algoritmaların

farklı olması ve ana programdan bağımsız olarak çalışabilmesidir. Bode ve Nyquist zarflarının çiziminde kontrol edilmek istenen sistem ve kontrolörün tanımlanmasına gerek yoktur. Sadece analizi yapılmak istenen transfer fonksiyonu tanımlanmalıdır. Bode ve Nyquist zarfları panelinin genel görüntüsü Şekil 4.32’de verilmiştir. Bu panelde aşağıdaki bölümler mevcuttur:

- Transfer fonksiyonunu tanımlamak için altı adet giriş alanı,
- giriş alanları için açıklama bölümleri,
- fonksiyonları çalıştıran bir adet buton.

Şekil 4.32. Bode ve Nyquist zarfları paneli

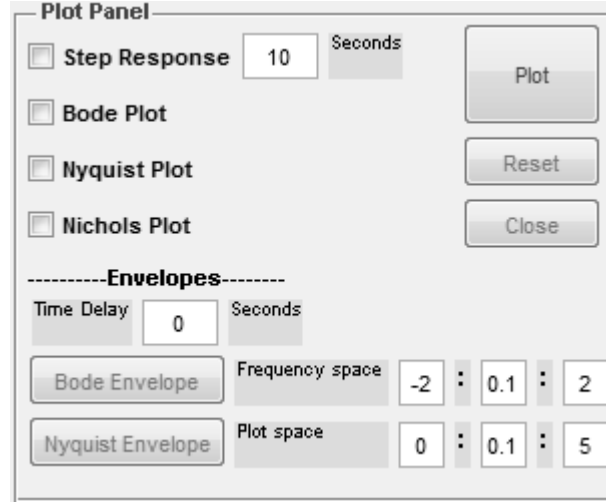
Bu şekildeki giriş Bölüm 4.2.1’de c başlığı, iv alt başlığında anlatıldığı gibi yapılmaktadır. Pay ve payda dereceleri alanlarına girilen değerler tamsayı olduğunda parametre belirsizliği içeren tamsayı dereceli bir transfer fonksiyonu elde edilmiş olur. Bu şekilde giriş yapıldıktan sonra aşağıdaki, parametre belirsizliği içeren kesir dereceli transfer fonksiyonu elde edilmiş olur. Burada, pay için ve payda için girilen aralık sayısının ve derece sayısının kendi içlerinde eşit olmasına dikkat edilmelidir.

$$G(s) = \frac{[\underline{a}_n \ \bar{a}_n]s^{\alpha_n} + \dots + [\underline{a}_2 \ \bar{a}_2]s^{\alpha_2} + [\underline{a}_1 \ \bar{a}_1]s^{\alpha_1} + [\underline{a}_0 \ \bar{a}_0]s^{\alpha_0}}{[\underline{b}_m \ \bar{b}_m]s^{\beta_m} + \dots + [\underline{b}_2 \ \bar{b}_2]s^{\beta_2} + [\underline{b}_1 \ \bar{b}_1]s^{\beta_1} + [\underline{b}_0 \ \bar{b}_0]s^{\beta_0}} \quad (4.9)$$

#### g) Çizim Paneli (Plot Panel)

Sistem ve kontrolör tanımlandıktan sonra çizimleri oluşturmak için kullanılan penceredir. Şekil 4.33’te görüldüğü gibi bu panelde dört adet onay kutusu, sekiz adet giriş alanı ve beş adet buton bulunmaktadır.

Kontrol edilmek istenen sistem ve kontrolör, tamsayı dereceli veya kesir dereceli olarak belirlendikten sonra bu pencereden dört farklı çizim aşağıda açıklandığı gibi elde edilebilmektedir.



Şekil 4.33. Çizim Paneli

- Oluşturulan sistemin birim basamak tepkisini elde etmek için “Step Response” onay kutusu işaretlenmelidir. Ayrıca hemen sağındaki alana girilen değer çizilecek birim basamak tepkisinin kaç saniye boyunca çizileceğini göstermektedir. İlk anda bu değer “10” olarak atanmıştır.
- Sistemin Bode grafiğini elde etmek için “Bode Plot” seçeneği
- Nyquist grafiğini elde etmek için “Nyquist Plot” seçeneği
- Nichols grafiğini elde etmek için de “Nichols Plot” seçeneği işaretlenmelidir.

Seçme işi bittikten sonra çizimin yapılması için “Plot” butonu tıklanarak istenilen çizim ya da çizimler elde edilebilir.

Pencerenin alt kısmında bulunan alan, Bode ve Nyquist zarflarının çiziminde kullanılacaktır. Daha önce “Bode and Nyquist Envelopes Panel” penceresinden zarfların çizilmesi için sistem tanımlama anlatılmıştı. Gerekli sistem tanımlandıktan sonra “Plot Panel” penceresinden sisteme zaman gecikmesi eklenebilmektedir. Ayrıca çizilecek Bode ve Nyquist zarflarının hangi frekans aralığında çizileceği de girilebilmektedir.

- Girilen sistemin Bode zarfının çizilmesi için “Bode Envelope” butonuna,
- Nyquist zarfının çizilmesi için ise “Nyquist Envelope” butonuna tıklanmalıdır.

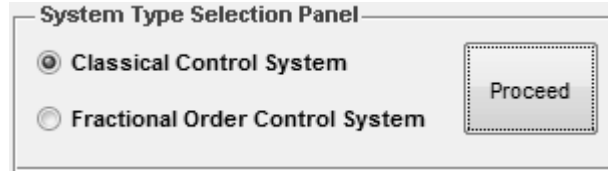
“Plot Panel” üzerine bulunan “Reset” butonuna tıklandığında programdaki tüm alanlar ilk andaki durumlarına geri döndürülecektir. “Close” butonuna tıklandığında ise program kapatılacaktır.

#### 4.2.2. Programın Tamsayı Dereceli ve Kesir Dereceli Sistemler için Kullanımı

Bu bölümde, geliştirilen programın tamsayı dereceli ve kesir dereceli sistemler için nasıl kullanılacağı hakkında adım adım bilgi verilmiştir.

##### a) Tamsayı Dereceli Sistemler

Tamsayı dereceli sistemlerle çalışılacağı zaman öncelikle “System Type Selection Panel” penceresinden “Classical Control System” seçeneği işaretlenip “Proceed” butonu tıklanmalıdır. Yapılan bu işlemin görüntüsü Şekil 4.34’te verilmiştir.



Şekil 4.34. Tamsayı dereceli sistem tipinin seçilmesi

Bu seçimle beraber “Instructions Panel” penceresinde Şekil 4.9’da görülen yardımcı yönlendirme yazısı yer alacaktır. Çizim işlemine geçmeden önce kontrol edilmek istenen sistemin transfer fonksiyonu ve kontrolör tanımlanmalıdır. Aşağıdaki bölümlerde bu işlemler adım adım anlatılmıştır.

Kontrol edilmek istenen sistemin transfer fonksiyonunu tanımlamak için önce “Plant Entry Panel” penceresindeki açılır menüden “Integer Order TF” seçeneği seçilmelidir. Bu seçenek işaretlenip “Proceed” butonuna tıklandığında Şekil 4.17’de verilen görüntü elde edilir.

Oluşan köşeli parantez simgeleri doldurulması gereken alanları göstermektedir. Bu alanlarda standart MATLAB transfer fonksiyonu tanımlama şekli kullanılmaktadır. Burada pay ve paydanın katsayıları Bölüm 4.2.1’de c başlığı, i alt başlığında açıklandığı gibi girilmelidir. Örnek bir transfer fonksiyonu girişi Şekil 4.35’te verilmektedir. Bu şekilde bir giriş yaptığımızda aşağıdaki transfer fonksiyonunu elde etmiş oluruz.

$$G(s) = \frac{b_1 s}{a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \quad (4.10)$$

Şekil 4.35. Tamsayı dereceli transfer fonksiyonu tanımlanması

Görüldüğü gibi sadece katsayılar girilerek transfer fonksiyonu kolayca oluşturulabilmektedir. Transfer fonksiyonunun payında  $s^0$ 'lı terim olmadığı için programda onun yerine sıfır "0" yazılmalıdır. Transfer fonksiyonu tanımlandıktan sonra kontrolör tanımlanmalıdır. Programda tamsayı dereceli sistemler için klasik transfer fonksiyonu şeklinde kontrolör ve PID kontrolör bulunmaktadır. Bu kontrolör tipleri için veri girişi Bölüm 4.2.1.'de d başlığı, i ve iii alt başlıklarında anlatıldığı gibi yapılır.

Klasik kontrolör formu seçildiğinde Şekil 4.27'deki pencere, PID seçildiğinde ise Şekil 4.29'daki pencere görüntüsü elde edilir. Örnek bir PID kontrolör girişi Şekil 4.36.'daki gibi verilebilir. Bu şekilde elde edilecek kontrolör şöyle verilebilir:

$$C_{PID}(s) = 2 + \frac{4}{s} + 7s \quad (4.11)$$

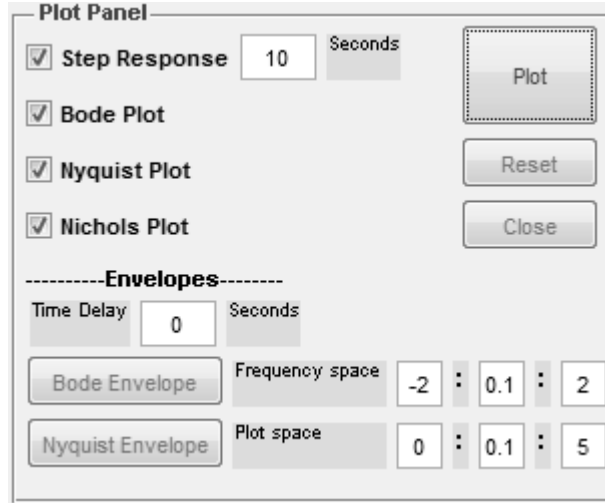
Şekil 4.36. PID kontrolör tanımlanması

Kontrol edilmek istenen sistemin transfer fonksiyonu ve kontrolör tanımlandıktan sonra sisteme zaman gecikmesi eklenebilir.

Bölüm 4.2.1'de e başlığında anlatıldığı gibi "Extras Panel" penceresinden sisteme zaman gecikmesi eklemek mümkündür. Aynı pencereden Bode grafiğinin hangi frekans aralığında çizileceğini de girmek mümkündür. Bu işlemlere ait görüntü Şekil 4.31'de verilmektedir. Bütün tanımlamalar yapıldıktan sonra çizim işlemi için Şekil 4.37'deki "Plot Panel" penceresi kullanılacaktır.

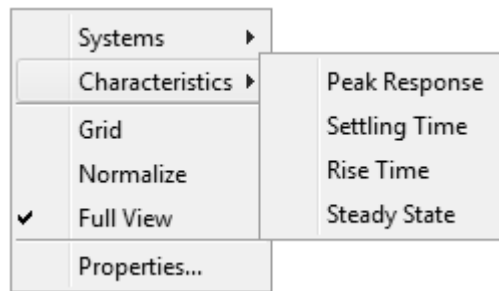
Grafiklerin çizdirilmesi bu program aracılığı ile oldukça kolay tutulmuştur. Tek yapılması gereken Şekil 4.37.de ilgili kutuyu işaretleyip "Plot" butonuna tıklamaktır.

Böylece tamsayı dereceli sistemler için birim basamak tepkisi, Bode, Nyquist ve Nichols grafikleri elde edilebilir.



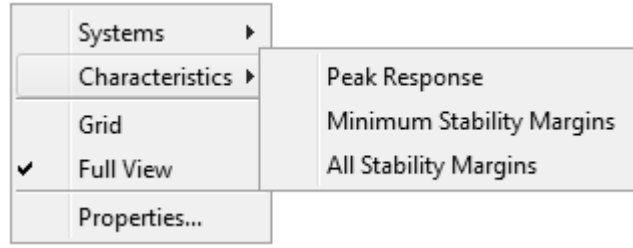
Şekil 4.37. Çizdirilmek istenen grafiklerin seçilmesi

Kutucuklar işaretlenip “Plot” butonuna tıklandığında istenen grafik, ana programdan ayrı bir pencere halinde ekrana gelecektir. Şekil 4.37’de görüldüğü gibi aynı anda birden çok grafiğin çizdirilmesi mümkündür. Bütün çizimler ayrı pencereler üzerinde yapılacaktır. Tüm grafikler üzerine sağ tıklandığında ekrana gelen menüden “Grid” seçeneği işaretlendiğinde çizim üzerinde referans çizgileri oluşacaktır. Birim basamak tepkisi grafiğine sağ tıklandığında Şekil 4.38’de görüldüğü gibi sisteme ait tepe cevabı (peak response), yerleşme zamanı (settling time), yükselme zamanı (rise time) ve kararlı durum (steady state) bilgileri elde edilebilmektedir.



Şekil 4.38. Birim basamak tepkisi grafiği çizim seçenekleri

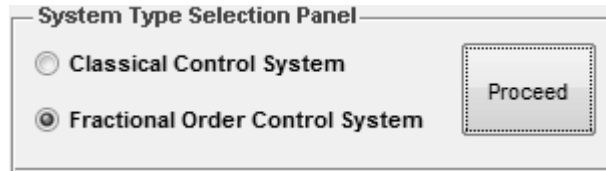
Ayrıca Bode, Nyquist ve Nichols grafiklerine sağ tıklandığında Şekil 4.39’da görüldüğü gibi sisteme ait tepe cevabı (peak response), minimum kararlılık payları (minimum stability margins) ve tüm kararlılık payları (all stability margins) bilgileri elde edilebilmektedir.



Şekil 4.39. Bode, Nyquist ve Nichols grafikleri çizim seçenekleri

## b) Kesir Dereceli Sistemler

Kesir dereceli sistemlerle çalışılacağı zaman öncelikle “System Type Selection Panel” penceresinden “Fractional Order Control System” seçeneği işaretlenip “Proceed” butonu tıklanmalıdır. Bu işleme ait görüntü Şekil 4.40’da verilmiştir.



Şekil 4.40. Kesir dereceli sistem tipi seçilmesi

Bu seçimle beraber “Instructions Panel” penceresinde Şekil 4.10’da görülen yardımcı yönlendirme yazısı yer alacaktır. Çizim işlemine geçmeden önce kontrol edilmek istenen sistemin transfer fonksiyonu ve kontrolör tanımlanmalıdır. Aşağıdaki bölümlerde bu işlemler anlatılmıştır.

Kesir dereceli transfer fonksiyonu girişi yapmak için “Plant Entry Panel” penceresindeki açılır menüden “Fractional Order TF” seçeneği seçilmelidir. Bu seçenek işaretlenip “Proceed” butonuna tıklandığında Şekil 4.18’de verilen görüntü elde edilir.

Oluşan köşeli parantez simgeleri doldurulması gereken alanları göstermektedir. Bu panele veri girişi Bölüm 4.1.2’de c başlığı, ii alt başlığında anlatıldığı gibi yapılabilir. Örnek bir kullanım Şekil 4.41’de verilmiştir. Şekil 4.41’deki gibi bir giriş yaptığımızda aşağıdaki transfer fonksiyonunu elde etmiş oluruz.

$$G(s) = \frac{b_1 s^{\beta_1}}{a_2 s^{\alpha_2} + a_1 s^{\alpha_1} + a_0} \quad (4.12)$$

Burada  $a_0, a_1, a_2$  ve  $b_1$  değerleri katsayıları,  $\alpha_1, \alpha_2$  ve  $\beta_1$  değerleri ise dereceleri oluşturmaktadır.

Şekil 4.41. Kesir dereceli transfer fonksiyonu tanımlanması

Görüldüğü gibi bu yöntemde de sadece katsayılar ve dereceler girilerek transfer fonksiyonu kolayca oluşturulabilmektedir. Transfer fonksiyonu tanımlandıktan sonra kontrolör tanımlanmalıdır. Programda kesir dereceli sistemler için klasik transfer fonksiyonu şeklinde kontrolör ve kesirli PID ( $PI^\lambda D^\mu$ ) kontrolör bulunmaktadır. Bu kontrolör tipleri için veri girişi Bölüm 4.2.1’de d başlığı, ii ve iv alt başlıklarında anlatıldığı gibi yapılabilir.

Klasik kontrolör formu seçildiğinde Şekil 4.28’deki pencere, kesir dereceli PID seçildiğinde ise Şekil 4.30’daki pencere görüntüsü elde edilir. Örnek bir  $PI^\lambda D^\mu$  girişi Şekil 4.42’deki gibi verilebilir. Bu şekilde elde edilecek kontrolör şöyle verilebilir:

$$C_{PI^\lambda D^\mu}(s) = 3 + \frac{5}{s^{0.2}} + 7s^{0.4} \quad (4.13)$$

Şekil 4.42. Kesir dereceli PID kontrolör tanımlanması

Görüldüğü gibi kesir dereceli PID parametreleri girilerek kontrolör kolayca tanımlanabilmektedir. Kontrol edilmek istenen sistemin transfer fonksiyonu ve kontrolör tanımlandıktan sonra sisteme zaman gecikmesi önceki bölümde anlatıldığı gibi eklenebilir.

Bütün tanımlamalar yapıldıktan sonra çizim işlemi için Şekil 4.43’deki “Plot Panel” penceresi kullanılarak birim basamak tepkisi, Bode, Nyquist ve Nichols grafikleri çizilebilir.

Bode, Nyquist ve Nichols grafikleri üzerine sağ tıklandığında ekrana gelen menüden çizim üzerine referans çizgileri eklenebilmektedir. Yine aynı menüden Şekil 4.45’de görüldüğü gibi sisteme ait tepe cevabı, minimum kararlılık payları ve tüm kararlılık payları bilgileri elde edilebilmektedir. Kesir dereceli sistemlerde birim basamak tepkisi grafiğine referans çizgilerini eklemek için ise MATLAB komut pecceresine “*grid*” komutu girilmelidir.

### c) Parametre Belirsizliği İçeren Tamsayı Dereceli Sistemler

Daha önceki bölümde anlatıldığı gibi tamsayı dereceli sistemlerle çalışılacağı zaman öncelikle “System Type Selection Panel” penceresinden “Classical Control System” seçeneği işaretlenip “Proceed” butonu tıklanmalıdır. Çizim işlemine geçmeden önce kontrol edilmek istenen sistemin parametre belirsizliği içeren transfer fonksiyonu ve kontrolör tanımlanmalıdır.

Tamsayı dereceli sistemler için “Plant Entry Panel” penceresindeki açılır menüden “Integer TF with Parametric Uncertainty” seçeneği seçilmelidir. Bu seçenek işaretlenip “Proceed” butonuna tıklandığında Şekil 4.19’da verilen görüntü elde edilir.

Oluşan köşeli parantez simgeleri arasına belirsiz parametrelerin alt ve üst limit değerleri girilecektir. Burada standart MATLAB transfer fonksiyonu tanımlama şekline benzer bir giriş kullanılmaktadır. Bu paneldeki veri girişi Bölüm 4.1.2’de c başlığı, iii alt başlığında anlatıldığı gibi yapılır. Bu şekildeki veri girişini aşağıdaki örnek ile kolayca açıklamak mümkündür.

$$G(s) = \frac{[b_1 a \ b_1 u]s}{[a_2 a \ a_2 u]s^2 + [a_1 a \ a_1 u]s + [a_0 a \ a_0 u]} \quad (4.14)$$

Burada  $a_2 a, a_1 a, a_0 a$  ve  $b_1 a$  belirsiz parametrelerin alt limitleri,  $a_2 u, a_1 u, a_0 u$  ve  $b_1 u$  ise belirsiz parametrelerin üst limitleridir. Görüldüğü gibi yukarıdaki transfer fonksiyonunun payında iki adet ( $s^0$ ’lı terim olmadığı için tanımlama  $[0 \ 0]$  olarak yapılmalıdır), paydasında ise üç adet belirsiz parametre aralığı vardır. Bu şekilde bir tanımlama için programa Şekil 4.43’te gösterilen giriş yapılmalıdır.

Parametre belirsizliği içermeyen aralıklarda ise alt ve üst limitlere  $[a \ a]$  gibi aynı değer girişi yapılır. Bu işlemin kullanımı Bölüm 4.3’te uygulama örneklerinde bulunmaktadır.

Şekil 4.43. Parametre belirsizliği içeren tamsayı dereceli sistemler için transfer fonksiyonu tanımlanması

Şekil 4.43’den görüldüğü gibi sadece belirsiz katsayıların alt ve üst limit değerleri girilerek parametre belirsizliği içeren transfer fonksiyonu kolayca oluşturulabilmektedir. Transfer fonksiyonu tanımlandıktan sonra kontrolör tanımlanmalıdır. Programda tamsayı dereceli sistemler için tanımlanabilecek kontrolör, Bölüm 4.1.2’de d başlığı, i ve iii alt başlıklarında anlatıldığı gibi istenilen şekilde tanımlanabilir.

Bu bölümde belirsiz parametre aralığında alınan değer sayısı kadar çizim yaptırılabilir. Örneğin 4 belirsiz parametreye sahip bir transfer fonksiyonunda her parametre aralığında 3 değer alınıyorsa  $3^4 = 81$  farklı transfer fonksiyonu için birim basamak tepkisi, Bode, Nyquist ve Nichols grafikleri çizdirilir.

Bütün tanımlamalar yapıldıktan sonra çizim işlemi için Şekil 4.37’deki “Plot Panel” penceresi kullanılarak birim basamak tepkisi, Bode, Nyquist ve Nichols grafikleri çizilebilir.

#### d) Parametre Belirsizliği İçeren Kesir Dereceli Sistemler

Bölüm 4.1.2’de anlatıldığı gibi kesir dereceli sistemler için öncelikle “System Type Selection Panel” penceresinden “Fractional Order Control System” seçeneği işaretlenip “Proceed” butonu tıklanmalıdır. Çizim işlemine geçmeden önce kontrol edilmek istenen sistemin parametre belirsizliği içeren transfer fonksiyonu ve kontrolör tanımlanmalıdır.

Kesir dereceli sistemlerle çalıştığımız için “Plant Entry Panel” penceresindeki açılır menüden “Fractional Order TF with Parametric Uncertainty” seçeneği seçilmelidir. Bu seçenek işaretlenip “Proceed” butonuna tıkladığında Şekil 4.20’de verilen görüntü elde edilir. Oluşan köşeli parantez simgeleri arasına belirsiz parametrelerin alt ve üst limit değerleri girilecektir. Bu paneldeki veri girişi Bölüm 4.1.2’de c başlığı, iv alt başlığında anlatıldığı gibi yapılır. Bu şekildeki veri girişini aşağıdaki örnek ile kolayca açıklamak mümkündür.

$$G(s) = \frac{[b_0 a \ b_0 u] s^{\beta_0}}{[a_2 a \ a_2 u] s^{\alpha_2} + [a_1 a \ a_1 u] s^{\alpha_1} + [a_0 a \ a_0 u]} \quad (4.15)$$

Burada  $a_2 a, a_1 a, a_0 a$  ve  $b_0 a$  belirsiz parametrelerin alt limitleri,  $a_2 u, a_1 u, a_0 u$  ve  $b_0 u$  belirsiz parametrelerin üst limitleri,  $\alpha_2, \alpha_1$  ve  $\beta_0$  ise parametre aralıklarının derecelerdir. Görüldüğü gibi yukarıdaki transfer fonksiyonunun payında bir adet, paydasında ise üç adet belirsiz parametre aralığı vardır. Bu şekilde bir tanımlama için programa Şekil 4.44'te gösterilen giriş yapılmalıdır.

The screenshot shows a software interface for defining a fractional order transfer function with parameters. The interface includes a dropdown menu for 'Fractional Order TF with Parametr...', a 'Proceed' button, and a 'Prepare' button. Below these are input fields for the number of uncertain parameters in the numerator (num) and denominator (den), and fields for entering coefficients and degrees for both numerator and denominator.

Şekil 4.44. Parametre belirsizliği içeren kesir dereceli sistemler için transfer fonksiyonu tanımlanması

Görüldüğü gibi bu yöntemde de sadece katsayıların alt ve üst limit değerleri ve dereceleri girilerek transfer fonksiyonu seti kolayca oluşturulabilmektedir. Transfer fonksiyonu tanımlandıktan sonra kontrolör tanımlanmalıdır. Programda kesir dereceli sistemler için tanımlanabilecek kontrolör, Bölüm 4.1.2'de d başlığı, ii ve iv alt başlıklarında anlatıldığı gibi istenilen şekilde tanımlanabilir.

Bütün tanımlamalar yapıldıktan sonra çizim işlemi için Şekil 4.37'deki "Plot Panel" penceresi kullanılarak birim basamak tepkisi, Bode, Nyquist ve Nichols grafikleri çizilebilir.

#### e) Bode ve Nyquist Zarfları

Zarf paneline ait fonksiyonlar diğer panellerden ayrı tutulmuştur yani zarf çizimi için sistem tipi seçilmesine ihtiyaç yoktur. Zarf çizimi sadece tek transfer fonksiyonu ile yapılabilmektedir. Zarflar paneli görüntüsü Şekil 4.32'da verilmiştir.

Zarf çizimi için transfer fonksiyonu tanımlanması, Bölüm 4.2.1’de c başlığı, iv alt başlığında anlatıldığı gibi yapılır. Tanımlanan transfer fonksiyonuna Şekil 4.45’de görüldüğü gibi zaman gecikmesi eklenebilir.

-----Envelopes-----

Time Delay 0 Seconds

Bode Envelope Frequency space -2 : 0.1 : 2

Nyquist Envelope Plot space 0 : 0.1 : 5

Şekil 4.45. Çizim panelindeki zarflar bölümü

Sistemin transfer fonksiyonu tanımlandıktan sonra Şekil 4.58’deki “Bode Envelope” butonu ile sistemin Bode zarfı, “Nyquist Envelope” butonu ile de sistemin Nyquist zarfı çizdirilebilir. Çizim butonlarının yanındaki alanlara frekans bilgileri girilebilmektedir. Yapılması istenen çizim, ilk kutuya girilen değerle son kutuya girilen değer arasında, orta kutuya girilen değer kadar artırımlarla yapılacaktır.

## 5. UYGULAMA ÖRNEKLERİ

Bu bölümde UFT-FOCS programı ile gerçekleştirilmiş uygulamalar yer almaktadır. Karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla seçilen örneklerin literatürde mevcut yayınlardan alınmış olmasına özen gösterilmiştir. Uygulama örneklerinde farklı sistem ve kontrolör alternatifleri göz önüne alınmıştır sistem ya da kontrolörün tamsayı ve/veya kesir dereceli olduğu durumlara yer verilmiştir. Aşağıda, her örnek için kullanılan sistem ve kontrolörün tipi gösterilmiştir.

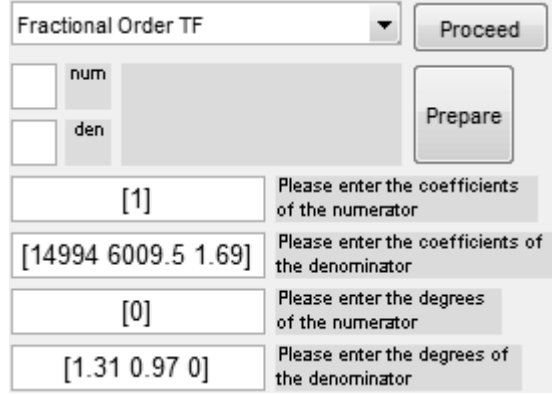
Örnek No	Kontrol Edilmek İstenen Sistem Tipi	Kontrolör Tipi	Zaman Gecikmesi
1	Kesir dereceli transfer fonksiyonu	PID	-
2	Parametre belirsizliği içeren kesir dereceli transfer fonksiyonu	PI	-
3	Tamsayı dereceli transfer fonksiyonu	Kesir dereceli transfer fonksiyonu formu	-
4	Kesir dereceli transfer fonksiyonu	$PI^\lambda D^\mu$	Var
5	Parametre belirsizliği içeren kesir dereceli transfer fonksiyonu	-	-
6	Kesir dereceli transfer fonksiyonu	PD	-
7	Parametre belirsizliği içeren tamsayı dereceli transfer fonksiyonu	$PI^\lambda D^\mu$	Var

### Örnek 1.

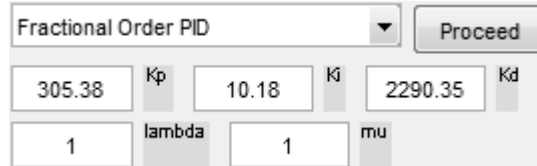
Bu örnekte kontrol edilmek istenen sistemin transfer fonksiyonu kesir dereceli, kontrolör ise tamsayı dereceli olarak alınmıştır [64]. Kontrol edilmek istenen sistemin transfer fonksiyonu  $G(s)$  ve PID kontrolör  $C_{PID}(s)$  aşağıdaki şekilde verilmiştir. Bu tanımlama için arayüzde aşağıdaki Şekil 5.1 ve 5.2’de gösterilen girişler yapılmalıdır.

$$G_{(2)}(s) = \frac{1}{14994s^{1.31} + 6009.5s^{0.97} + 1.69} \quad (4.18)$$

$$C_{(2)PID}(s) = 305.38 + \frac{10.18}{s} + 2290.35s \quad (4.19)$$

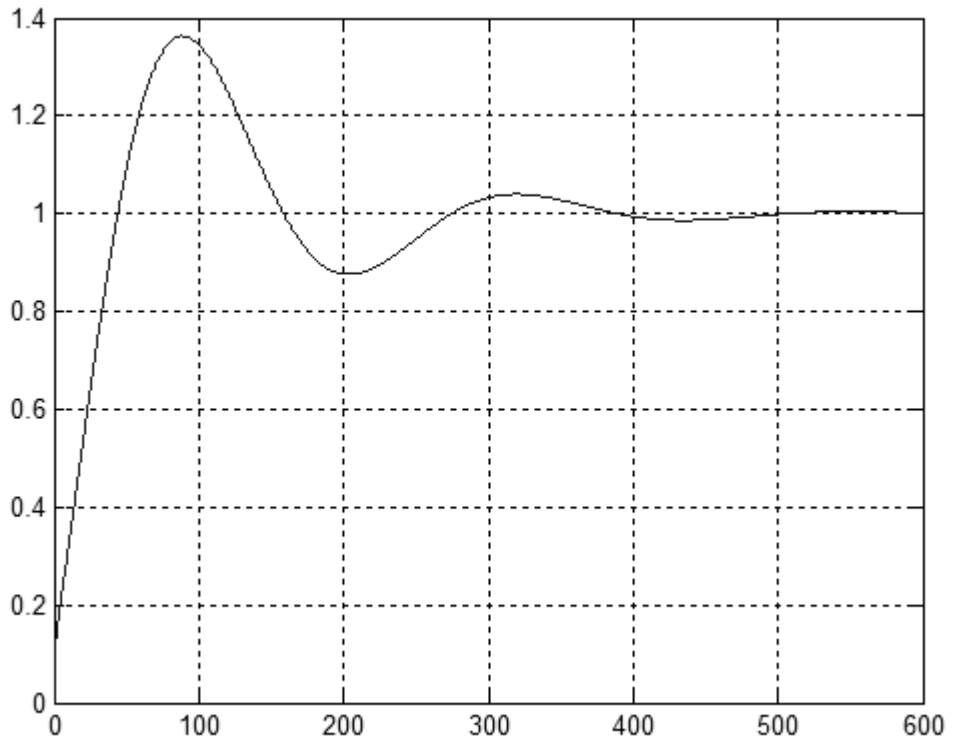


Şekil 5.1.  $G_{(1)}(s)$  transfer fonksiyonu girişi

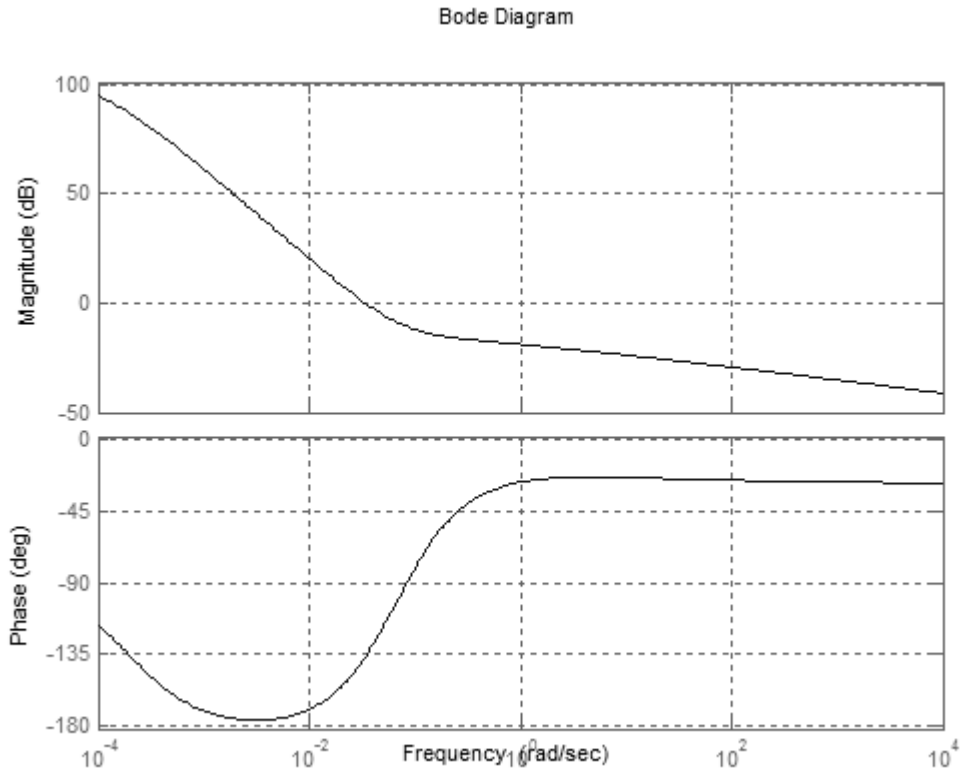


Şekil 5.2.  $C_{(1)PID}(s)$  transfer fonksiyonu girişi

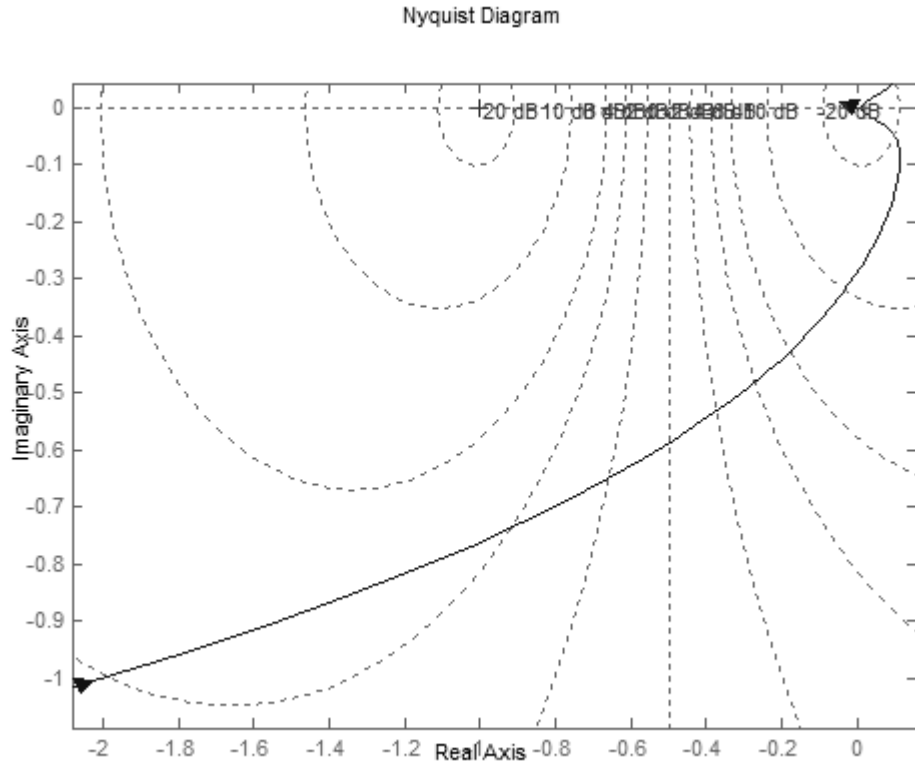
Yukarıdaki girişler yapıldıktan sonra “Plot” butonu tıklanarak istenilen çizimler elde edilebilir. Şekil 5.3 – 5.6’da sırasıyla girilen sisteme ait birim basamak tepkisi, Bode, Nyquist ve Nichols grafikleri verilmiştir.



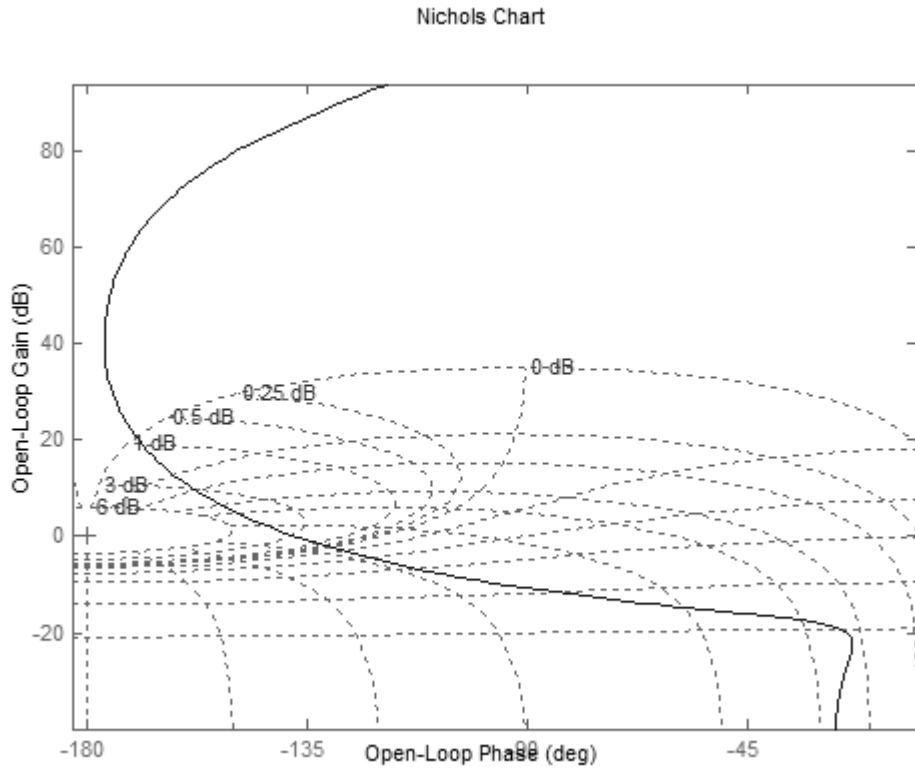
Şekil 5.3.  $C_{(1)PID}(s)G_{(1)}(s)$  sistemine ait birim basamak tepkisi



Şekil 5.4.  $C_{(1)PID}(s)G_{(1)}(s)$  sistemine ait Bode grafiği



Şekil 5.5.  $C_{(1)PD}(s)G_{(1)}(s)$  sistemine ait Nyquist grafiği



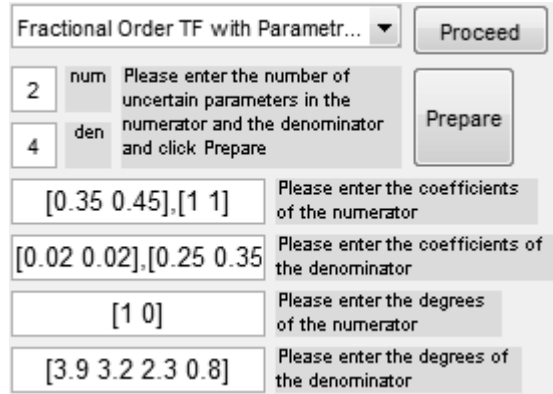
Şekil 5.6.  $C_{(1)PD}(s)G_{(1)}(s)$  sistemine ait Nichols grafiği

## Örnek 2.

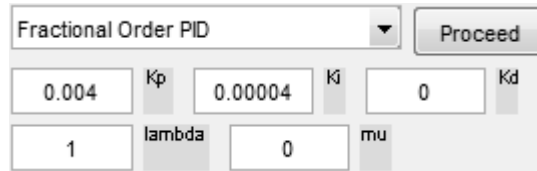
Bu örnekte kontrol edilmek istenen sistem transfer fonksiyonu kesir derecelidir ve parametre belirsizliği içermektedir. Kontrolör ise tamsayı dereceli bir PI kontrolör olarak alınmıştır [65]. Bu şekilde tanımlama için programda aşağıdaki Şekil 5.7’de ve Şekil 5.8’de gösterilen girişler yapılmalıdır. Belirsiz parametrelerin alt ve üst limitleri arasında 3 basamak alınmıştır. Bu işleme ait görüntü Şekil 5.9’da verilmiştir. Değişken olmayan parametre değerleri için alt ve üst limitler Şekil 5.7’de görüldüğü gibi aynı değerler olarak girilir.

$$G_{(2)}(s) = \frac{[0.35 \ 0.45]s + [1 \ 1]}{[0.02 \ 0.02]s^{3.9} + [0.25 \ 0.35]s^{3.2} + [0.9 \ 1.1]s^{2.3} + [0.04 \ 0.04]s^{0.8}} \quad (4.21)$$

$$C_{(2)PI} = 0.004 + \frac{0.00004}{s} \quad (4.22)$$



Şekil 5.7.  $G_{(2)}(s)$  transfer fonksiyonu girişi

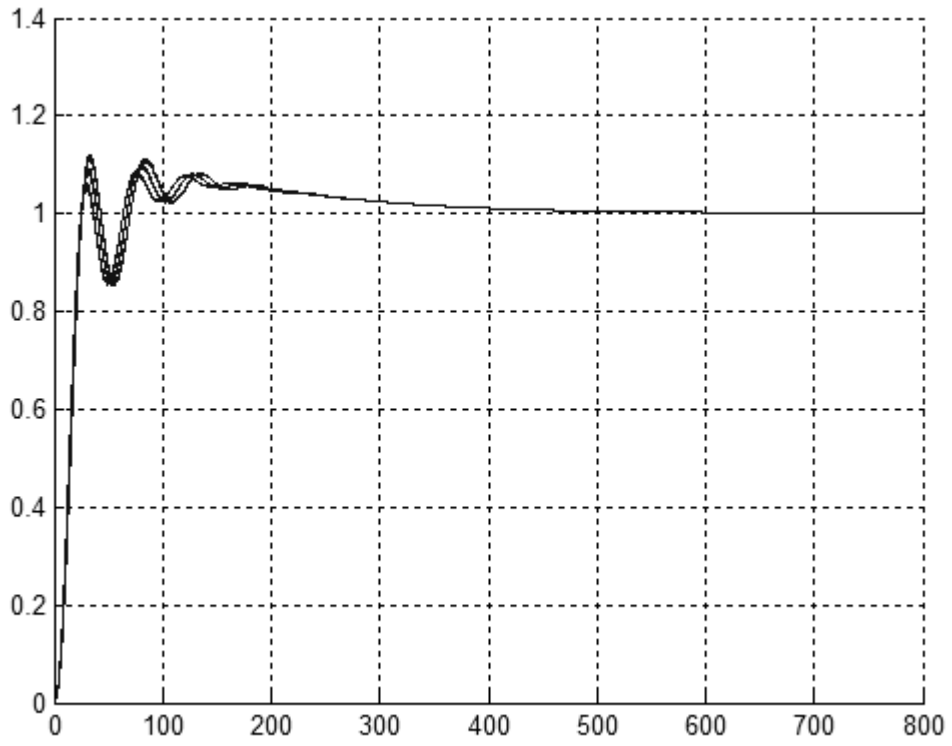


Şekil 5.8.  $C_{(2)PI}(s)$  kontrolör girişi

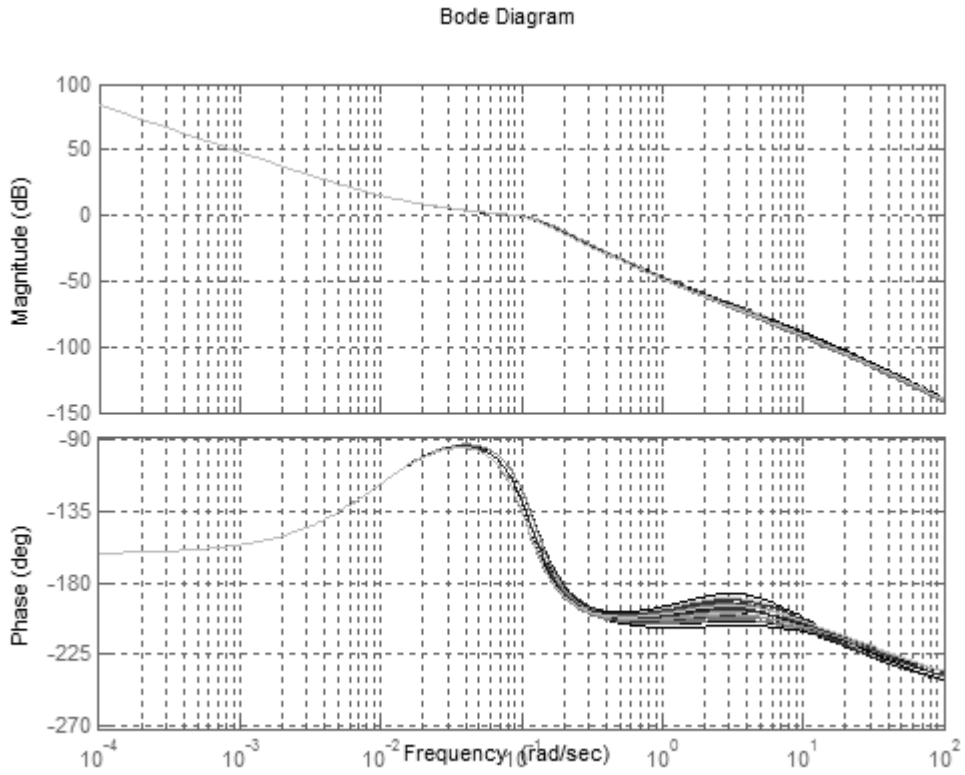


Şekil 5.9. Belirsiz parametrelerin limitleri arasındaki basamak sayısının girilmesi

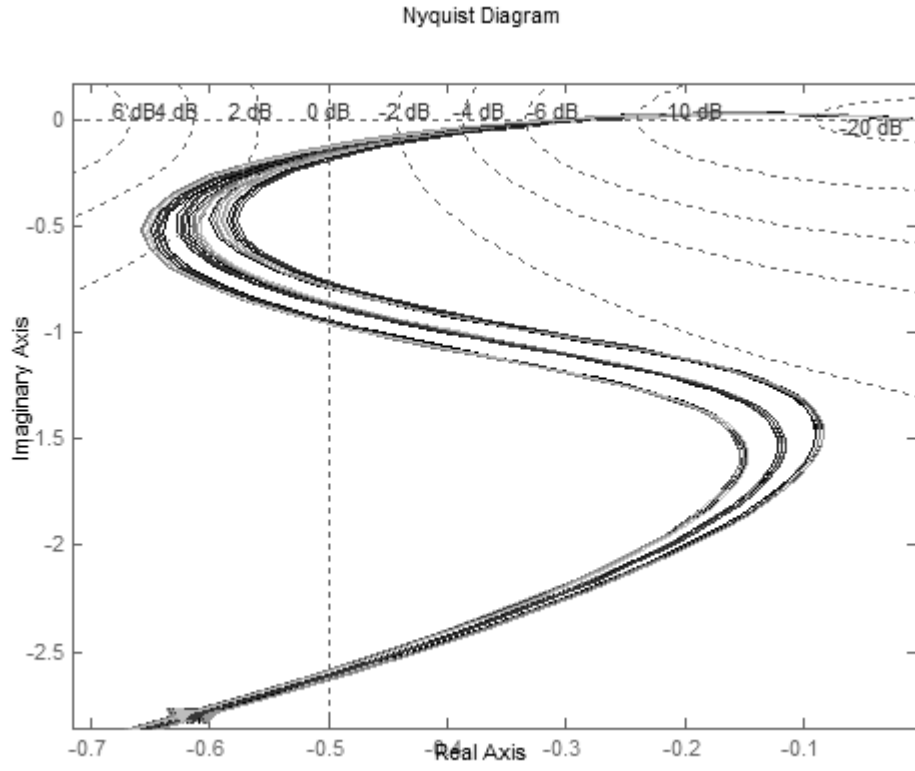
Tüm girişler yapıldıktan sonra çizim işlemi gerçekleştirilebilmektedir. Bu örnekteki transfer fonksiyonunda 3 adet değişken parametre aralığı olduğu için  $3^3 = 27$  adet transfer fonksiyonu oluşturulmuştur ve Şekil 5.10 – 5.13’de sırasıyla girilen sisteme ait birim basamak tepkisi, Bode, Nyquist, Nichols grafikleri verilmiştir.



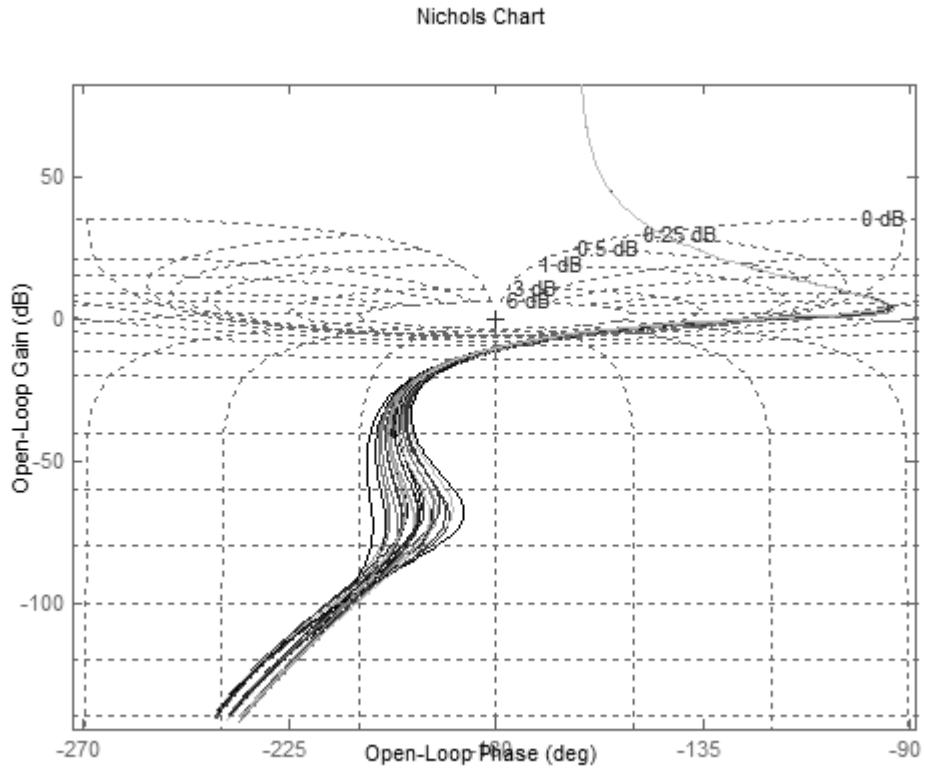
Şekil 5.10.  $C_{(2)PI}(s)G_{(2)}(s)$  sistemine ait birim basamak tepkisi



Şekil 5.11.  $C_{(2)PI}(s)G_{(2)}(s)$  sistemine ait Bode grafiği



Şekil 5.12.  $C_{(2)PI}(s)G_{(2)}(s)$  sistemine ait Nyquist grafiği



Şekil 5.13.  $C_{(2)PI}(s)G_{(2)}(s)$  sistemine ait Nichols grafiği

### Örnek 3.

Bu örnekte, kontrol edilmek istenen sistemin transfer fonksiyonu tamsayı dereceli ve kontrolör kesir dereceli olarak aşağıdaki şekilde verilmiştir [52]. Bu şekilde tanımlama için programa aşağıdaki Şekil 5.14'te ve Şekil 5.15'te gösterilen girişler yapılmalıdır.

$$G_{(3)}(s) = \frac{1}{s(s+1)(s+2)} \quad (4.23)$$

$$C_{(3)}(s) = \frac{4s^{2.24} + 3.6s^{1.04} + 1.63}{s^{1.04}} \quad (4.24)$$

Fractional Order TF

Proceed

num

den

Prepare

[1] Please enter the coefficients of the numerator

[1 3 2] Please enter the coefficients of the denominator

[0] Please enter the degrees of the numerator

[3 2 1] Please enter the degrees of the denominator

Şekil 5.14.  $G_{(3)}(s)$  transfer fonksiyonu girişi

Fractional Order Controller

Proceed

num

den

Prepare

[4 3.6 1.63] Please enter the coefficients of the numerator

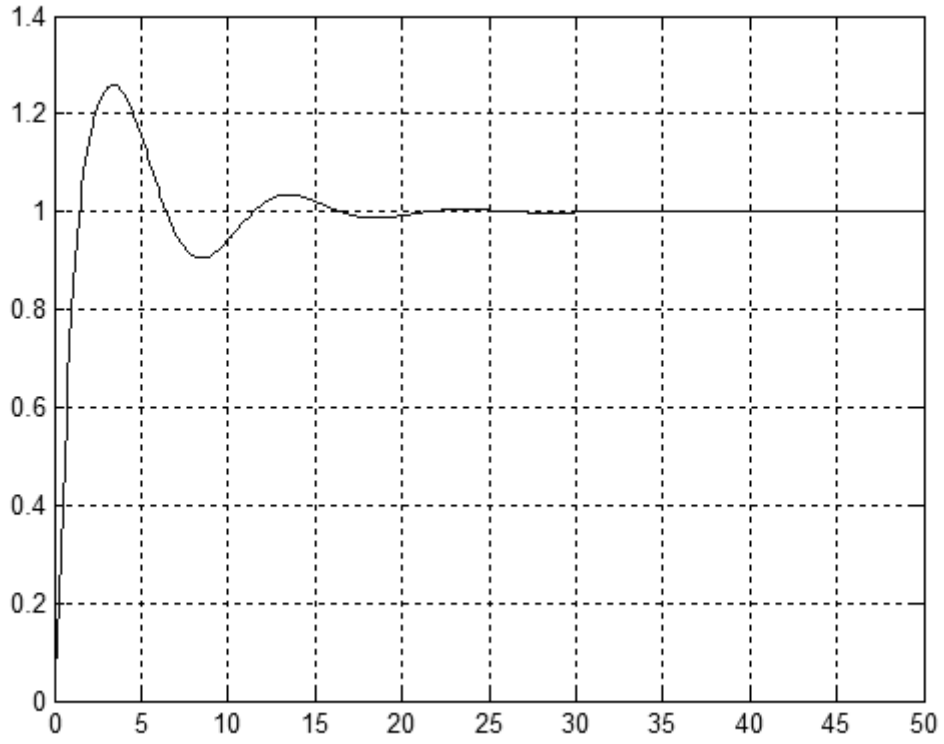
[1] Please enter the coefficients of the denominator

[2.24 1.04 0] Please enter the degrees of the numerator

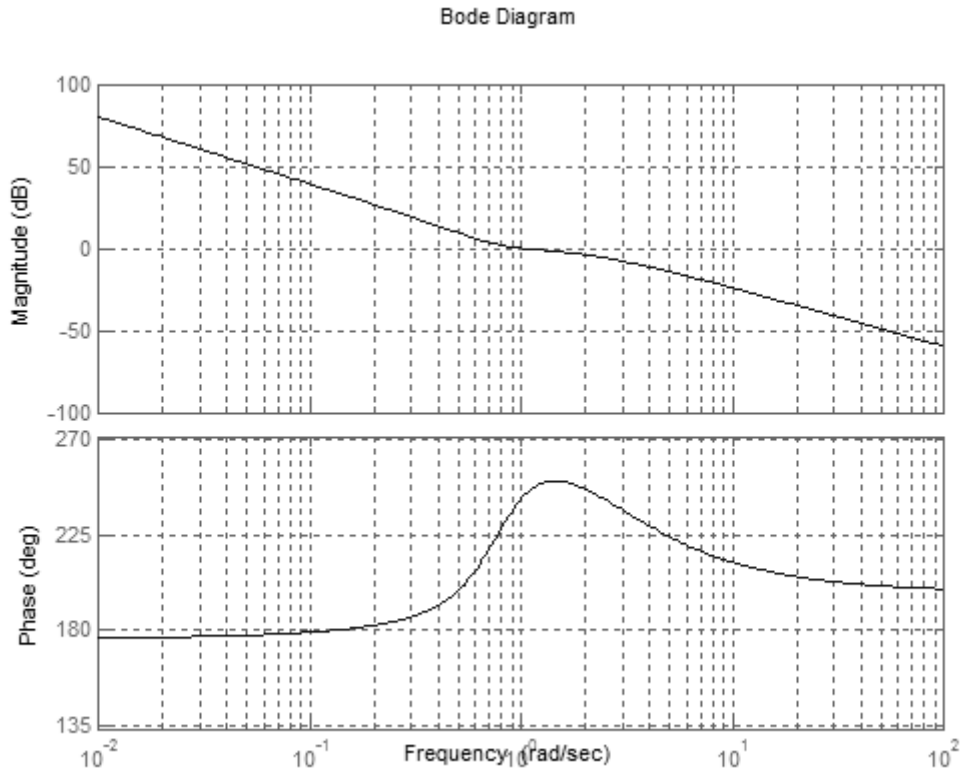
[1.04] Please enter the degrees of the denominator

Şekil 5.15.  $C_{(3)}(s)$  kontrolör girişi

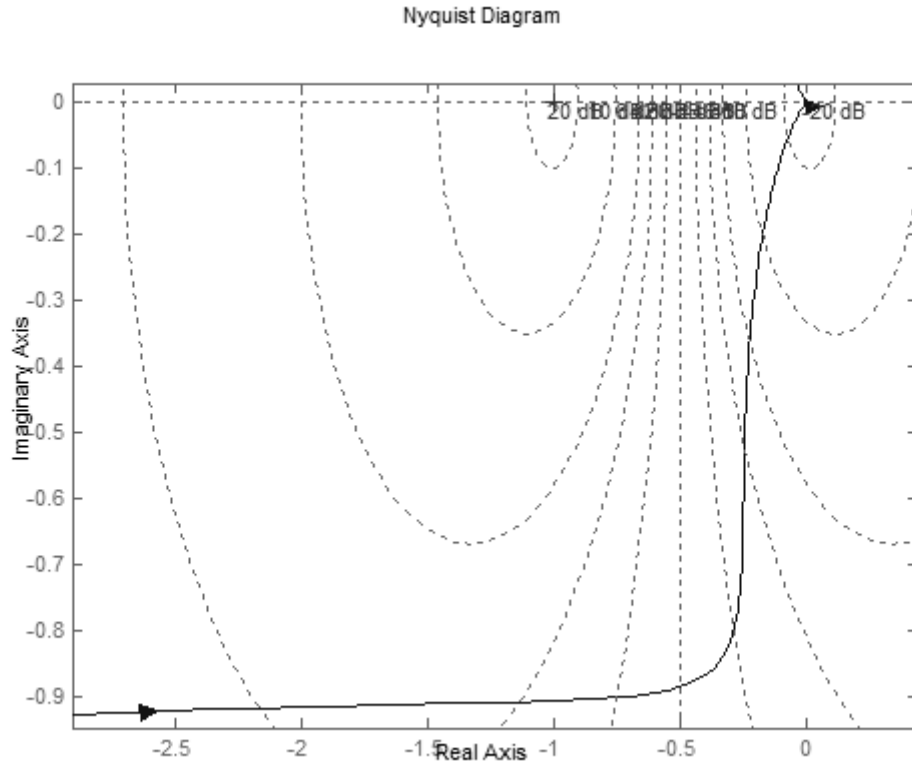
Tüm girişler yapıldıktan sonra çizim işlemi gerçekleştirilebilmektedir. Şekil 5.16 – 5.19'da sırasıyla girilen sisteme ait birim basamak tepkisi, Bode, Nyquist ve Nichols grafikleri verilmiştir.



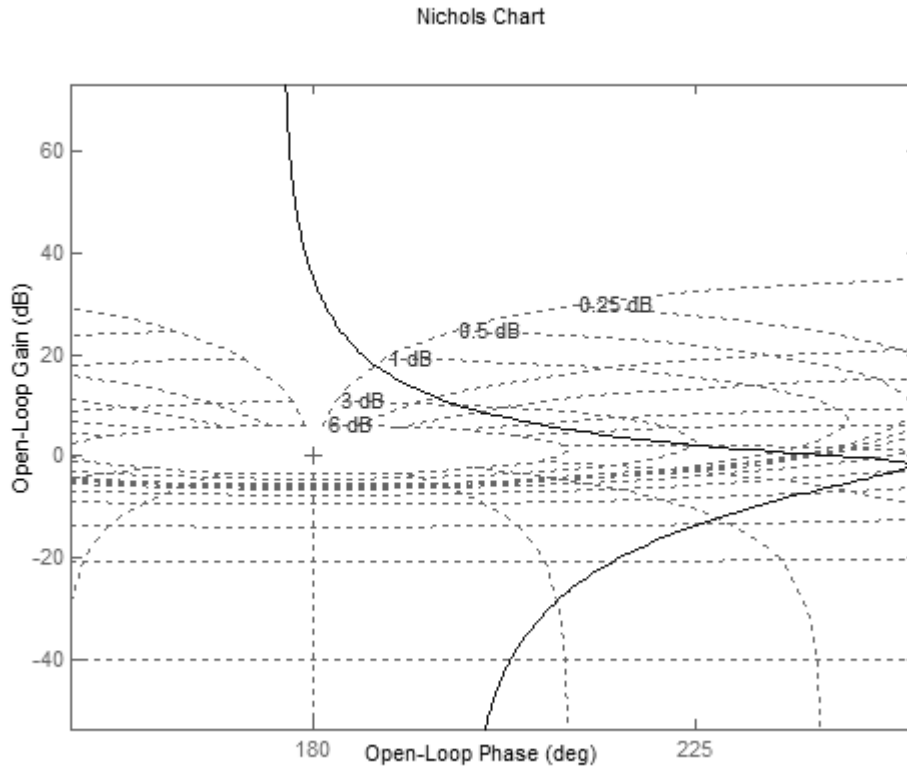
Şekil 5.16.  $C_{(3)}(s)G_{(3)}(s)$  sistemine ait birim basamak tepkisi



Şekil 5.17.  $C_{(3)}(s)G_{(3)}(s)$  sistemine ait Bode grafiği



Şekil 5.18.  $C_{(3)}(s)G_{(3)}(s)$  sistemine ait Nyquist grafiği



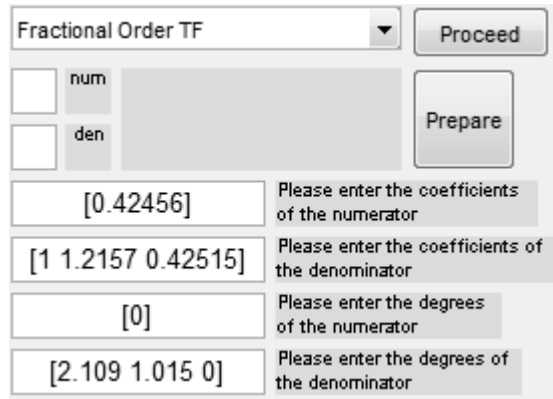
Şekil 5.19.  $C_{(3)}(s)G_{(3)}(s)$  sistemine ait Nichols grafiği

#### Örnek 4.

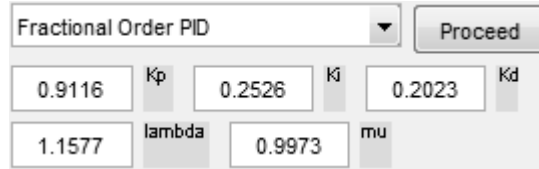
Bu örnekte, kontrol edilmek istenen sistemin transfer fonksiyonu ve kontrolör kesir dereceli olarak aşağıdaki şekilde verilmiştir [66]. Bu şekilde tanımlama için programa aşağıdaki Şekil 5.20 – 5.22’de gösterilen girişler yapılmalıdır.

$$G_{(4)}(s) = \frac{0.42456}{s^{2.109} + 1.2157s^{1.015} + 0.42515} e^{-0.2694s} \quad (4.25)$$

$$C_{(4)PI^{\lambda}D^{\mu}}(s) = 0.9116 + \frac{0.2526}{s^{1.1577}} + 0.2023s^{0.9973} \quad (4.26)$$



Şekil 5.20.  $G_{(4)}(s)$  transfer fonksiyonu girişi

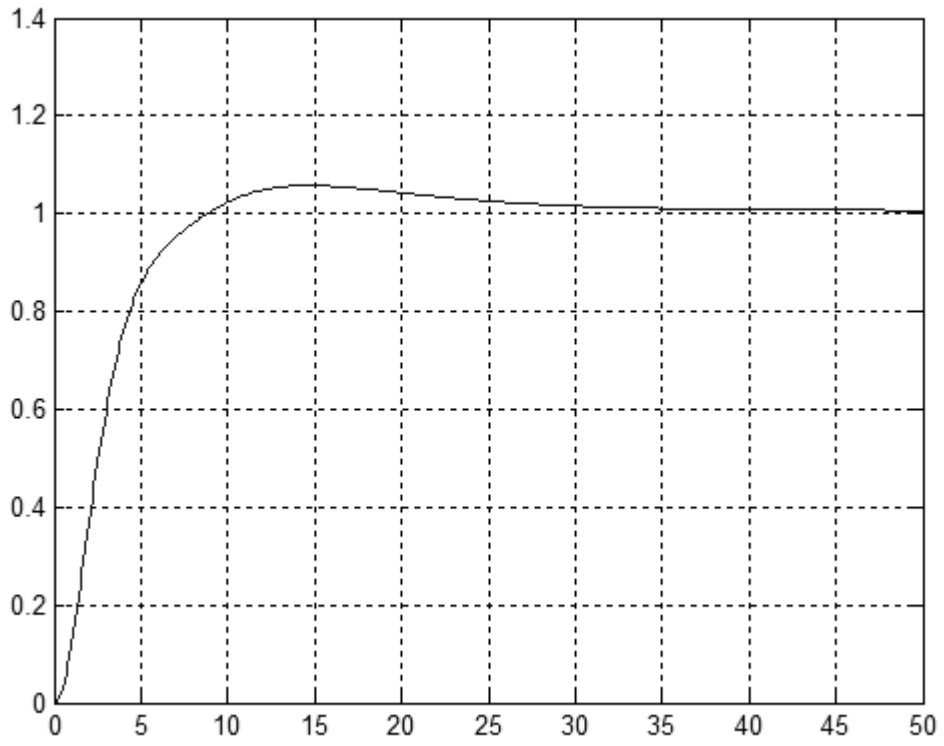


Şekil 5.21.  $C_{(4)PI^{\lambda}D^{\mu}}(s)$  kontrolör girişi

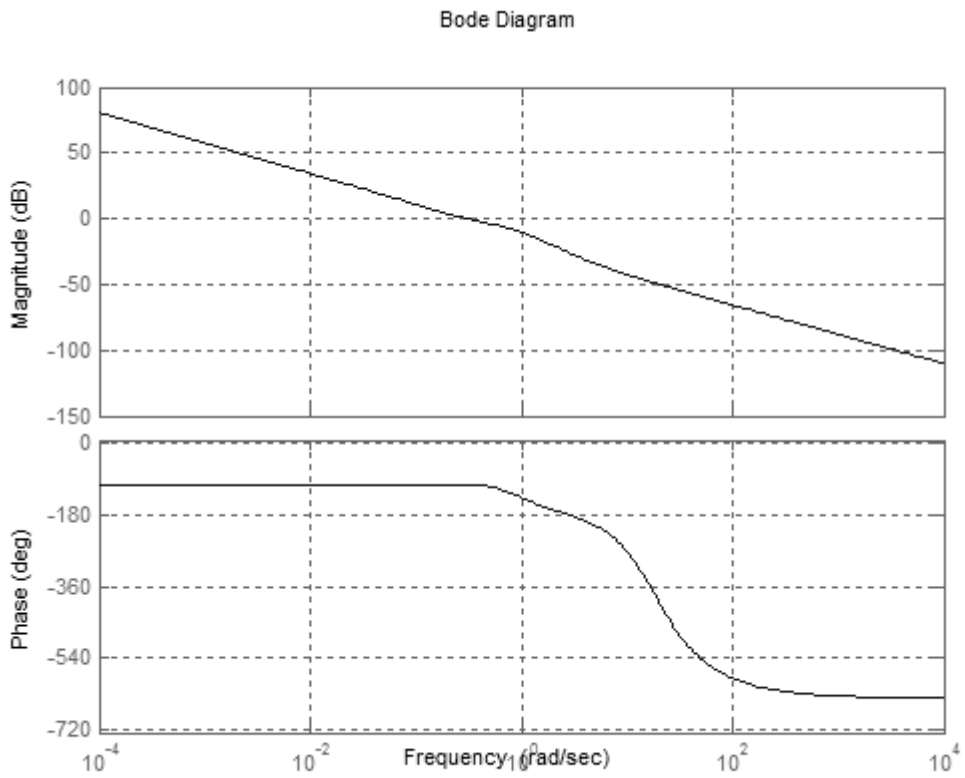


Şekil 5.22.  $C_{(4)PI^{\lambda}D^{\mu}}(s)G_{(4)}(s)$  sistemine zaman gecikmesi eklenmesi

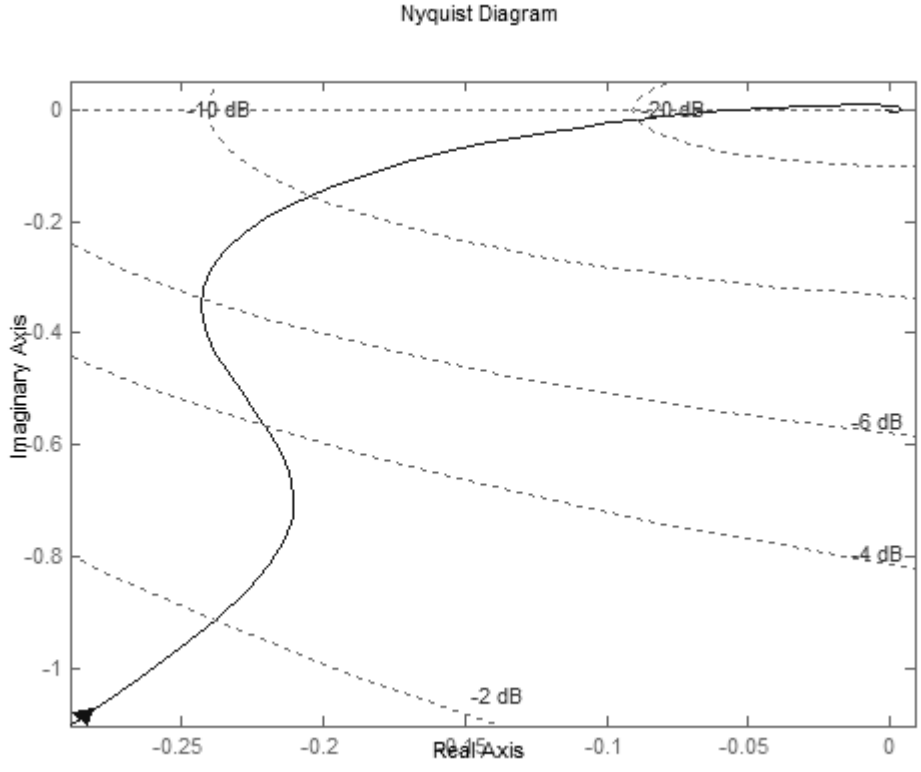
Tüm girişler yapıldıktan sonra çizim işlemi gerçekleştirilebilmektedir. Şekil 5.23 – 5.26’da girilen sisteme ait sırasıyla birim basamak tepkisi, Bode, Nyquist ve Nichols grafikleri verilmiştir.



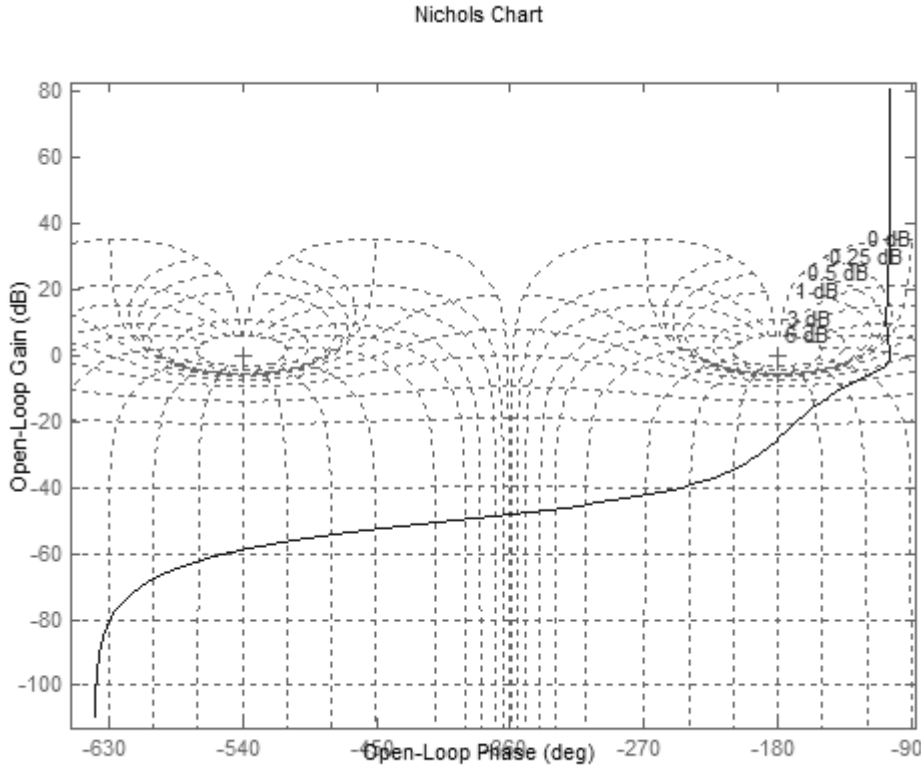
Şekil 5.23.  $C_{(4)PI^2D^\mu}(s)G_{(4)}(s)$  sistemine ait birim basamak tepkisi



Şekil 5.24.  $C_{(4)PI^2D^\mu}(s)G_{(4)}(s)$  sistemine ait Bode grafiği



Şekil 5.25.  $C_{(4)PI^2D^u}(s)G_{(4)}(s)$  sistemine ait Nyquist grafiği



Şekil 5.26.  $C_{(4)PI^2D^u}(s)G_{(4)}(s)$  sistemine ait Nichols grafiği

## Örnek 5.

Bu örnekte, kontrol edilmek istenen sistemin transfer fonksiyonu kesir dereceli olarak aşağıdaki şekilde verilmiştir. Sistemde kontrolör bulunmamaktadır [63]. Zarf çizimi de yapılacağı için bu örnekte Bode ve Nyquist zarfları paneli de kullanılacaktır. Bu şekilde tanımlama için programa Şekil 5.27 – 5.29’da gösterilen girişler yapılmalıdır.

$$G_{(s)}(s) = \frac{[1 \ 1]s^{0.9}, [1 \ 1.2]}{[1 \ 1]s^{3.1}, [3 \ 6]s^{2.2}, [2 \ 3]s^{0.8}, [0.4 \ 0.8]} \quad (4.27)$$

Fractional Order TF with Parametr...		Proceed
2	num	Please enter the number of uncertain parameters in the numerator and the denominator and click Prepare
4	den	
[1 1],[1 1.2]		Please enter the coefficients of the numerator
[1 1],[3 6],[2 3],[0.4 0]		Please enter the coefficients of the denominator
[0.9 0]		Please enter the degrees of the numerator
[3.1 2.2 0.8 0]		Please enter the degrees of the denominator

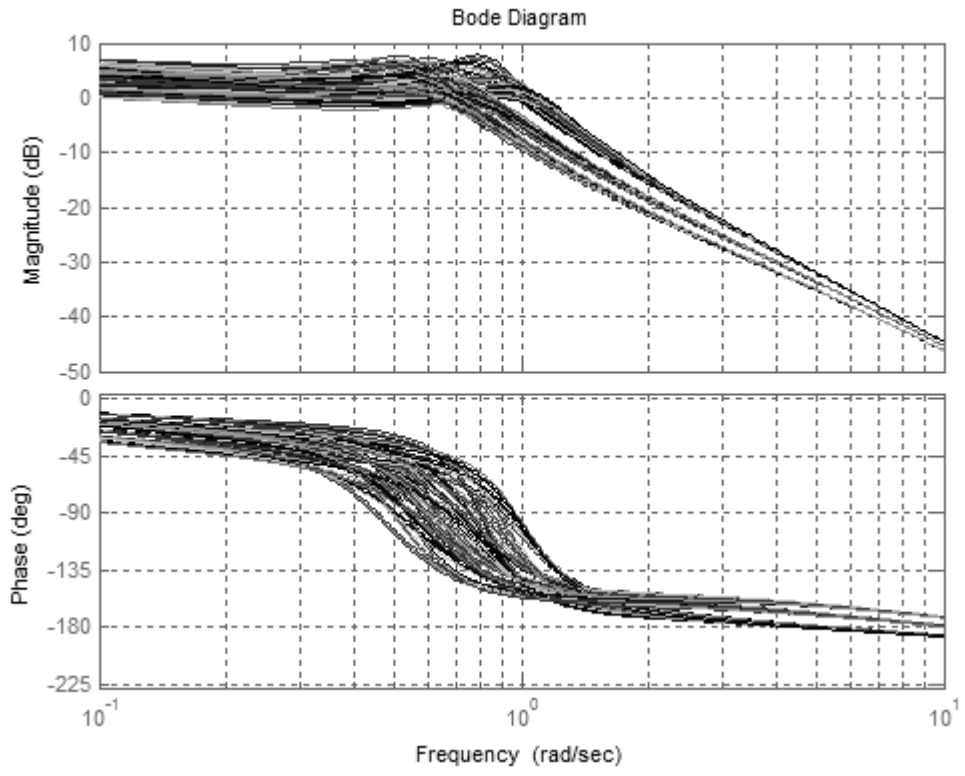
Şekil 5.27.  $G_{(s)}(s)$  transfer fonksiyonu girişi (Kontrol edilmek istenen sistem paneli)

5.28.  $G_{(s)}(s)$  transfer fonksiyonu girişi (Bode ve Nyquist zarfları paneli)

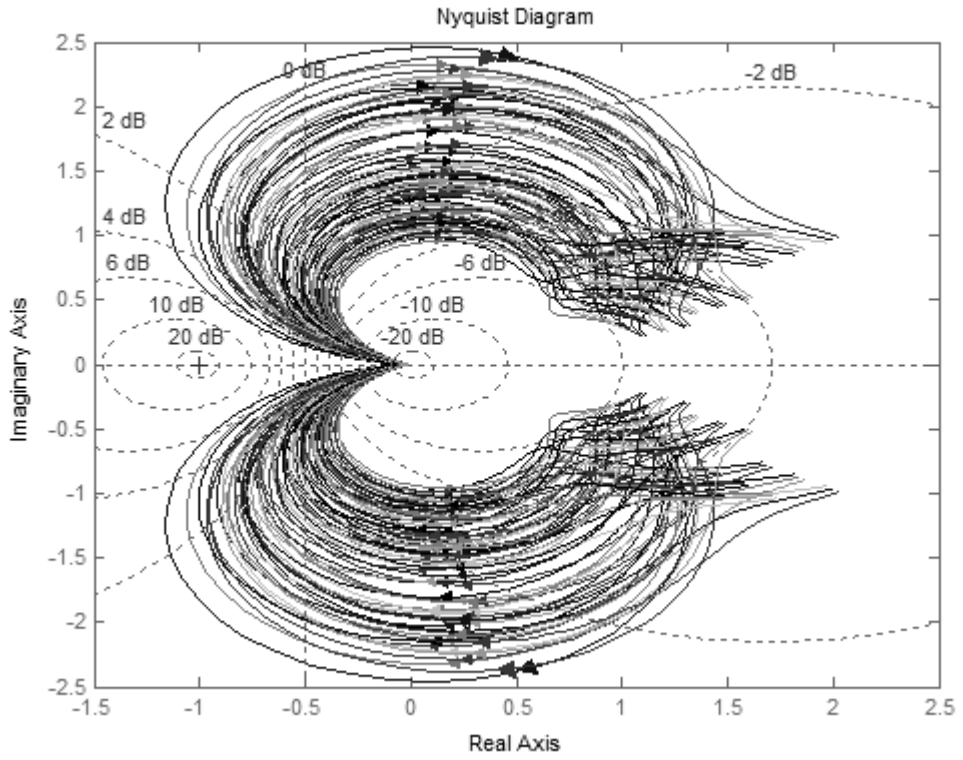
Fractional Order Controller		Proceed
[1]		Please enter the coefficients of the numerator
[1]		Please enter the coefficients of the denominator
[0]		Please enter the degrees of the numerator
[0]		Please enter the degrees of the denominator

Şekil 5.29.  $C_{(s)}(s) = 1$  kontrolör girişi

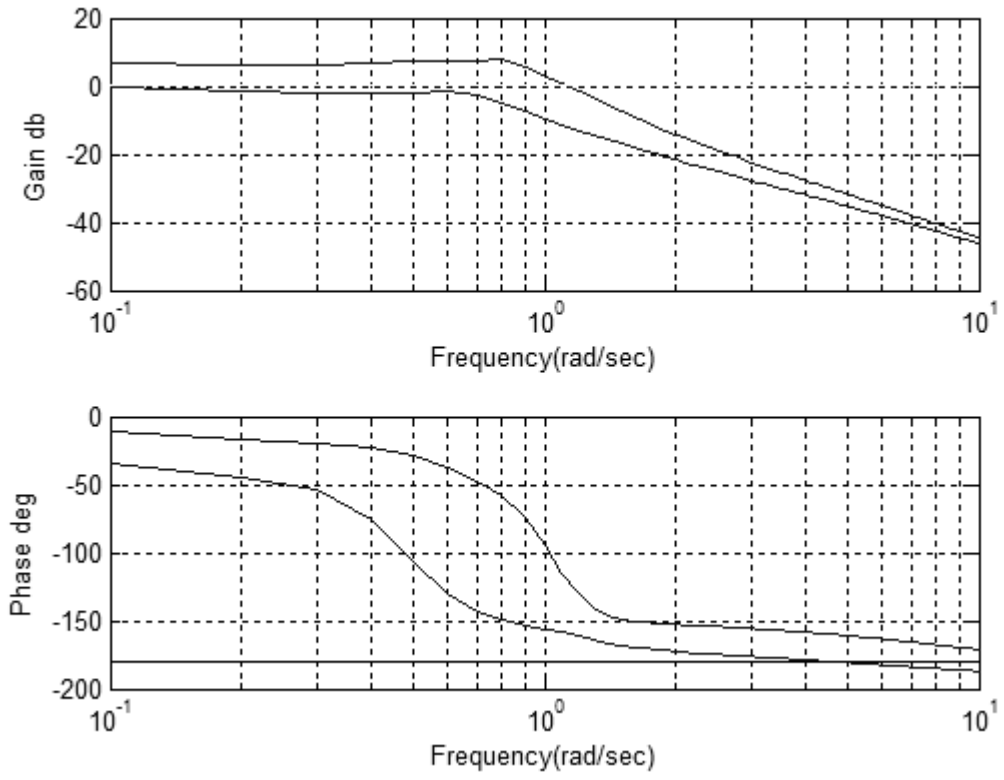
Tüm girişler yapıldıktan sonra çizim işlemi gerçekleştirilebilmektedir. Bode zarfı çizimi için çizim panelindeki “Bode Envelope” butonu tıklanmalıdır. Nyquist zarfı için de çizim panelindeki “Nyquist Envelope” butonu tıklanmalıdır. Şekil 5.30 – 5.31’de sırasıyla girilen sisteme ait Bode, Nyquist grafikleri, Şekil 5.32 – 5.33’te ise Bode, Nyquist zarfları verilmiştir.



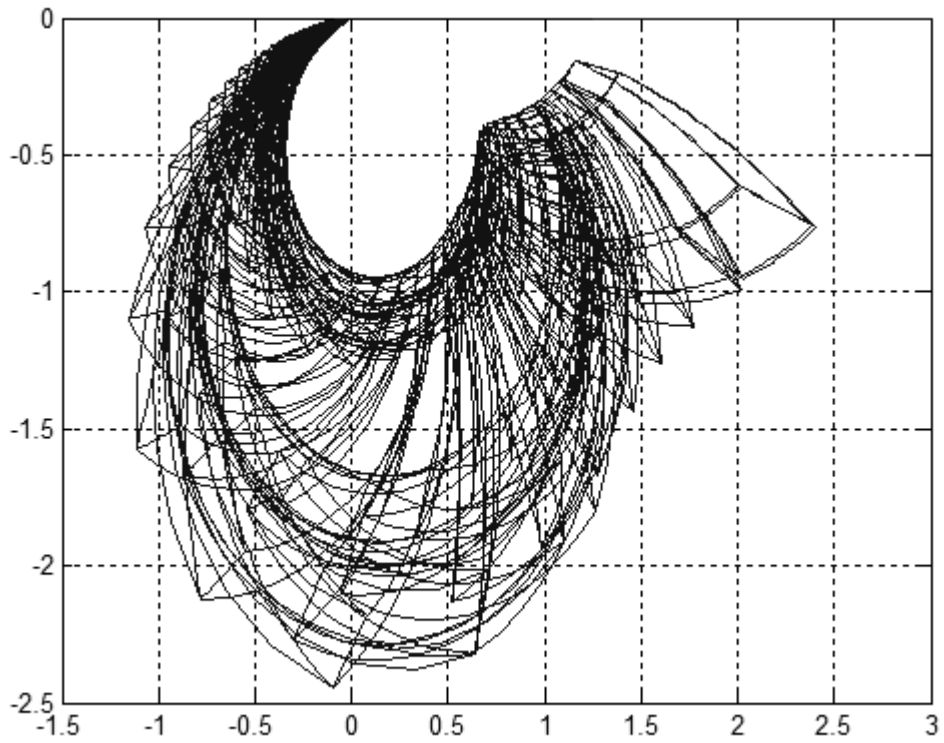
Şekil 5.30.  $G_{(s)}(s)$  sistemine ait Bode grafiği



Şekil 5.31.  $G_{(s)}(s)$  sistemine ait Nyquist grafiği



Şekil 5.32.  $G_{(s)}(s)$  sistemine ait Bode zarfı



Şekil 5.33.  $G_{(s)}(s)$  sistemine ait Nyquist zarfı

## Örnek 6.

Bu örnekte, kontrol edilmek istenen sistemin transfer fonksiyonu kesir dereceli olarak seçilmiştir. Sistem ve *PD* kontrolör aşağıdaki şekilde verilmiştir [67]. Bu şekilde tanımlama için programa Şekil 5.34'te ve Şekil 5.35'te gösterilen girişler yapılmalıdır.

$$G_{(6)}(s) = \frac{1}{0.8s^{2.2} + 0.5s^{0.9} + 1} \quad (4.28)$$

$$C_{(6)PD}(s) = 20.5 + 2.7343s \quad (4.29)$$

Fractional Order TF [Proceed]

num [1] Prepare

den [0.8 0.5 1]

[0] Please enter the coefficients of the numerator

[2.2 0.9 0] Please enter the coefficients of the denominator

Şekil 5.34.  $G_{(6)}(s)$  transfer fonksiyonu girişi

Fractional Order PID [Proceed]

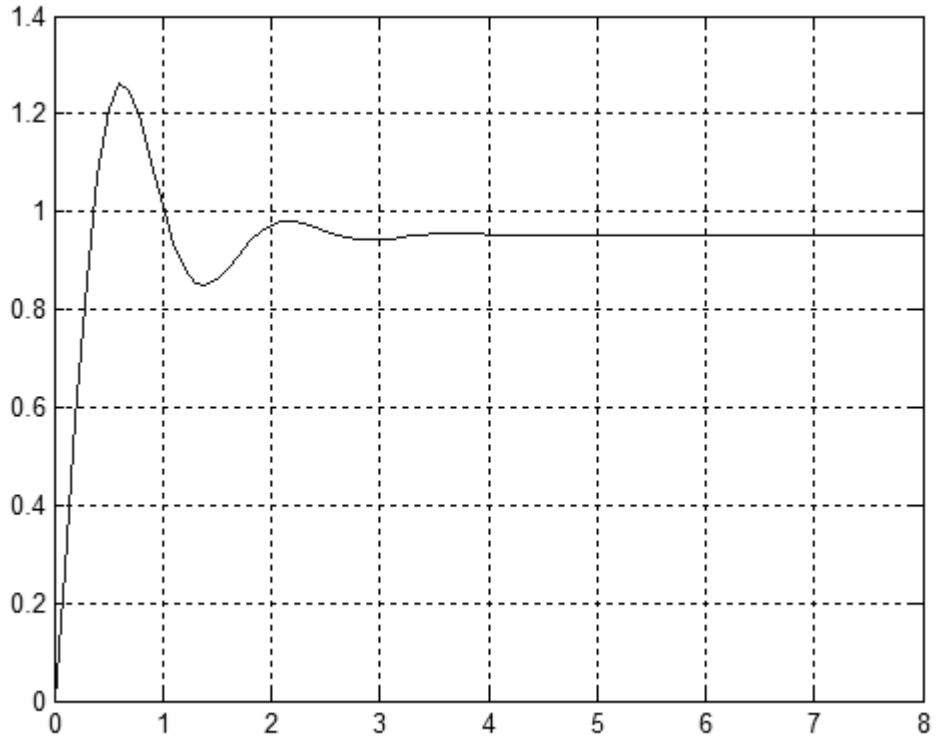
20.5 Kp 0 Ki 2.7343 Kd

0 lambda 1 mu

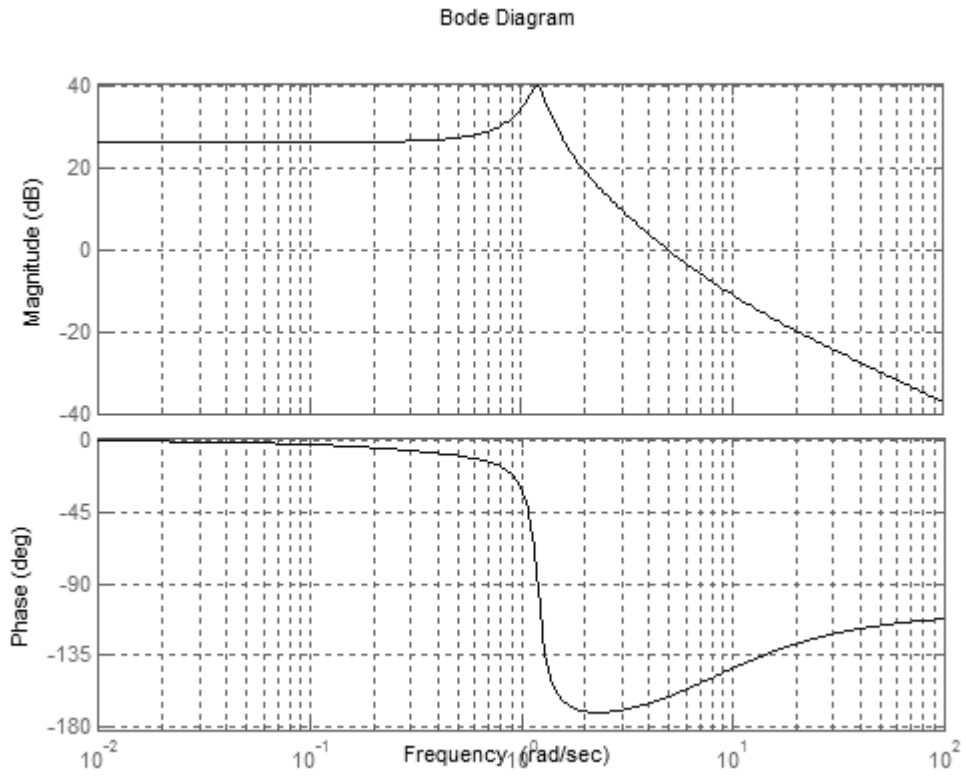
Şekil 5.35.  $C_{(6)PD}(s)$  kontrolör girişi

Bu sistemde PD kontrolör kullanıldığı için Şekil 4.94'te görüldüğü gibi kontrolör girişi yapılırken  $K_i = 0$ ,  $\lambda = 0$  ve  $\mu = 1$  değerleri girilmiştir.

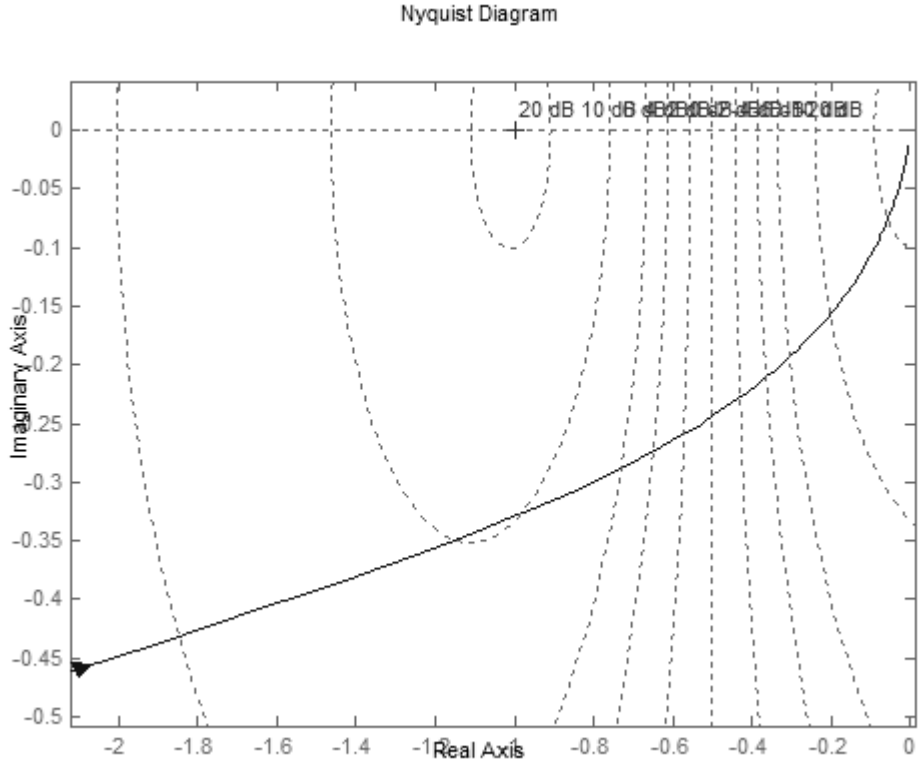
Tüm girişler yapıldıktan sonra çizim işlemi gerçekleştirilebilmektedir. Şekil 5.36 – 5.39'da sırasıyla girilen sisteme ait birim basamak tepkisi, Bode, Nyquist ve Nichols grafikleri verilmiştir.



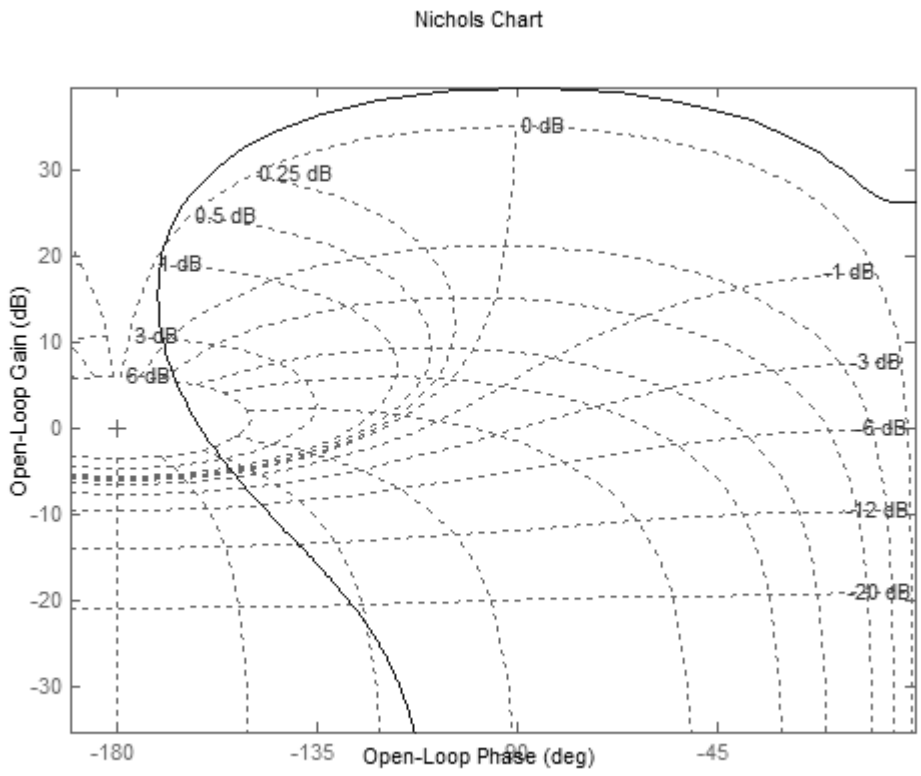
Şekil 5.36.  $C_{(6)PD}(s)G_{(6)}(s)$  sistemine ait birim basamak tepkisi



Şekil 5.37.  $C_{(6)PD}(s)G_{(6)}(s)$  sistemine ait Bode grafiği



Şekil 5.38.  $C_{(6)PD}(s)G_{(6)}(s)$  sistemine ait Nyquist grafiği



Şekil 5.39.  $C_{(6)PD}(s)G_{(6)}(s)$  sistemine ait Nichols grafiği

## Örnek 7.

Bu örnekte, kontrol edilmek istenen sistemin transfer fonksiyonu parametre belirsizliği içeren tamsayı dereceli ve kontrolör  $PI^\lambda D^\mu$  olarak aşağıdaki şekilde verilmiştir [52]. Bu şekilde tanımlama için programa aşağıdaki Şekil 5.40 – 5.42’de gösterilen girişler yapılmalıdır.

$$G_{(7)}(s) = \frac{[1 \ 1]}{[0.9 \ 1.1]s^3 + [2.9 \ 3.1]s^2 + [1.9 \ 2.1]s} e^{-0.4s} \quad (4.23)$$

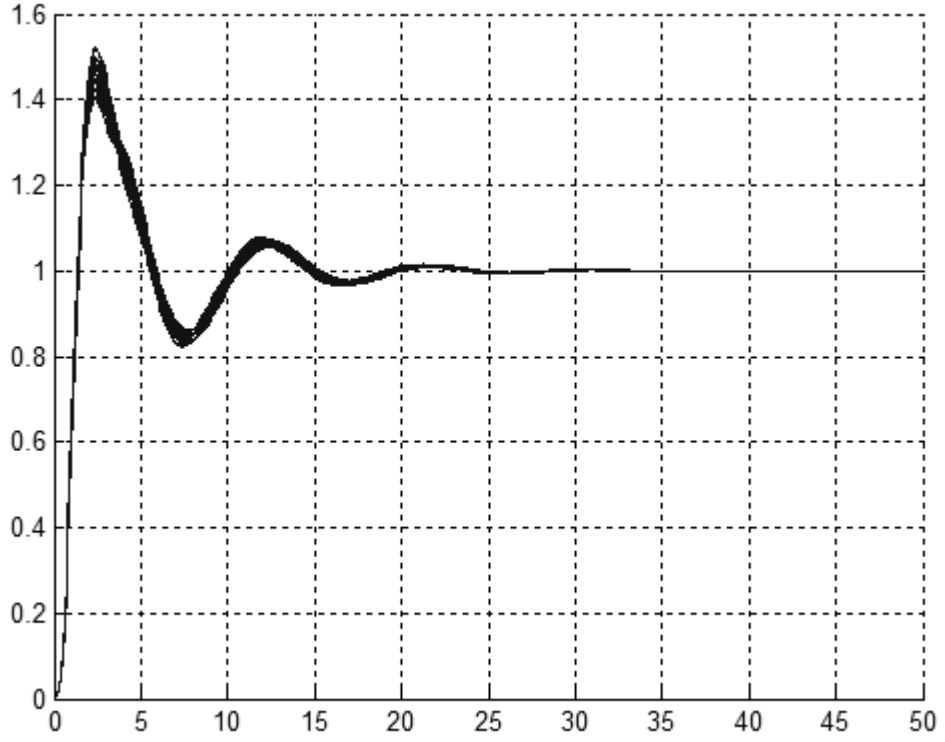
$$C_{(7)PI^\lambda D^\mu}(s) = 3.6 + \frac{1.63}{s^{1.04}} + 4s^{1.2} \quad (4.24)$$

Şekil 5.40.  $G_{(7)}(s)$  transfer fonksiyonu girişi

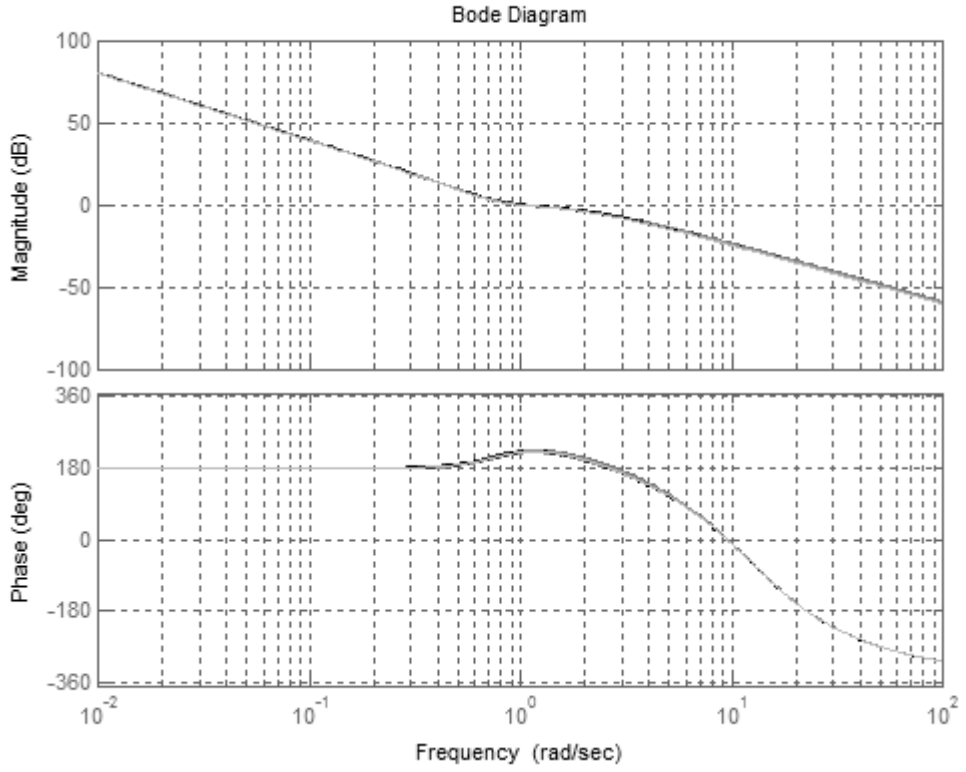
Şekil 5.41.  $C_{(7)}(s)$  kontrolör girişi

Şekil 5.42. Sisteme zaman gecikmesi eklenmesi

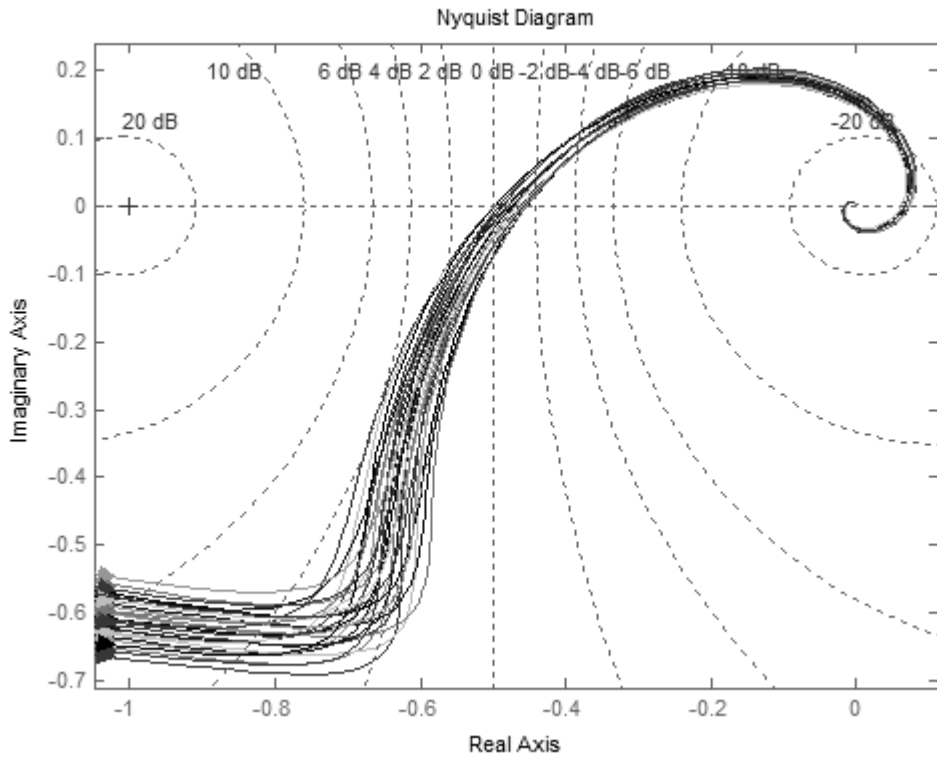
Tüm girişler yapıldıktan sonra çizim işlemi gerçekleştirilebilmektedir. Şekil 5.43 – 5.46’da sırasıyla girilen sisteme ait birim basamak tepkisi, Bode, Nyquist ve Nichols grafikleri verilmiştir.



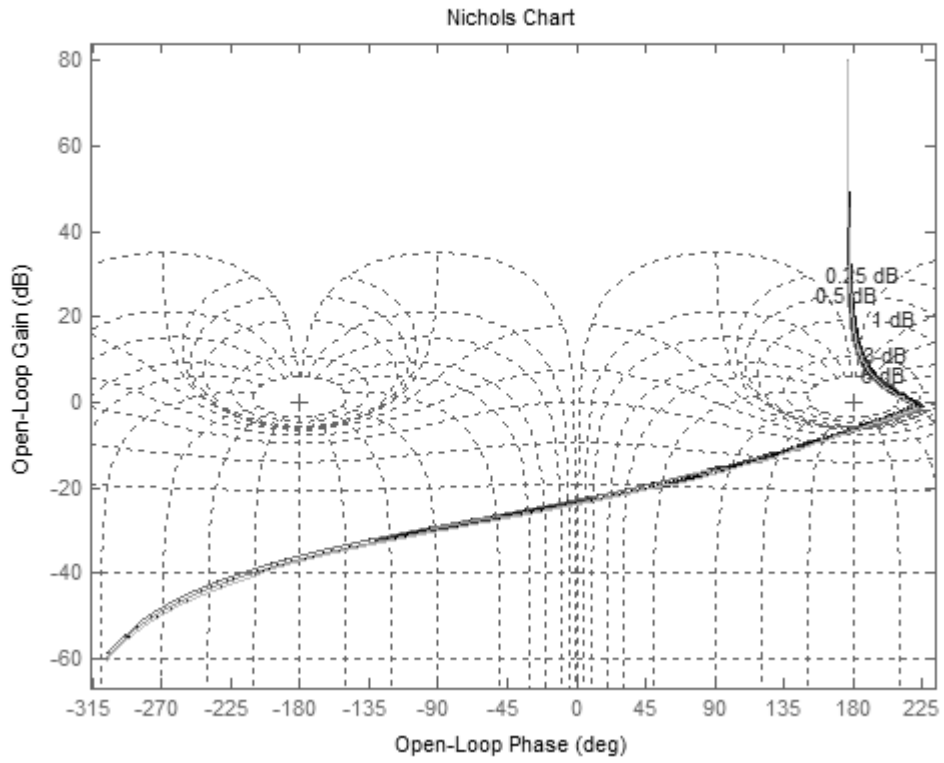
Şekil 5.43.  $C_{(\tau)PI^2D^\mu}(s)G_{(\tau)}(s)$  sistemine ait birim basamak tepkisi



Şekil 5.44.  $C_{(\tau)PI^2D^\mu}(s)G_{(\tau)}(s)$  sistemine ait Bode grafiği



Şekil 5.45.  $C_{(7)PI^2D^u}(s)G_{(7)}(s)$  sistemine ait Nyquist grafiği



Şekil 5.46.  $C_{(7)PI^2D^u}(s)G_{(7)}(s)$  sistemine ait Nichols grafiği

## 6. SONUÇLAR

Bu çalışmada, kesir dereceli kontrol sistemlerinin zaman ve frekans bölgesinde analizini kolayca yapabilmek amacıyla hem akademisyenlere hem de öğrencilere yönelik kolay kullanımlı bir program geliştirilmiştir.

Bu program, kontrol sistemi parametrelerinin rahatça girilebilmesini sağlayan bir arayüz içermektedir. Bu arayüz kullanılarak tamsayı dereceli, kesir dereceli ve parametre belirsizliği içeren tamsayı ve kesir dereceli sistemlerin parametreleri kolayca girilebilmekte ve bu sistemlerin birim basamak tepkisi, Bode, Nyquist, Nichols grafikleri ve Bode ve Nyquist zarfları kolayca çizilebilmektedir.

Bu tez çalışmasında, geliştirilen programın kullanımını ayrıntılı olarak yer almıştır. Bölüm 4'te her kontrol istemi alternatifi için menülerin nasıl kullanılacağı ayrıntılarıyla açıklanmış ve bu açıklamaların daha iyi anlaşılması için uygulama örnekleri verilmiştir.

Bu örneklerde klasik transfer fonksiyonu, klasik PID, kesir dereceli transfer fonksiyonu, kesir dereceli PID ( $PI^\lambda D^\mu$ ) içeren sistemler ve parametre belirsizliği içeren tamsayı ve kesir dereceli sistemler ele alınmış ve bu sistemlerin birim basamak tepkisi, Bode, Nyquist ve Nichols grafikleri ve Bode ve Nyquist zarfları elde edilmiştir.

Bu tez çalışmasında elde edilen sonuçların ve UFT-FOCS v.1.0 programının bu alanda yapılacak çalışmalara katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Bu tez çalışmasının çıktılarından hazırlanan “Kesir Dereceli Kontrol Sistemlerinin Analizi için Kolay Kullanımlı Program” başlıklı bildiri TOK 2011'e gönderilmiştir.

## 7. KAYNAKLAR

- [1] R. Caponetto, G. Dongola, L. Fortuna ve I. Petras, *Fractional Order Systems: Modeling and Control Applications*, World Scientific, Singapore, pp. 1-20, 2010.
- [2] A. Tustin, et. al, *The Design of Systems for Automatic Control of the Position of Massive Objects*, **The Institute of Electrical Engineers**, (105-C)1: pp. 1-57, 1958.
- [3] S. Manabe, *The Non-integer Integral and its Application to Control Systems*, **Journal of Institute of Electrical Engineers of Japan**, (80)860: pp. 589-597, 1960.
- [4] R. L. Bagley ve R. A. Calico, *Fractional-Order State Equations for the Control of Viscoelastic Damped Structures*, **J. Guidance, Control and Dynamics**, vol. 14, no. 2, pp. 304–311, 1991.
- [5] R. L. Bagley ve P. Torvik, *On the Appearance of the Fractional Derivative in the Behavior of Real Materials*, **J. Appl. Mech.** , vol. 51, pp. 294–298, 1984.
- [6] A. Makroglou, R. K. Miller ve S. Skaar, *Computational Results for a Feedback Control for a Rotating Viscoelastic Beam*, **J. Guidance, Control and Dynamics**, vol. 17, no. 1, pp. 84–90, 1994.
- [7] A. Le M'ehaut'e ve G. Crepy, *Introduction to Transfer and Motion in Fractal Media: The Geometry of Kynetics*, **Solid State Ionics**, no. 9–10, pp. 17–30, 1983.
- [8] M. Nakagawa, ve K. Sorimachi, *Basic Characteristics of a Fractance Device*, **IEICE Trans. Fundamentals**, vol. E75-A, no. 12, pp. 1814–1819, 1992.
- [9] K. B. Oldham ve C. G. Zoski, *Analogue Instrumentation for Processing Polarographic Data*, **J. Electroanal. Chem.** , vol. 157, pp. 27–51, 1983.
- [10] J. Sabatier, S. Poullain, P. Latteux, J. L. Thomas ve A. Oustaloup, *Robust Speed Control of a Low Damped Electromechanical System Based on CRONE Control: Application to a Four Mass Experimental Test Bench*, **Nonlinear Dynamics**, 38, pp. 383-400, 2004.
- [11] I. Petras, *The Fractional Order Controllers: Methods for Their Synthesis and Application*, **J. of Electrical Engineering**, 50, pp. 284-288, 1999.
- [12] I. Podlubny, *Fractional-Order Systems and  $PI^\lambda D^\mu$  Controllers*, **IEEE Transactions on Automatic Control**, vol. 44, no. 1, pp. 208–214, 1999.
- [13] S. Manabe, Early Development of Fractional Order Control, Proc. of the ASME 2003 Design Engineering Technical Conference, Chicago Illinois, 2003.
- [14] D. Valerio, J. S. da Costa, *Time Domain Implementation of Fractional Order Controllers*, **IEEE Proc. , Control Theory Appl.** , 152, (5), pp. 539-552, 2005.
- [15] J. Machado, *Discrete-Time Fractional-Order Controllers*, **Fract. Calc. Appl. Anal.** , 4, (1), pp. 47-66, 2001.
- [16] C. A. Monje, B. M. Vinagre, V. Feliu ve Y. Q. Chen, *Tuning and Auto-Tuning of Fractional Order Controllers for Industry Applications*, **Control Engineering Practice**, vol. 16, pp. 798–812, 2008.

- [17] I. A. Brin, *On the Stability of Certain Systems with Distributed and Lumped Parameters*, **Automation and Remote Control**, 23, pp. 798-807, 1962.
- [18] Y. C. Cheng, C. Hwang, *Stabilization of Unstable First-Order Time-Delay Systems Using Fractional Order PD Controllers*, **J. of the Chinese Inst. of Engineers**, 29, pp. 241-249, 2006.
- [19] C. Hwang, Y. C. Cheng, *A Numerical Algorithm for Stability Testing of Fractional Delay Systems*, **Automatica**, 42, pp. 825-831, 2006.
- [20] S. Westerlund, *Capacitor Theory*, **IEEE Trans. Dielectrics Electron. Insulation**, vol. 1, no. 5, pp. 826–839, 1994.
- [21] M. Caputo, *Elasticita e Dissipazione*, Bologna: Zanichelli, 1969.
- [22] T. F. Nonnenmacher ve W. G. Glöckle, *A Fractional Model for Mechanical Stress Relaxation*, **Philosophical Magazine Lett.**, vol. 64, no. 2, pp. 89–93, 1991.
- [23] C. Friedrich, *Relaxation and Retardation Functions of the Maxwell Model with Fractional Derivatives*, **Rheol. Acta.**, vol. 30, pp. 151–158, 1991.
- [24] M. Caputo ve F. Mainardi, *A New Dissipation Model Based on Memory Mechanism*, **Pure and Appl. Geophysics**, vol. 91, no. 8, pp. 134–147, 1971.
- [25] S. Westerlund, *Causality*, Univ. Kalmar, Rep. 940426, 1994.
- [26] A. Oustaloup, *La Derivation Non Entiere: Theorie, Synthèse et Applications*, Paris (Hermès), 1995.
- [27] P. Arena, R. Caponetto, L. Fortuna, ve D. Porto, *Non Linear Non Integer Order Systems - An Introduction*, World Scientific, 2000.
- [28] T. Machado, M. Da Graca Marcos, ve F. Duarte, *Fractional Dynamics in the Trajectory Control of Redundant Manipulators*, **Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation**, vol. 13, no. 9, pp. 1836–1844, 2008.
- [29] G. W. Bohannan, *Analog Fractional Order Controller in a Temperature Control Application*, in Proc. IFAC Workshop on Fractional Differentiation and its Application (FDA'06), Porto, Portugal, 2006.
- [30] I. Podlubny, I. Petras, B. M. Vinagre, P. O'Leary, ve L. Dorcak, *Analogue Realization of Fractional Order Controller*, **Nonlinear Dyn.**, 29, 1-4, pp. 281–296, 2002.
- [31] B. M. Vinagre, C. A. Monje, V. Feliu ve Y. Q. Chen, *On Auto-Tuning of Fractional Order  $PI^\lambda D^\mu$  Controllers*, in Proc. IFAC Workshop on Fractional Differentiation and its Application (FDA'06), Porto, Portugal, 2006.
- [32] B. M. Vinagre, Y. Q. Chen, H. Dou ve C. A. Monje, *Robust Tuning Method for Fractional Order PI Controllers*, in Proc. IFAC Workshop on Fractional Differentiation and its Application (FDA'06), Porto, Portugal, 2006.
- [33] D. Valerio ve S. J. da Costa, *Tuning-Rules for Fractional PID Controllers*, in Proc. IFAC Workshop on Fractional Differentiation and its Application (FDA'06), Porto, Portugal, 2006.
- [34] R. Caponetto, L. Fortuna ve D. Porto, *A new tuning strategy for non integer order PID controller*, in Proc IFAC Workshop on Fractional Differentiation and its Application (FDA'04), Bordeaux, France, 2004.

- [35] B. M. Vinagre, I. Podlubny, L. Dorcak, ve V. Feliu, On Fractional PID Controllers: A Frequency Domain Approach, IFAC workshop on Past, present and future of PID control, pp. 53–58, Terrasa, Spain, 2000.
- [36] I. Petras, ve M. Hypiusova, *Design of Fractional Order Controllers Via  $H_\infty$  Norm Minimization*, **Selected Topics in Modeling and Control**, vol. 3, pp. 50–54, 2002.
- [37] Y. Q. Chen, ve K. L. Moore, *Discretization Schemes for Fractional Order Differentiators and Integrators*, **IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications**, vol. 49(3), pp. 363–367, 2002.
- [38] Y. Q. Chen ve K. L. Moore, *Analytical Stability Bound For a Class of Delayed Fractional-Order Dynamic Systems*, **Nonlinear Dynamics**, 29, pp. 191–200, 2002.
- [39] Y. Q. Chen, B. M. Vinagre ve I. Podlubny, *Continued Fraction Expansion Approaches to Discretizing Fractional Order Derivatives — An Expository Review*, **Nonlinear Dynamics**, vol.38, pp. 155–170, 2004.
- [40] D. Xue ve Y. Q. Chen, A comparative Introduction of Four Fractional Order Controllers, Proceeding the 4th World Congress, Intelligent Control and Auto, vol. 4 pp. 3228–3235, 2002.
- [41] S. E. Hamamci, *An Algorithm for Stabilization of Fractional-Order Time Delay Systems Using Fractional Order PID Controllers*, **IEEE Trans. On Automatic Control**, vol. 52, pp. 1964–1969, 2007.
- [42] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, Prentice Hall, New Jersey Publisher. , 2002.
- [43] K. Astrom ve T. Hagglund, *PID Controllers: Theory, Design and Tuning*, Instrument society of America, North Carolina, 1995.
- [44] S. P. Bhattacharyya, A. Datta ve M. T. Ho, *Structure and Synthesis of PID Controller*, Springer-Verlag, 2000.
- [45] S. P. Bhattacharyya, G. J. Silva ve A. Datta, *New Results on the Synthesis of PID Controllers*, **IEEE Trans. Automatic Control**, 47, pp. 241–252, 2002.
- [46] A. Oustaloup, *La Commande CRONE: Commande Robuste d'Ordre Non Entier*, Hermes, Paris, 1991.
- [47] A. Oustaloup ve M. Bansard, *First Generation CRONE control*, in **Proc. International Conference on Systems, Man and Cybernetics**, Oct. 17- 20, vol. 2, pp. 130–135, 1993.
- [48] A. Oustaloup, P. Lanusse ve B. Mathieu, *Second generation CRONE control*, in **Proc. International Conference on Systems, Man and Cybernetics**, Oct. 17- 20, vol. 2, pp. 136–142, 1993.
- [49] A. Oustaloup, P. Lanusse ve B. Mathieu, *Third generation CRONE control*, in **Proc. International Conference on Systems, Man and Cybernetics**, Oct. 17- 20, vol. 2, pp. 149–155, 1993.
- [50] D. Valerio, Ninteger v. 2.3 Fractional Control Toolbox for MATLAB, <http://web.ist.utl.pt/~duarte.valerio>, 2005.
- [51] C. Martin ve S. Milos, *PID Controller Design on Internet: www.PIDlab.com*, Department of Cybernetics, University of West Bohemia in Pilsen, 2006.

- [52] C. Yeroglu ve N. Tan, Development of a Toolbox for Frequency Response Analysis of Fractional Order Control Systems, 19th European Conference on Circuit Theory and Design, Antalya, 2009.
- [53] K. B. Oldham ve J. Spanier, *The Fractional Calculus*, New York and London, Academic Press, 1974.
- [54] I. Podlubny, *Fractional Differential Equations*, Vol. 198, **Mathematics in Science and Engineering**, New York and Tokyo, Academic Press, 1999.
- [55] K. B. Oldham ve J. Spanier, *The Fractional Calculus: Theory and Applications of Differentiation and Integration to Arbitrary Order*, Dover Books on Mathematics, 2006.
- [56] B. Ross, *Fractional Calculus and its Applications*, Springer - Verlag, Berlin, 1975.
- [57] J. Sabatier, O. P. Agrawal ve J. A. Machado, *Advances in Fractional Calculus: Theoretical Developments and Applications in Physics and Engineering* Springer, 2007.
- [58] A. A. Kilbas, H. M. Srivastava ve J. J. Trujillo, *Theory and Applications of Fractional Differential Equations*, Elsevier, 2006.
- [59] S. Das, *Functional Fractional Calculus for System Identification and Controls*, Springer, 2007.
- [60] I. Podlubny, *Fractional-Order Systems and Fractional-Order Controllers*, UEF-03-94, Slovak Academy of Sciences, Kosice, 1994.
- [61] MATLAB: Introduction and Key Features, [www.mathworks.com/products/matlab/description1.html](http://www.mathworks.com/products/matlab/description1.html)
- [62] D. Xue, Y. Q. Chen ve D. Atherton, *Linear Feedback Control: Analysis and design with MATLAB*, Advances in Design and Control, Siam, 2007.
- [63] C. Yeroglu, N. Tan ve M. M. Özyetkin, *Frequency Response Computation of Fractional Order Interval Transfer Functions*, **International Journal of Control and Systems**, 2010.
- [64] C. Zhao, D. Xue ve Y. Q. Chen, *A fractional order PID tuning algorithm for a class of fractional order plants*, Proc. of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Niagara Falls, Canada, pp. 216-221, 2005.
- [65] C. Yeroglu, N. Tan, Robust Parametric Classical Controller Design for Fractional Order Plant, Fractional Differentiation and Applications, FDA10, Spain, 2010.
- [66] S. Das, S. Saha, S. Das ve A. Gupta, *On the Selection of Tuning Rule of FOPID Controllers for the Control of Higher Order Processes*, **ISA Transactions**, vol. 50, issue 3, pp. 376-388, 2011
- [67] L. Dorcak, *Numerical Models for Simulation the Fractional - Order Control Systems*, UEF SAV, The Academy of Sciences Institute of Experimental Physics, Kosice, Slovak Republic, 1994.

## 8. EKLER

Ekler bölümünde verilen tüm fonksiyonlar [62] nolu kaynaktan alınmıştır.

### fotf.m

Bu fonksiyon, kesir dereceli transfer fonksiyonları oluşturmak için kullanılmaktadır.

```
function G=fotf(a,na,b,nb)
if nargin==0
    G.a=[];
    G.na=[];
    G.b=[];
    G.nb=[];
    G=class(G,'fotf');
elseif isa(a,'fotf')
    G=a;
elseif nargin==1 && isa(a,'double')
    G=fotf(1,0,a,0);
else
    ii=find(abs(a)<eps);
    a(ii)=[]; na(ii)=[];
    ii=find(abs(b)<eps);
    b(ii)=[]; nb(ii)=[];
    G.a=a;
    G.na=na;
    G.b=b;
    G.nb=nb;
    G=class(G,'fotf');
end
```

### display.m

Bu fonksiyon, oluşturulan transfer fonksiyonlarının ekranda gösterilmesi için kullanılmaktadır.

```
function display(G)
strN=polydisp(G.b,G.nb);
strD=polydisp(G.a,G.na);
nm=max([length(strN),length(strD)]);
nn=length(strN); nd=length(strD);
disp([char(' '*ones(1,floor((nm-nn)/2))) strN]);
disp(char('-'*ones(1,nn)));
disp([char(' '*ones(1,floor((nm-nd)/2))) strD]);
function strP=polydisp(p,np)
P='';
[np,ii]=sort(np,'descend');
p=p(ii);
for i=1:length(p)
    P=[P,'+',num2str(p(i)),'s^{',num2str(np(i)),'}'];
end
end
P=P(2:end);
P=strrep(P,'s^{0}','');
P=strrep(P,'+-',' -');
P=strrep(P,'^{1}','');
P=strrep(P,'+ls','+s');
```

```

strP=strrep(P, '-1s', '-s');
if length(strP)>=2
    if strP(1:2)=='1s'
        strP=strP(2:end);
    end
end
end

```

### **mtimes.m**

mtimes.m fonksiyonu, birbirine seri olarak bağlanmış iki transfer fonksiyonunu çarpma işleminde kullanılmaktadır.

```

function G=mtimes(G1,G2)
G2=fotf(G2);
a=kron(G1.a,G2.a);
b=kron(G1.b,G2.b);
na=[];
nb=[];
for i=1:length(G1.na)
    na=[na,G1.na(i)+G2.na];
end
for i=1:length(G1.nb)
    nb=[nb,G1.nb(i)+G2.nb];
end
G=unique(fotf(a,na,b,nb));

```

### **plus.m**

plus.m fonksiyonu, birbirine paralel olarak bağlanmış iki transfer fonksiyonunu toplama işleminde kullanılmaktadır.

```

function G=plus(G1,G2)
a=kron(G1.a,G2.a);
b=[kron(G1.a,G2.b), kron(G1.b,G2.a)];
na=[]; nb=[];
for i=1:length(G1.a)
    na=[na G1.na(i)+G2.na];
    nb=[nb, G1.na(i)+G2.nb];
end
for i=1:length(G1.b)
    nb=[nb G1.nb(i)+G2.na];
end
G=unique(fotf(a,na,b,nb));

```

### **feedback.m**

feedback.m fonksiyonu bir transfer fonksiyonuna geribesleme eklemek için kullanılmaktadır.

```

function G=feedback(F,H)
H=fotf(H);
b=kron(F.b,H.a);
a=[kron(F.b,H.b) kron(F.a,H.a)];
na=[];

```

```

nb=[];
for i=1:length(F.b)
    nb=[nb F.nb(i)+H.nb];
    na=[na,F.nb(i)+H.nb];
end
for i=1:length(F.a)
    na=[na F.na(i)+H.na];
end
G=unique(fotf(a,na,b,nb));

```

### **unique.m**

unique.m fonksiyonu, çarpma, toplama ve geribesleme işlemlerinden sonra elde edilen transfer fonksiyonlarının sadeleştirilmesi için kullanılır.

```

function G=unique(G)
[a,n]=polyuniq(G.a,G.na);
G.a=a; G.na=n;
[a,n]=polyuniq(G.b,G.nb);
G.b=a; G.nb=n;
function [a,an]=polyuniq(a,an)
[an,ii]=sort(an,'descend');
a=a(ii); ax=diff(an);
key=1;
for i=1:length(ax)
    if ax(i)==0
        a(key)=a(key)+a(key+1);
        a(key+1)=[];
        an(key+1)=[];
    else
        key=key+1;
    end
end
end

```

### **step.m**

step.m fonksiyonu, girilen kesir dereceli transfer fonksiyonunun birim basamak tepkisini elde etmek için kullanılmaktadır.

```

function y=step(G,t)
u=ones(size(t));
y=lsim(G,u,t);
if nargout==0
    plot(t,y);
end

```

### **lsim.m**

lsim.m fonksiyonu girilen transfer fonksiyonunun zaman bölgesi cevabını hesaplamak için kullanılır.

```

function y=lsim(G,u,t)
a=G.a;

```

```

eta=G.na;
b=G.b;
gamma=G.nb;
nA=length(a);
h=t(2)-t(1);
D=sum(a./[h.^eta]);
W=[]; nT=length(t);
vec=[eta gamma];
Dl=b(:)./h.^gamma(:);
y1=zeros(nT,1);
W=ones(nT,length(vec));
for j=2:nT,
    W(j,:)=W(j-1,:).*(1-(vec+1)/(j-1));
end
for i=2:nT
A=[y1(i-1:-1:1)]'*W(2:i,1:nA);
y1(i)=(u(i)-sum(A.*a./[h.^eta]))/D;
end
for i=2:nT
    y(i)=(W(1:i,nA+1:end)*Dl)'+[y1(i:-1:1)];
end

```

### **bode.m**

bode.m fonksiyonu, girilen transfer fonksiyonunun frekans bölgesi analizinde Bode grafiğini elde etmek için kullanılır.

```

function H=bode(G,w)
a=G.a;
eta=G.na;
b=G.b;
gamma=G.nb;
if nargin==1
end
for i=1:length(w)
P=b*((sqrt(-1)*w(i)).^gamma. ');
Q=a*((sqrt(-1)*w(i)).^eta. ');
H1(i)=P/Q;
end
H1=frd(H1,w);
if nargout==0
    bode(H1);
else
    H=H1;
end

```

## **ÖZGEÇMİŞ**

Bilal ŞENOL, 1985 yılında Nevşehir’de doğdu. İlkokul eğitimini sırasıyla Aksaray, Malatya ve ABD’de tamamladı. Ortaokul ve lise eğitimini Malatya Anadolu Lisesi’nde tamamladıktan sonra 2009 yılında İnönü Üniversitesi Elektrik – Elektronik Mühendisliği bölümünden mezun oldu. Aynı yıl, mezun olduğu bölümde yüksek lisans eğitimine başladı. Şu anda İnönü Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği bölümünde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.