

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KATSAYI DİYAGRAM YÖNTEMİ VE UYGULAMALARI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Selman Fatih AVŞAR**

**Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Programı**

**HAZİRAN 2012**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KATSAYI DİYAGRAM YÖNTEMİ VE UYGULAMALARI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Selman Fatih AVŞAR  
(504091118)**

**Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Programı**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. M. Turan SÖYLEMEZ**

**05 HAZİRAN 2012**



İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504091118 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Selman Fatih AVŞAR**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**KATSAYI DİYAGRAM YÖNTEMİ VE UYGULAMALARI** ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :**      **Doç. Dr. M. Turan SÖYLEMEZ**      .....

İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :**      **Prof. Dr. Leyla GÖREN**      .....

İstanbul Teknik Üniversitesi

**Yrd. Doç. Dr. İlker ÜSTOĞLU**      .....

Yıldız Teknik Üniversitesi

**Teslim Tarihi :**      **04 Mayıs 2012**  
**Savunma Tarihi :**      **05 Haziran 2012**



## ÖNSÖZ

Tez çalışmamın tüm safhalarında bana her konuda emeğini esirgemedi yardımcı olan tez danışmanım Sayın Doç. Dr. M. Turan SÖYLEMEZ'e ve benim yetişmeye katkı sağlayan tüm İTÜ Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine teşekkür ederim.

Ayrıca yüksek lisans yaparken bir süre araştırma görevlisi olarak çalıştığım İnönü Üniversitesi Elektrik – Elektronik Mühendisliği Bölümündeki öğretim üyelerine ve öğretim elemanlarına, özellikle tez konumla ilgili sürekli olarak fikir alışverişi yaptığım ve fikirleriyle ufkumu genişleten Sayın Doç. Dr. Serdar Ethem HAMAMCI'ya, laboratuvar uygulamalarında yardımlarını esirgemeyip bilgilerini benimle paylaşan Sayın Yrd. Doç. Dr. Ömer Faruk ÖZGÜVEN'e ve ne zaman bir ihtiyacım olsa yanımda bulduğum Sayın Arş. Grv. Cemal KELEŞ'e teşekkür ederim.

Ve tabii ki yaşamım boyunca beni hep destekleyen ve hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan aileme ve dostlarıma sonsuz şükranlarımı sunarım.

Mayıs 2012

Selman Fatih AVŞAR



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
KISALTMALAR .....	xiii
SEMBOL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY .....	xix
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. KATSAYI DİYAGRAM YÖNTEMİ .....</b>	<b>7</b>
2.1 Kontrol Sistem Yapısı .....	8
2.2 Tasarım Parametreleri, Karakteristik Denklem ve Kararlılık .....	10
2.2.1 $\tau$ ve $\gamma_i$ 'nin sistem cevabına etkisi .....	11
2.2.2 Kararlılık indeksinin seçimi .....	13
2.2.3 Kararlılık .....	16
2.2.4 Dayanıklılık.....	18
2.3 Katsayı Diyagramı.....	19
2.3.1 Katsayı diyagramı ile sistemin hızının tayin edilmesi .....	20
2.3.2 Katsayı diyagramı ile sistemin kararlılığının tayin edilmesi: .....	20
2.3.3 Katsayı diyagramı ile sistemin dayanıklılığının tayin edilmesi:.....	22
2.4 Tasarım Prosedürü.....	25
2.5 Bir Örnek.....	27
<b>3. KDY MATLAB ARAYÜZÜ.....</b>	<b>31</b>
3.1 'Main Parameters' Paneli .....	32
3.2 'Extras' Paneli .....	33
3.3 'Control Signal Optimization' Paneli.....	35
3.4 'Stability Index Adjustment' Paneli.....	40
3.5 'Outputs' Paneli.....	43
<b>4. KDY-P .....</b>	<b>47</b>
<b>5. FİZİKSEL UYGULAMA .....</b>	<b>49</b>
5.1 Modelin Elde Edilmesi.....	50
5.2 Kontrolcülerin Elde Edilmesi.....	51
5.2.1 KDY kontrolcüsünün elde edilmesi .....	51
5.2.2 Optimal PI kontrolcüsünün elde edilmesi .....	53
5.3 Performans Karşılaştırması .....	54
5.3.1 Simülasyon performansı karşılaştırmaları .....	54

5.3.2 Uygulama performansı karşılaştırmaları.....	55
5.4 Konum Kontrolü Simülasyon Karşılaştırması.....	57
<b>6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>	<b>63</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>65</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>69</b>

## ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 : $\tau$ ve $\gamma_i$ 'nin değişiminin yanıtta etkisi. ....	12
Çizelge 2.2 : KDY – MISE – Gaussian standart formlarının karşılaştırılması.....	15
Çizelge 2.3 : Şimdiye kadar önerilmiş çeşitli standart formlar. ....	16
Çizelge 2.4 : Kontrolcü polinomlarının dereceleri. ....	26
Çizelge 5.1 : Kontrolcülerin simülasyon performanslarının karşılaştırılması. ....	55
Çizelge 5.2 : Kontrolcülerin uygulama performansının karşılaştırılması.....	57
Çizelge 5.3 : Konum kontrolcülerinin performans karşılaştırması.....	61



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1 : KDY standart blok diyagramı. ....	8
Şekil 2.2 : Uygulamaya yönelik olarak önerilmiş eşdeğer blok diyagramı.....	10
Şekil 2.3 : KDY formunda $\tau$ 'nun değişen değerleri için sistem cevabının değişimi.	12
Şekil 2.4 : Butterworth formunda farklı $\tau$ değerleri için sistem cevabı.....	13
Şekil 2.5 : KDY formunda 6. 7. ve 8. dereceden sistemlerin basamak yanıtı. ....	15
Şekil 2.6 : Katsayı diyagramı.....	21
Şekil 2.7 : Katsayı diyagramından kararlılık indekslerinin bulunması.....	23
Şekil 2.8 : Katsayı diyagramı ile kararlılığın belirlenmesi. ....	24
Şekil 2.9 : Kontrol sisteminin basamak yanıtı. ....	28
Şekil 2.10 : Katsayı diyagramı.....	29
Şekil 3.1 : 'CDM Matlab Tool' arayüzü genel görünümü. ....	32
Şekil 3.2 : Kök eğrisi. ....	33
Şekil 3.3 : Bode ve nyquist eğrileri. ....	34
Şekil 3.4 : Simulink modeli. ....	36
Şekil 3.5 : Birkaç $\tau$ değeri için kontrol işaretleri.....	37
Şekil 3.6 : $\tau$ 'nun değişimine göre kontrol işaretinin genliğinin değişimi.....	38
Şekil 3.7 : Greedy algoritma akış diyagramı. ....	39
Şekil 3.8 : Kullanıcı tanımlı hata fonksiyonu giriş ekranı. ....	42
Şekil 3.9 : Geliştirilen arayüzün 'summary' çıktısı.....	45
Şekil 4.1 : Simülasyonda bir sistemi başka bir sisteme benzetme.....	48
Şekil 5.1 : Uygulamanın yapıldığı laboratuvar ortamının görüntüsü .....	49
Şekil 5.2 : Uygulamanın blok diyagramı.....	50
Şekil 5.3 : Optimizasyon sonucunda elde edilen ekran çıktısı. ....	53
Şekil 5.4 : Basamak yanıtı ve bozucuya tepki. ....	54

<b>Şekil 5.5</b> : KDY ve optimal PI kontrolcülerinin parametre belirsizliklerine tepkisi. ....	55
<b>Şekil 5.6</b> : Basamak yanıtı, bozucu ve yüke dayanım. ....	56
<b>Şekil 5.7</b> : Uygulamadaki kontrol işaretleri. ....	56
<b>Şekil 5.8</b> : Sinüsoidal izleme.....	58
<b>Şekil 5.9</b> : Konum kontrolü için basamak yanıtı ve bozucu tepkisi. ....	60

## KISALTMALAR

<b>Ts</b>	: Yerleşme Zamanı
<b>KD</b>	: Katsayı Diyagramı
<b>KDY</b>	: Katsayı Diyagram Metodu
<b>ISE</b>	: Hatanın karesinin İntegrali
<b>MISE</b>	: Değiştirilmiş ISE
<b>ITSE</b>	: Hatanın karesi ile zamanın çarpımının integrali
<b>ITAE</b>	: Hatanın mutlak değeri ile zamanın çarpımının integrali
<b>BLDC</b>	: Fırçasız DC
<b>ÇGÇÇ</b>	: Çok Giriş Çok Çıkış
<b>TGTC</b>	: Tek Giriş Tek Çıkış
<b>CS</b>	: Kontrol İşareti
<b>MB</b>	: Matlab Tabanlı
<b>GUI</b>	: Grafiksel Kullanıcı Arayüzü



## SEMBOL LİSTESİ

$\tau$	: Eşdeğer zaman sabiti
$\gamma_i$	: Kararlılık indeksi
$\gamma_i^*$	: Kararlılık sınır indeksi
$a_i$	: $P(s)$ karakteristik polinomunun katsayıları
$k_i$	: $B(s)$ kontrolör polinomunun katsayıları
$l_i$	: $A(s)$ kontrolör polinomunun katsayıları
$p$	: $A(s)$ kontrolör polinomunun mertebesi
$q$	: $B(s)$ kontrolör polinomunun mertebesi
$m$	: $N(s)$ sistem pay polinomunun mertebesi
$r$	: $D(s)$ sistem payda polinomunun mertebesi



## KATSAYI DİYAGRAM YÖNTEMİ VE UYGULAMALARI

### ÖZET

Klasik kontrol ve modern kontrol teorileri kontrol sistem tasarımında sıklıkla kullanılan yöntemlerdir ancak bunların dışında bir üçüncü kontrol sistem tasarım yöntemi de cebirsel yaklaşımdır. Cebirsel yaklaşım, klasik kontrol ile modern kontrol arasındadır. Polinomsal gösterim kullandığı için sıklıkla polinomsal yaklaşım olarak da isimlendirilir. Bu gösterimde transfer fonksiyonunun payı ve paydası birbirinden bağımsız olarak düşünülür. Lineer cebirsel kontrol tasarım yöntemleri olarak isimlendirilen ve polinomsal gösterimi kullanan bu yöntemler, 1980'lerde ortaya çıkan gözlenebilir ve kontrol edilebilir durum uzayı kanonik formuna denktir. En önemli özellikleri, klasik ve modern kontrol teorilerinin avantajlarını birleştirmesidir. Bu yöntemler arasında en çok kullanılanlardan ve en iyi sonuç verenlerden biri Shunji Manabe tarafından ortaya atılmış Katsayı Diyagram Yöntemidir. KDY, geçmiş fikir ve tecrübelerden yararlanılarak klasik ve modern kontrol teorilerinin avantajlarının uygun bir şekilde bir araya getirilmesi sonucunda elde edilmiş bir kontrol sistem tasarım yöntemidir.

İyi kontrol, kontrolcüden beklenenle kontrol edilen arasındaki uzlaşmanın sonucunda elde edilir. Başka bir deyişle iyi kontrol; ne yapılmalıyla, ne yapılabilir arasındaki uzlaşmadır. Klasik kontrol bu uzlaşmanın ne yapılabilir tarafına daha yakınken, modern kontrol bu uzlaşmanın ne yapılmalı tarafına daha yakındır. Uzlaşma, kontrol sistem tasarımında önemli olduğu için tasarım aşamasına uzlaşmayı kolaylaştıracak mekanizmalar yerleştirilmesi gerekmiştir. İnsanoğlunun grafiksel olarak açıklanmış bir problemde oldukça yüksek uzlaşma kabiliyeti vardır. Grafiksel yöntem uzlaşma için bir anahtardır. KDY'deki Katsayı Diyagramı (KD) iyi uzlaşmanın alt yapısını hazırlamaktadır. KD, kontrol sistem tasarımının üç ana unsuru olan kararlılık, cevap hızı ve dayanıklılık özelliklerini tek bir diyagram üzerinde gösterir ve bu da tasarımcının kontrol sistemine tam olarak hakim olmasını sağlar. KD, kontrol sistem tasarımının üç ana unsuru arasında uzlaşma sağlamayı oldukça kolaylaştırmakta ve bu da KDY'nin kontrol sistem tasarımındaki gücünün temel kaynağını oluşturmaktadır.

KDY, etkili bir kontrolcü tasarım yöntemidir ancak etkin bir şekilde kullanımı için bilgisayar programına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ihtiyacı karşılamak üzere 2000'li yıllarda çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalara rağmen, Manabe 2002 yılında iyi bir KDY programına şiddetle ihtiyaç olduğunu belirtmiş ve bu çalışmaların

geliştirilmesi gerektiğini ifade etmiştir. Bu tarihten sonra, bu konuda birkaç çalışma daha yapılmıştır. Bunlardan biri Manabe'nin kendi sitesinde yayınladığı Matlab tabanlı CDMCAD yazılımı, diğeri ise Köksal ve Hamamcı'nın tasarladığı Matlab tabanlı bir kullanıcı arayüzüdür. CDMCAD, bir arayüz içermemektedir. Bir klasör içinde birçok m-file bulunmaktadır ve ihtiyaca göre çeşitli m-file'ların kullanımı gerekmektedir. Bir arayüz olmadığı için fonksiyonların kullanımını ve hangisinin nerede kullanılacağını öğrenmek ekstra bir emek harcamayı gerektirmektedir. Hamamcı'nın tasarladığı kullanıcı arayüzü ise etkileşimli bir arayüz değildir. KDY kontrolörlerini bulmaktadır ancak kullanıcıya derinlemesine analiz yapma imkanı tanımamaktadır. Bu tez çalışması kapsamında 'CDM Matlab Tool' şeklinde isimlendirilmiş kullanıcı dostu bir arayüz geliştirilmiştir. Bu arayüz, KDY'nin etkin ve hızlı bir şekilde kullanımı için tasarlanmıştır ve KDY kontrolcülerini bulmasının yanı sıra kullanıcının çok çeşitli analizler yapmasına da olanak tanır. Tasarım aşamasında akla gelebilecek sorulara cevap verilmeye çalışılmıştır. Arayüz kullanım esnasında kullanıcıya yol gösterecek birçok bildirim ve uyarılarla donatılmıştır. Bu arayüz KDY'nin etkin bir şekilde kullanımının yanı sıra, KDY'yi öğrenmek isteyenler için de oldukça öğretici bir araç olarak kullanılabilir.

KDY standart blok diyagramının fiziksel uygulamalarda kullanımı, geri beslemeye türev elamanı ekleyebileceği için, çeşitli sorunlara neden olabilmektedir. Bu yüzden, fiziksel uygulamalarda kullanılmak üzere KDY standart blok diyagramına eş bir blok diyagramı önerilmiştir ancak bu blok diyagramı kullanıldığında tasarlanan bazı KDY kontrolcülerini için sistem iç kararsız olmaktadır. Bu tez kapsamında, böyle bir durumda sistemin iç kararsız olmasını engelleyecek KDY-P olarak adlandırılmış bir yöntem önerilmiştir.

Bir kontrol sistem tasarım yönteminin, sadece simülasyonlarda değil fiziksel uygulamalarda da başarılı sonuçlar verdiğini göstermek oldukça önemlidir. Bu tez kapsamında, KDY ile BLDC motor (fırçasız dc motor) kontrolü yapılmış ve KDY'nin hem simülasyonlarda hem de fiziksel uygulamalarda başarılı sonuçlar veren bir yöntem olduğu gösterilmiştir.

# THE COEFFICIENT DIAGRAM METHOD AND ITS APPLICATIONS

## SUMMARY

Linear algebraic approach lies between the classical and the modern control approaches. It is the third type of control system design technique. Since polynomials are used for system representation in the linear algebraic approach it is also called as polynomial approach. In this representation, numerator and denominator of the transfer function of the plant are considered as independent polynomials.

Linear algebraic control methods are equivalent to observable and controllable state space canonic form which came out in 1980s. The most important property of these methods is to merge advantages of both classical and modern control theories. Among these polynomial methods, Coefficient Diagram Method (CDM) proposed by Shunji Manabe is one of the most used methods and gives best results. CDM is a control system design method that is obtained by combining advantages of classical and modern control theories by benefiting from past experiences and ideas. CDM is a rather effective control design method and its design procedure is easier compared to most of the other control techniques.

The basic philosophy of CDM has been known in industry and control community for more than 40 years and there are many successful applications of the method. Additionally, the method has been adapted to MIMO systems, digital systems and nonlinear systems recently.

Actually, control system design of all linear time invariant systems (LTI) is carried out by selecting proper characteristic polynomial and numerator polynomial which produce the desired relation between input and output. If these polynomials are selected appropriately, controller can be reduced to simple mathematics. It is not too difficult of the selection of the characteristic equation for the design based on only stability and time domain specification; however, when robustness, the third parameter, is included the situation becomes complicated. CDM is a control design method that is developed to solve this type problem.

Good control is achieved by setting up a good balance (compromise) between objectives and controlled system response. While the philosophy of classical control is closer to “what can be done”, the philosophy of modern control is closer to “what should be done”. Because compromise is important in control system design,

mechanisms which will be used for better compromise during design should be established. Humankind has a high compromising capability in problems explained graphically. Graphics can be a key to achieve the compromise appropriately. Coefficient Diagram (CD) which explains problem graphically is used for a better compromise in CDM.

CD shows stability, response speed and robustness property of control system in one diagram which therefore provides the control system designer a full awareness. CD makes the compromise between three components of control system design easier and this is one of the main sources of power of CDM.

While the transfer function representation, which is easy to understand, is used for system representation in classical control, state space representation, which is more complicated in comparison with transfer functions, is used in modern control. On the other hand, transfer function representation can be inaccurate at pole-zero cancellation case because of its uncontrollable and unobservable structure but there is no such situation in state space representation.

Outward approach is used in classical control. According to this strategy, firstly controller structure is determined as parametrically then these parameters adjusted to satisfy the design requirements. Selection of controller structure at the beginning and characteristic polynomials are being limited are the problems in this approach. If the controller structure is not selected appropriately, convenient characteristic polynomial and thus desired specification cannot be satisfied. Even if the design is completed, there is always a hesitation about the optimality of the controller.

Inward approach is used in classical control. According to this strategy, control system is designed in order to satisfy the desired closed loop response. Controller parameters are obtained by solving Riccati like equations which are difficult and time consuming to solve. Although the closed loop response is guaranteed in inward approach, robustness and simplicity of the controller is not guaranteed.

While classical control has tools which provide intuitive design like bode, nyquist and root locus, there are no such tools in modern control.

Polynomial representation which is easy to be understood like transfer function is used in CDM. Polynomial representation is also accurate against pole-zero cancellation. The relation between characteristic polynomial and controller is described by Diophantine equation which is easy to solve, and CD. The relation is expressed mathematically and graphically in a very efficient way and that allows simultaneous design of controller and characteristic polynomial.

At first, characteristic polynomial and controller are determined partly and remaining parameters are determined during the design. This approach is called simultaneous design approach. Simple and robust controllers which achieve desired specification

are easily designed through this feature provided by CDM. In addition to this, CD, graphical tool of CDM, provides intuitive design like bode and nyquist in classical control. By using CDM, design specifications are obtained with a good compromise between stability, response and robustness.

CDM is an efficient controller design method but computer aid is needed for an efficient usage. Some studies have been done to meet this need in 2000s. Despite of these studies, Manabe expresses to strong need of a CDM CAD tool. There has not been announced a tool meets these needs and provide detailed research since that time. A user-friendly and interactive GUI named 'CDM Matlab Tool' was designed in this thesis scope. This tool was designed for fast, accurate and efficient usage of CDM. In addition to finding CDM controllers, it provides user capabilities doing more detailed analysis. Tool can be used for getting an answer to questions appears in design stage. The GUI is equipped with lots of notifications and warnings in order to provide user an easier usage. This tool can be used for not only efficient usage of CDM but, also as an educational tool.

Standard block diagram of CDM has some drawbacks in physical applications due to the derivative component on the feedback line. To solve this problem, a new block diagram was proposed in the literature. Unfortunately, when this block diagram is used, closed-loop system can be unstable for some applications. In the scope of this thesis, a new approach named CDM-P to solve this problem is proposed.

It is important for a method in control system design that it is successful not only simulations but also in practical applications. In the scope of this thesis, BLDC motor (brushless DC motor) was controlled with CDM controllers. It is shown that CDM is a successful control system design method for both simulations and practical applications.



## 1. GİRİŞ

Klasik kontrol ve modern kontrol teorileri kontrol sistem tasarımında sıklıkla kullanılan yöntemlerdir ancak bunların dışında bir üçüncü kontrol sistem tasarım yöntemi de cebirsel yaklaşımdır (Manabe, 1994a). Cebirsel yaklaşım, klasik kontrol ile modern kontrol arasındadır. Cebirsel yaklaşımda polinomsal gösterim kullandığı için sıklıkla polinomsal yaklaşım olarak da isimlendirilir. (Manabe, 2009a). Bu gösterimde transfer fonksiyonunun payı ve paydası birbirinden bağımsız olarak düşünülür.

Lineer cebirsel kontrol tasarım yöntemleri olarak isimlendirilen ve polinomsal gösterimi kullanan bu yöntemler, 1980'lerde ortaya çıkan gözlenebilir ve kontrol edilebilir durum uzayı kanonik formuna denktir (Manabe, 2001a). En önemli özellikleri, klasik ve modern kontrol teorilerinin avantajlarını birleştirmeleridir. Bu yöntemler arasında en çok kullanılanlardan ve en iyi sonuç verenlerden biri Shunji Manabe tarafından ortaya atılmış Katsayı Diyagram Yöntemi (KDY)'dir. KDY, geçmiş fikir ve tecrübelerden yararlanılarak klasik ve modern kontrol teorilerinin avantajlarının uygun bir şekilde bir araya getirilmesi sonucunda elde edilmiş bir kontrol sistem tasarım yöntemidir. KDY oldukça etkili bir yöntemdir, tasarım prosedürü çoğu yöntemden daha kolaydır ve tasarım için çok fazla tecrübe gerekmez (Hamamcı ve diğ, 2002).

KDY'nin temel felsefesi 40 yıldan fazla süredir endüstride ve kontrol camiasında bilinmektedir. Birçok başarılı uygulamaları vardır (Chestnut ve Mayer, 1951; Tanaka ve Ashikaga, 1992; Manabe, 1994) (Manabe, 2002a). Ayrıca yöntem Çok-Giriş Çok-Çıkışlı (ÇGÇÇ) sistemlere (Hamamcı ve Köksal, 2003; Manabe, 2002b; Manabe,

2004; Manabe, 2001b), dijital sistemlere (Öcal ve diğ, 2009), doğrusal olmayan sistemlere (Hamamcı ve diğ, 2002; İmal, 2009) de uyarlanmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Aslında tüm lineer zamanla değişmeyen sistemlerin kontrol sistem tasarımı, istenilen giriş – çıkış ilişkisini sağlayacak uygun karakteristik polinom ve pay polinomunun seçiminden ibarettir. Bu polinomlar uygun bir şekilde seçildiğinde kontrol sistem tasarımı problemi basit matematiğe indirgenmiş olur. Tasarımda sadece kararlılık ve zaman tanım bölgesi cevabı kriterleri göz önünde bulundurulursa uygun karakteristik denklemin seçimi çok zor olmayacaktır ancak üçüncü parametre olan dayanıklılık işin içine girdiğinde, bu seçim oldukça zorlaşmaktadır. KDY bu problemi çözmeye yönelik olarak geliştirilmiş bir kontrol tasarım yöntemidir (Manabe ve Kim, 2000).

İyi kontrol, kontrolcüden beklenenle kontrol edilen arasındaki uzlaşmanın sonucunda elde edilir. Başka bir deyişle iyi kontrol; ne yapılmalıyla, ne yapılabilir arasındaki uzlaşmadır. İyi kontrol, iyi bir uzlaşma sonucunda elde edilebilir. Şu anki kontrol tasarım yöntemleri bu spektrumda bir yerlerdedirler. Klasik kontrol, bu uzlaşmanın ne yapılabilir tarafına daha yakınken, modern kontrol bu uzlaşmanın ne yapılmalı tarafına daha yakındır (Manabe, 2009a). Uzlaşma, kontrol sistem tasarımında önemli olduğu için tasarım aşamasına uzlaşmayı kolaylaştıracak mekanizmalar yerleştirilmesi gerekmiştir. Bir problemin grafiksel olarak açıklanması, insanoğlunun uzlaşma kabiliyetini oldukça artırır. Grafiksel yöntem uzlaşma için bir anahtardır (Manabe, 2009a). KDY'deki Katsayı Diyagramı (KD) iyi uzlaşmanın alt yapısını hazırlamaktadır.

KD, kontrol sistem tasarımının üç ana unsuru olan kararlılık, cevap hızı ve dayanıklılık özelliklerini tek bir diyagram üzerinde gösterir ve bu da tasarımcının kontrol sistemine tam olarak hâkim olmasını sağlar. (Manabe, 2002). KD, kontrol sistem tasarımının üç ana unsuru arasında uzlaşma sağlamayı oldukça

kolaylaştırmakta ve bu da KDY'nin kontrol sistem tasarımıdaki gücünün temel kaynağını oluşturmaktadır (Manabe,1998).

Klasik kontrolde, anlaşılması kolay olan transfer fonksiyon gösterimini kullanılırken; modern kontrolde, anlaşılması nispeten daha zor ve işlem yükü daha ağır olan durum uzayı gösterimi kullanılır. Transfer fonksiyonunun kullanımı kutup-sıfır götürmesi gibi durumlarda, transfer fonksiyonunun kontrol edilemez ve gözlenemez yapısından dolayı, yanıltıcı sonuçlar verebilir ancak durum uzayı gösterimi kullanımında böyle bir durum söz konusu değildir. Klasik kontrol, dışsal yaklaşım kullanır. Dışsal yaklaşımda önce temel kontrolcü yapısı parametrik olarak seçilir ve daha sonra bu parametreler istenen kapalı çevrim yanıtı sağlanacak şekilde ayarlanmaya çalışılır. Kontrolcü yapısının başlangıçta seçilmesi ve sonucunda da elde edilebilecek karakteristik denklemin sınırlı olması, dışsal yaklaşımdaki problemdir. Dolayısıyla, kontrolcü yapısı uygun seçilmemişse, beklenen kapalı çevrim transfer fonksiyonu elde edilemeyecektir. Tasarım tamamlansa bile, kontrolcünün optimal olup olmadığı konusunda daima bir şüphe olacaktır. Modern kontrol içsel yaklaşım kullanır. Önce istenilen kapalı çevrim yanıtı sağlanacak şekilde kontrol sistemi belirlenir. Kontrolcü ise işlem yükü ağır olan Riccati denklemleri gibi denklemlerin çözümü ile elde edilir. İçsel yaklaşımda, kapalı çevrim karakteristik sistem yanıtı garantilenmesine rağmen, tasarlanan kontrolcünün basit ve dayanıklı olacağı garantilenmemektedir. Ayrıca, klasik kontrol bode, nyquist ve kök eğrisi gibi sezgisel tasarıma olanak sağlayan görsel araçlar içerirken; modern kontrolde bu tür görsel araçlar bulunmamaktadır (Manabe, 2009a).

KDY'de anlaşılması transfer fonksiyonu gibi kolay olan polinomsal gösterim kullanılır ancak kutup sıfır götürmesi durumlarında yanıltıcı sonuçlar vermez. Karakteristik polinom ile kontrolcü arasındaki ilişki, lineer ve çözümü kolay diophantine denklem ile ve katsayı diyagramı ile belirlenir. İlişki matematiksel ve grafiksel olarak etkili bir şekilde açıklanır ve bu da kontrolcünün ve karakteristik

denklemin eşzamanlı tasarımına olanak tanır. KDY’de ilk etapta kapalı çevrim transfer fonksiyonu ve kontrolcü kısmen belirlenir ve geriye kalan parametreler tasarım esnasında belirlenir. Bu yaklaşıma eşzamanlı tasarım özelliği denir (Manabe,1998). KDY’nin bu özelliği ile istenen kapalı çevrim yanıtını sağlayacak basit ve dayanıklı kontrolcüler kolayca tasarlanabilir. Yöntemin grafiksel aracı olan KD, klasik kontroldeki bode ve nyquist diyagramı gibi sezgisel tasarıma da olanak sağlar (Manabe, 2009a). Manabe’nin de belirttiği gibi KDY’nin kullanımı sonucunda kontrol sistemlerinde arzu edilen performans ölçütleri; kararlılık, cevap hızı ve dayanıklılık arasında iyi bir uzlaşma kurularak elde edilmekte ve bunu yaparken de bu kriterleri sağlayabilecek en düşük mertebeden kontrolcü seçilmektedir (Hamamcı, 2002).

KDY, etkili bir kontrolcü tasarım yöntemidir ancak etkin bir şekilde kullanımı için bilgisayar programına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ihtiyacı karşılamak üzere 2000’li yıllarda çeşitli çalışmalar yapılmıştır (Hara ve Hori, 2000; Pang ve Manabe, 2000) Bu çalışmalara rağmen, Manabe (2002a) iyi bir KDY programına şiddetle ihtiyaç olduğunu belirtmiştir ve bu çalışmamaların geliştirilmesi gerektiğini ifade etmiştir. Bu tarihten sonra bu konuda çeşitli çalışmalar daha yapılmıştır. Bunlardan biri Manabe’nin kendi sitesinde yayınladığı Matlab tabanlı CDMCAD yazılımı (CDM CAD, t.y.), diğeri ise Köksal ve Hamamcı (2004) ’nın tasarladığı Matlab tabanlı bir arayüzdür. CDMCAD, bir arayüz içermemektedir. Bir klasör içinde birçok m-file bulunmaktadır ve ihtiyaca göre çeşitli m-file’ların kullanımı gerekmektedir. Bir arayüz olmadığı için fonksiyonların kullanımını ve hangisinin nerede kullanılacağını öğrenmek ekstra emek harcamayı gerektirmektedir. Hamamcının tasarladığı arayüz ise etkileşimli bir arayüz değildir. KDY kontrolcülerini bulmaktadır ancak kullanıcıya derinlemesine analiz yapma imkânı tanımamaktadır. Bu tez kapsamında ‘CDM Matlab Tool’ şeklinde isimlendirilmiş, kullanıcı dostu arayüz geliştirilmiştir. Bu arayüz, KDY’nin etkin ve hızlı bir şekilde kullanımı için tasarlanmıştır ve KDY

kontrolcülerini bulmasının yanı sıra kullanıcının çok çeşitli analizler yapmasına olanak tanır. Tasarım aşamasında akla gelebilecek sorulara cevap verilmeye çalışılmıştır. Arayüz, kullanım esnasında kullanıcıya yol gösterecek birçok bildirim ve uyarılarla donatılmıştır. Bu arayüz KDY'nin etkin bir şekilde kullanımının yanı sıra, KDY'yi öğrenmek isteyenler için de oldukça öğretici bir araç olarak kullanılabilir.

KDY standart blok diyagramının fiziksel uygulamalarda kullanımı, geri beslemeye türev elamanı ekleyebileceği için, çeşitli sorunlara neden olabilmektedir. Bu yüzden, fiziksel uygulamalarda kullanılmak üzere KDY standart blok diyagramına eş bir blok diyagramı önerilmiştir (Avşar ve Hamamcı, 2011) ancak bu blok diyagramı kullanıldığında, tasarlanan bazı KDY kontrolcülerini için sistem iç kararsız olmaktadır. Böyle bir durumda sistemin iç kararsız olmasını engelleyecek KDY-P olarak adlandırılmış bir yöntem önerilmiştir.

Bir kontrol sistem tasarımı yönteminin, sadece simülasyonlarda değil fiziksel uygulamalarda da başarılı sonuçlar verdiğini göstermek oldukça önemlidir. Bu tez kapsamında, KDY ile BLDC motor (firçasız dc motor) kontrolü yapılmış ve KDY'nin hem simülasyonlarda hem de fiziksel uygulamalarda başarılı sonuçlar veren bir yöntem olduğu gösterilmiştir.



## 2. KATSAYI DİYAGRAM YÖNTEMİ

Lineer cebirsel kontrol yaklaşım yöntemleri olarak isimlendirilen ve polinomsal gösterimi kullanan kontrol sistem tasarım yöntemleri, 1980'lerde ortaya çıkan gözlenebilir ve kontrol edilebilir durum uzayı kanonik formuna denktir (Manabe, 2001a). En önemli özellikleri, klasik ve modern kontrol teorilerinin avantajlarını birleştirmesidir. Bu yöntemler arasında en çok kullanılanlardan ve en iyi sonuç verenlerden biri Shunji Manabe tarafından ortaya atılmış Katsayı Diyagram Yöntemi (KDY)'dir. KDY, geçmiş fikir ve tecrübelerden yararlanılarak klasik ve modern kontrol teorilerinin avantajlarının uygun bir şekilde bir araya getirilmesi sonucunda elde edilmiş bir kontrol sistem tasarım yöntemidir. KDY oldukça etkili bir yöntemdir, tasarım prosedürü çoğu yönteme nazaran daha kolaydır ve tasarım için çok fazla tecrübe gerekmez (Hamamci ve diğ, 2002).

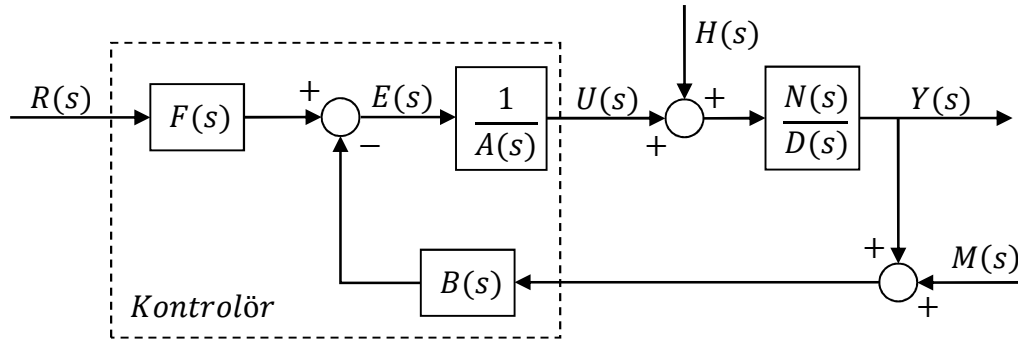
KDY'de anlaşılması transfer fonksiyonu gibi kolay olan polinomsal gösterim kullanılır. Karakteristik polinom ile kontrolcü arasındaki ilişki, lineer ve çözümü kolay diophantine denklem ile ve katsayı diyagramı ile belirlenir. İlişki matematiksel ve grafiksel olarak etkili bir şekilde açıklanır ve bu da kontrolcünün ve karakteristik denklemin eşzamanlı tasarımına olanak tanır. KDY'de ilk etapta kapalı çevrim transfer fonksiyonu ve kontrolcü kısmen belirlenir, geriye kalan parametreler ise tasarım esnasında belirlenir. Bu yaklaşıma eşzamanlı tasarım özelliği denir (Manabe,1998). KDY'nin bu özelliği ile istenen kapalı çevrim yanıtını sağlayacak basit ve dayanıklı kontrolcüler kolayca tasarlanabilir. Yöntemin grafiksel aracı olan Katsayı Diyagramı (KD), kontrol sistem tasarımının üç ana unsuru olan kararlılık, cevap şekli ve dayanıklılık özelliklerini tek bir diyagram üzerinde gösterir ve bu da tasarımcının kontrol sistemine tam olarak hakim olmasını sağlar. (Manabe, 2002).

KD, kontrol sistem tasarımının üç ana unsuru arasında uzlaşma sağlamayı oldukça kolaylaştırmakta ve bu da KDY'nin kontrol tasarımındaki gücünün temel kaynağını oluşturmaktadır. (Manabe,1998). KD, klasik kontroldeki bode ve nyquist diyagramını gibi sezgisel tasarıma da olanak sağlar (Manabe, 2009a).

Manabe'nin de belirttiği gibi KDY'nin kullanımı sonucunda kontrol sistemlerinde arzu edilen performans ölçütleri olan kararlılık, cevap hızı ve dayanıklılık arasında iyi bir uzlaşma kurulmakta ve bunu yaparken de bu kriterleri sağlayabilecek en düşük mertebeden kontrolcü seçilmektedir. (Hamamcı, 2002).

## 2.1 Kontrol Sistem Yapısı

TGTÇ (Tek-Giriş Tek-Çıkış) sistemler için KDY standart blok diyagramı Şekil 2.1'deki gibidir. Şekil'de de görüldüğü gibi KDY'de 2 serbestlik dereceli kontrol sistem yapısı kullanılmaktadır.



Şekil 2.1 : KDY standart blok diyagramı.

Blok diyagramında  $R(s)$  kontrol sisteminin referans işaretini,  $Y(s)$  çıkışını,  $U(s)$  kontrol işaretini,  $E(s)$  hata işaretini,  $H(s)$  bozucuyu ve  $M(s)$  de ölçme gürültüsünü ifade etmektedir.  $N(s)$  kontrol edilecek sistemin pay polinomunu,  $D(s)$  ise payda polinomunu ifade eder. Tasarım sürecinde, bu iki polinom birbirinden bağımsız düşünülerek işlemler yapılır.  $A(s)$ ,  $B(s)$  ve  $F(s)$  kontrolcü polinomlarıdır.  $N(s)$  polinomunun derecesi  $m$ ,  $D(s)$  polinomunun derecesi  $r$ ,  $A(s)$  polinomunun derecesi  $p$ ,  $B(s)$  polinomunun derecesi  $q$  olmak üzere, bu polinomlar şu şekilde tanımlanır:

$$N(s) = \sum_{i=0}^m n_i s^i, \quad D(s) = \sum_{i=0}^r d_i s^i \quad (2.1)$$

$$A(s) = \sum_{i=0}^p l_i s^i, \quad B(s) = \sum_{i=0}^q k_i s^i \quad (2.2)$$

$F(s)$  ise bir ön filtredir ve kalıcı hal hatasını önlemeyi amaçlar ve

$$F(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{P(s)}{N(s)} \quad (2.3)$$

şeklinde ifade edilir. Kapalı çevrim sistemin çıkış ifadesi

$$Y(s) = \frac{N(s)F(s)}{P(s)} R(s) + \frac{A(s)N(s)}{P(s)} H(s) - \frac{B(s)N(s)}{P(s)} M(s) \quad (2.4)$$

şeklinde elde edilir. Burada  $P(s)$  karakteristik polinomu belirtir ve

$$P(s) = A(s)D(s) + B(s)N(s) = a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0 = \sum_{i=0}^n a_i s^i \quad (2.5)$$

şeklinde ifade edilir. Gerçekleme aşamasında standart blok diyagramın kullanılması durumunda,  $B(s)$ 'in yüksek geçiren filtre özelliğinden dolayı ölçme gürültüsünü daha da kuvvetlendirmesi söz konusu olabilir. Bu durumu önlemek amacıyla, gerçekleme aşamasında KDY standart blok diyagramının eşdeğeri Şekil 2.2'deki yapının kullanılması önerilmiştir (Avşar ve Hamamcı, 2011).

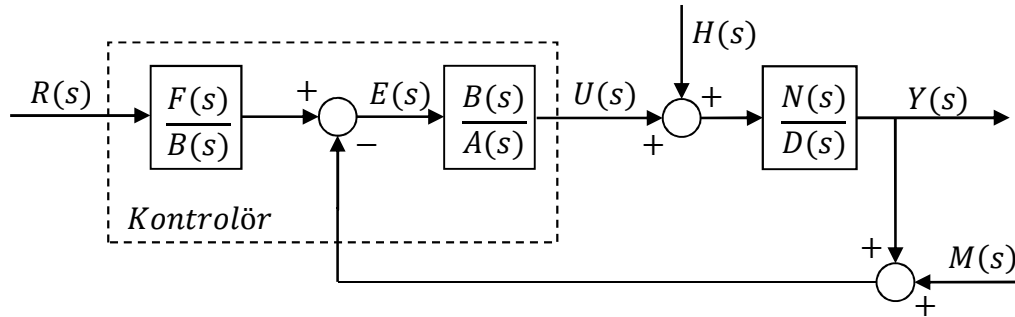
Kontrol işareti  $U(s)$  ve hata  $E(s)$  aşağıdaki gibi ifade edilebilirler:

$$U(s) = \frac{F(s)D(s)}{P(s)} R(s) - \frac{A(s)B(s)N(s)}{P(s)} H(s) - \frac{B(s)D(s)}{P(s)} M(s) \quad (2.6)$$

$$E(s) = \frac{A(s)F(s)D(s)}{P(s)} R(s) + \frac{A(s)B(s)N(s)}{P(s)} H(s) - \frac{A(s)B(s)D(s)}{P(s)} M(s) \quad (2.7)$$

## 2.2 Tasarım Parametreleri, Karakteristik Denklem ve Kararlılık

Katsayı Diyagram Yönteminde kullanılan çeşitli tasarım parametreleri vardır. Bunlar eşdeğer zaman sabiti ( $\tau$ ), kararlılık indeksi ( $\gamma_i$ ) ve kararlılık sınır indeksi ( $\gamma_i^*$ )'dir. Bu parametrelerden  $\tau$  ve  $\gamma_i$  karakteristik denklemi belirleyip, sistemin kararlılığını, hızını ve geçici hal yanıtının nasıl olacağını belirlerken,  $\gamma_i^*$  ve  $\gamma_i$ 'in bağıl durumları, sistemin kararlılığının derecesi ile ilgili bir ölçüttür.



Şekil 2.2 : Uygulamaya yönelik olarak önerilmiş eşdeğer blok diyagramı.

Karakteristik polinom

$$P(s) = a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0 = \sum_{i=0}^n a_i s^i \quad (2.8)$$

olmak üzere, bu parametrelerin birbirleri ve karakteristik denklemin katsayıları ile olan ilişkileri aşağıdaki gibidir:

$$\tau = \frac{a_1}{a_0} \quad (2.9)$$

$$\gamma_i = \frac{a_i^2}{a_{i-1} a_{i+1}}, \quad i = 1 \sim (n-1), \quad \gamma_0 = \gamma_n = \infty \quad (2.10)$$

$$\gamma_i^* = \frac{1}{\gamma_{i-1}} + \frac{1}{\gamma_{i+1}} \quad (2.11)$$

(2.9) ve (2.10) kullanılarak karakteristik polinom katsayıları  $\tau$  ve  $\gamma_i$  cinsinden aşağıdaki şekilde elde edilir:

$$a_i = a_0 \tau^i / (\gamma_{i-1} \gamma_{i-2}^2 \dots \gamma_2^2 \gamma_1^{i-1}) \quad (2.12)$$

(2.12) formülize edilirse;

$$P(s) = a_0 \left[ \left\{ \sum_{i=2}^n \left( \prod_{j=1}^{i-1} \frac{1}{\gamma_{i-j}^j} \right) (\tau s)^i \right\} + \tau s + 1 \right] \quad (2.13)$$

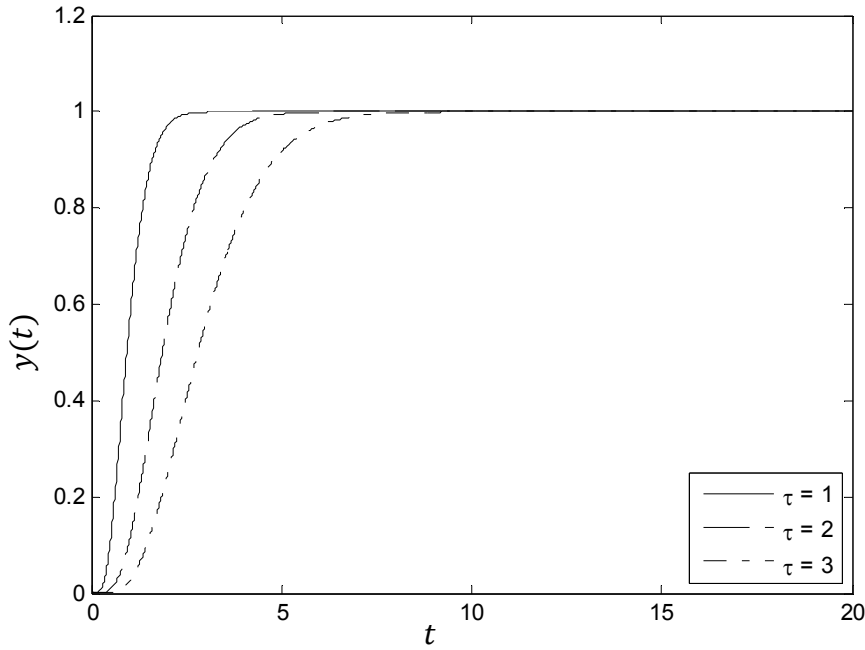
bulunur. Bir sonraki bölümde  $\tau$  ve  $\gamma_i$ 'nin sistem cevabına olan etkisi incelenecek,  $\gamma_i^*$ 'in incelenmesi Katsayı Diyagramı bölümüne bırakılacaktır.

### 2.2.1 $\tau$ ve $\gamma_i$ 'nin sistem cevabına etkisi

KDY'de, sonraki bölümlerde belirtileceği gibi, Standart Manabe Formu kullanılır. Bu formu kullanmanın çeşitli avantajları vardır. Bu konunun anlatımı bir sonraki bölüme bırakılmıştır. Standart Manabe Formu'na göre  $\gamma_i$ 'ler,  $\gamma_1 = 2.5$ ,  $\gamma_2 = \gamma_3 = \dots = \gamma_n = 2$  şeklinde seçilir.

Zaman sabiti, sistem cevabının hızını belirlediği için önemli bir kavramdır. Zaman sabitinin tanımı birinci derece sistemler için açık olmasına rağmen, daha üst mertebeden sistemler için kesin bir ifadesi yoktur. Dolayısıyla daha yüksek dereceden sistemler için istenilen cevap hızını yakalamak oldukça zordur. Genelleştirilmiş zaman sabiti, bu probleme bir çözümdür (Kim ve diğ., 2002). Sistemin cevap hızı ve  $\tau$  arasında lineer bir ilişki vardır. Örneğin, 8. dereceden bir kontrol sistemi için  $a_0 = 1$  ve kararlılık indeksleri de Standart Manabe Formu'nda seçilsin.  $\tau = 1$ ,  $\tau = 2$  ve  $\tau = 3$  için basamak yanıtı Şekil 2.3'teki gibidir. Şekilde de görüldüğü gibi  $\gamma_i$ 'ler değişmediği için sistemin geçici hal yanıtının şekli aynı kalmış ancak  $\tau$ 'nun değişimine bağlı olarak sistemin cevabı hızlanmış veya yavaşlamıştır. Kararlılık indeksleri butterworth formunda seçildiğinde, basamak yanıtı Şekil 2.4'teki gibi olmaktadır.  $\gamma_i$ 'ler butterworth formunda seçildiği zaman sistemin geçici hal yanıtının şekli değişmemiş ancak  $\tau$ 'nun değişimine bağlı olarak sistemin cevabı hızlanmış veya yavaşlamıştır. İki sistemin analizi Çizelge 2.1'de yapılmıştır. Çizelge

2.1 incelenecek olursa, sabit  $\gamma_i$  değerleri için yüzde aşımın sabit kaldığı; yerleşme zamanı( $T_s$ ) ve  $\tau$  arasında lineer bir ilişki olduğu görülür. Ayrıca  $\gamma_i$ 'nin değişimi geçici hal yanıtını değiştirdiği için sistemin yerleşme zamanını da bir miktar etkilediği görülür. Dolayısıyla  $\tau$  ile  $T_s$  arasında, kullanılan  $\gamma_i$  değerleri göz önünde bulundurularak bir ilişki kurulabilir. Kararlılık indeksi olarak Standart Manabe Formu kullanıldığında  $\tau$  ile  $T_s$  arasındaki ilişki  $T_s = 2.5 \sim 3 \tau$  şeklindedir<sup>1</sup> (Manabe, 2009b; Hamamcı, 2002).



Şekil 2.3 : KDY formunda  $\tau$ 'nun değişen değerleri için sistem cevabının değişimi.

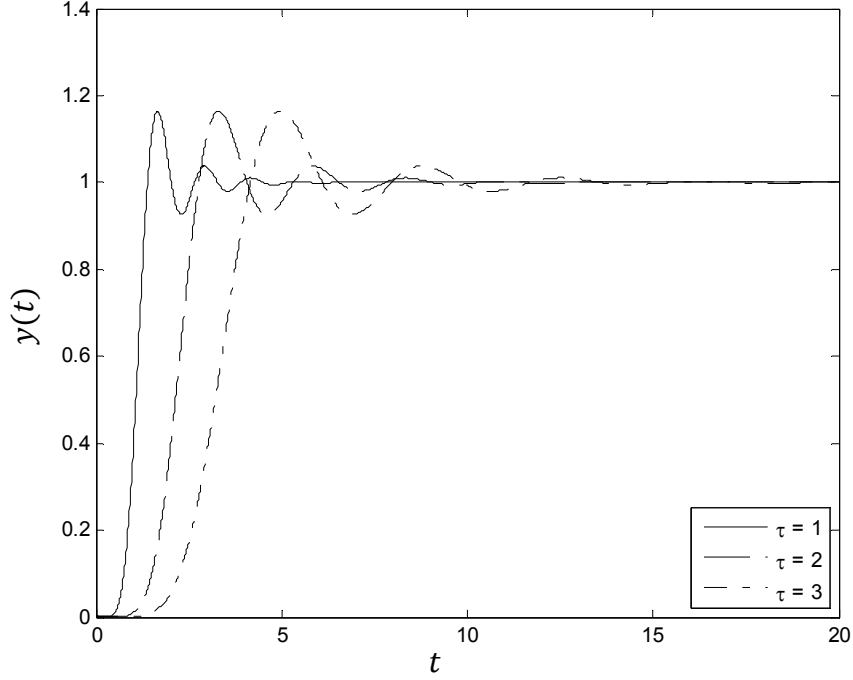
Çizelge 2.1 :  $\tau$  ve  $\gamma_i$ 'nin değişiminin yanıtta etkisi.

		$\tau = 1$	$\tau = 2$	$\tau = 3$
Butterworth	% Aşım	14	14	14
	Yerleşme Zamanı	3.66	7.32	10.98
KDY	% Aşım	-	-	-
	Yerleşme Zamanı	2.11	4.22	6.33

<sup>1</sup> Literatürde  $\tau$  ile  $T_s$  arasındaki ilişki  $T_s = 2.5 \sim 3 \tau$  olarak geçse de, tez boyunca yapılan çalışmalarda  $T_s = 2 \sim 3 \tau$  olarak gözlenmiştir.

### 2.2.2 Kararlılık indeksinin seçimi

Graham, 1953 yılında, karakteristik denklemin katsayıları ile geçici hal yanıtı arasında bir ilişki kurabilmek için yoğun çalışmalar yapmış ve sonuçta da ITAE



Şekil 2.4 : Butterworth formunda farklı  $\tau$  değerleri için sistem cevabı.

of Time multiplied by Absolute value of Error) standart formunu önermiştir. Bu formun dezavantajlarından birincisi, farklı dereceden sistemler için farklı karakteristik polinomlar önermesidir. Bu durum, tasarım aşamasında karakteristik denklemin derecesinin değişmesi durumunda, bir kurala göre yeni karakteristik denklemin elde edilememesi sonucunu ortaya çıkarmaktadır. Bu ise istenen bir durum değildir. Bu formun dezavantajlarından ikincisi ise bir miktar aşım yapmasıdır. 1960 yılında Kessler, Kessler kanonik standart formunu önermiştir. Bu formda tüm kararlılık indeksleri 2'dir. Bu forma göre elde edilen sistemler, ITAE standart formundan elde edilen sistemlerden daha dayanıklıdır (Manabe,1998). Bu formun ITAE standart formuna olan bir diğer üstünlüğü de, bir metoda bağlı olarak yeni karakteristik denklemler elde edilebilmesidir. Kessler formundan elde edilen sistemlerde %8 civarında aşım olmaktadır. Halbuki çok küçük bir değişiklik,  $\gamma_1$ 'in

2 yerine 2.5 seçilmesi durumunda, sistem aşısız hale gelebilmektedir. Manabe bu değişikliği yapmış ve KDY'nin standart formu olarak belirlemiştir (Hamamcı, 2002). Bu yeni form, aşım yapmamaktadır ve Standart Manabe Formu olarak isimlendirilmektedir. Bu form kullanılarak yapılan tasarımlar, oldukça kararlı ve dayanıklı olmakla beraber istenilen cevap hızını da yakalayabilmektedir (Hamamcı ve diğ, 2001). 2. ve 3. dereceden sistemler,  $\gamma_1 = 2.5$  olarak seçildiğinde az da olsa aşım yapmaktadırlar. Bu aşımı engellemek için 2. dereceden sistemlerde  $\gamma_1 = 3$  ve 3. dereceden sistemlerde  $\gamma_1 = 2.7$  olarak seçilebilir. (Kaşka, 2008). Bu değişiklikler, KDY standart formunun hatırlanmasını zorlaştırmamak adına, KDY standart formunda yapılmamıştır.

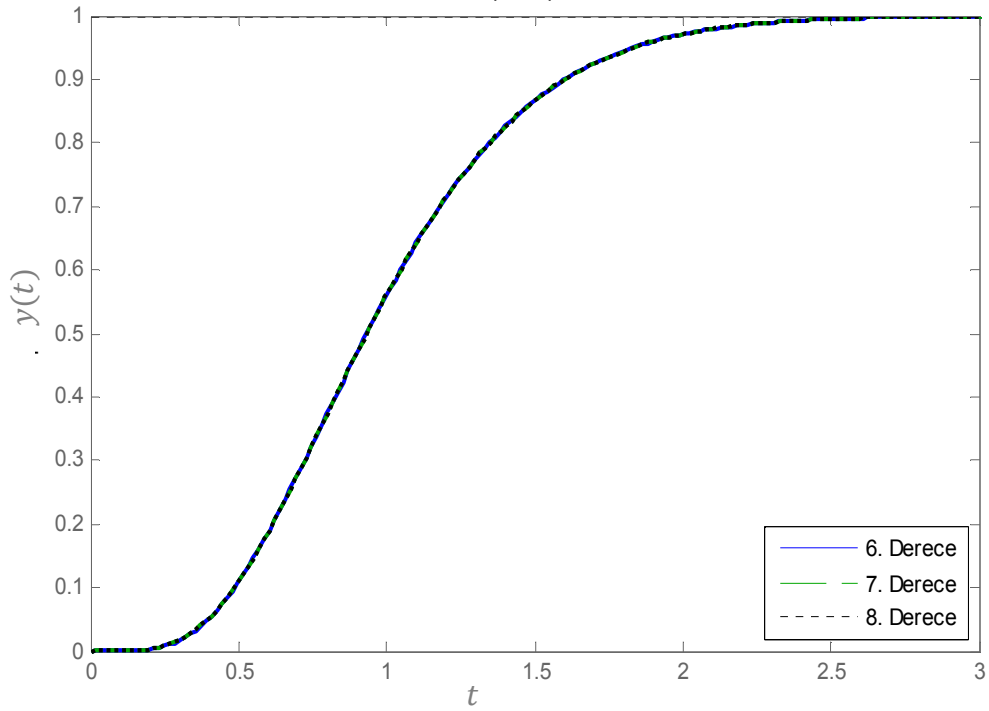
Diğer çoğu standart formda, karakteristik polinomun derecesi arttıkça sistemin cevap hızı ve geçici hal yanıtı değişmektedir ancak Standart Manabe Formunda sistemin cevabı hızı ve geçici hal yanıtı, sistem mertebesinin değişmesi ile neredeyse hiçbir değişiklik göstermez. Şekil 2.5'te,  $\tau = 2$  için 5., 6. ve 7. dereceden sistemlerin cevapları gösterilmiştir. Üç sistemin cevaplarının birbirlerine oldukça benzer, neredeyse aynı, olduğu görülmektedir.

Manabe'nin elde ettiği Standart Manabe Formu, deneysel olarak elde edilmiştir ancak Kim ve diğerleri (1998) tarafından elde edilen MISE (Modified Integral Square Error) Standart Formu ve Yang ve diğ. (2000) tarafından elde edilen Gaussian formlarının Standart Manabe Formu'na çok yakın olması, bu forma analitik olarak da erişilebileceğini göstermiştir. Standart Manabe Formu'nun veya bir diğer isimle KDY Standart Formu'nun, diğer iki forma üstünlüğü, kolay hatırlanabilmesidir. Bu formlar Çizelge 2.2'de görüldüğü gibi birbirlerine oldukça yakındır (Hamamcı, 2002).

Standart Manabe Formu'nun yanısıra, şimdiye kadar pek çok standart form önerilmiştir. Bunlardan bazıları Binomial, Butterworth, Bessel, ITAE ve Kessler

standart formlarıdır. Bu formlarda kararlılık indekslerinin aldığı değerler Çizelge 2.3'te gösterilmiştir. Standart Manebe biçiminin önemli özellikleri şu şekilde sıralanabilir (Manabe,2000):

1. Karakteristik polinomlar,  $\tau$ 'nun fonksiyonu şeklinde yazılır ve böylece istenen yerleşme süresini yakalamak oldukça kolaylaşır.
2. KDY standart formunda 1. tip sistemler için aşım mevcut değildir. Oysa Binomial ve Bessel formları hariç diğer standart formlarda aşım mutlaka olacaktır.



Şekil 2.5 : KDY formunda 6. 7. ve 8. dereceden sistemlerin basamak yanıtı.

Çizelge 2.2 : KDY – MISE – Gaussian standart formlarının karşılaştırılması.

	$n$	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\gamma_3$	$\gamma_4$	$\gamma_5$
<b>KDY</b>	4	2.5	2	2	-	-
	5	2.5	2	2	2	-
	6	2.5	2	2	2	2
<b>MISE</b>	4	2.491	2.012	1.987	-	-
	5	2.5	1.999	2.001	2.003	-
	6	2.502	2.002	2.001	1.992	1.973
<b>Gaussian</b>	4	2.451	2.038	2.368	-	-
	5	2.451	2.038	2.038	2.368	-
	6	2.451	2.038	2.038	2.038	2.368

3. KDY standart formu ile elde edilen sistemlerin geçici hal yanıtı ve yerleşme süresi sistemin derecesine göre, Şekil 2.5'teki gibi, neredeyse değişiklik göstermez ancak bu durum diğerleri için söz konusu değildir.
4. Kontrol işareti genliği ve yerleşme hızı göz önünde bulundurulduğunda diğer standart formlara göre iyi bir performans sergilemektedir.
5. KDY standart formunun akılda tutulması oldukça kolaydır. Bu konuda Bessel standart formunun performansı da oldukça iyidir.

**Çizelge 2.3 :** Şimdiye kadar önerilmiş çeşitli standart formlar.

	Kararlılık indeksleri					Kararlılık indeksleri			
	$\gamma_4$	$\gamma_3$	$\gamma_2$	$\gamma_1$		$\gamma_4$	$\gamma_3$	$\gamma_2$	$\gamma_1$
<b>Binomial</b>				4	<b>ITAE</b>				2
			3	3				1.424	2.641
		2.667	2.25	2.667			1.297	2.039	2.144
	2.5	2	2	2.5		1.568	1.624	1.779	2.102
<b>Butterworth</b>				2	<b>Kessler</b>				2
			2	2				2	2
		2	1.707	2			2	2	2
	2	1.618	1.618	2		2	2	2	2
<b>Bessel</b>				3	<b>KDY</b>				2.5
			2.4	2.5				2	2.5
		2.222	1.929	2.333			2	2	2.5
	2.143	1.75	1.778	2.25		2	2	2	2.5

### 2.2.3 Kararlılık

Routh-Hurwitz kararlılık kriteri, sistemin kararlı olup olmadığı hakkında kesin sonuçlar verir ancak gerçek bir tasarım esnasında göz önünde bulundurulması gereken ve tasarım için oldukça önemli bir parametre olan, sistemin kararlılık derecesi hakkında bir fikir vermez. Bunun yanında, özellikle yüksek mertebeden sistemler için, işlem yükü oldukça ağırdır. Lipatov 1978 yılında kararlılık ve kararsızlık için yeter koşulları ortaya koymuştur. Yeter koşullar verildiği için kararlılık ve kararsızlık arasında kalan bir bölge olacaktır ve o bölge için bir belirsizlik söz konusu olacaktır. Bu bir kusurdur ancak Lipatov'un koşullarının basit

olması, işlem yükünün ağır olmaması ve en önemlisi kararlılığın derecesi hakkında bilgi vermesi bu kusurdan ağır basmaktadır (Manabe,1999). Bu özelliklerinden dolayı KDY oluşturulurken Lipatov'un kararlılık ve kararsızlık için yeter koşulları, Routh-Hurwitz kriteri ile birlikte yönteme entegre edilmiş ve KDY'nin sistemin kararlılığını belirlemede kullanılan kısmını oluşturmuştur.

3. dereceden bir sistem için Routh-Hurwitz kararlılık kriteri şu şekildedir:

$$a_2 a_1 > a_3 a_0 \quad (2.14)$$

Bu kriter, KDY tasarım parametresi  $\gamma_i$  ler cinsinden şu şekilde ifade edilebilir:

$$\gamma_2 \gamma_1 > 1 \quad (2.15)$$

4. dereceden bir sistem için Routh-Hurwitz kararlılık kriterleri şu şekildedir:

$$a_2 > (a_1 / a_3) a_4 + (a_3 / a_1) a_0 \quad (2.16)$$

Bu kriter, KDY tasarım parametresi  $\gamma_i$  ve  $\gamma_i^*$ 'ler cinsinden şu şekilde ifade edilebilir:

$$\gamma_2 > \gamma_2^* \quad (2.17)$$

Lipatov, 5. veya daha yüksek dereceden sistemler için kararlılık ve kararsızlık yeter koşulu çeşitli şekillerde vermiştir. Bu koşullardan KDY'nin yapısına en uygun olanları şunlardır:

Bir sistem kararlı olabilmesi için 4. dereceden tüm kısmi denklemlerin 1.12 payla kararlı olması yeterlidir ve bir sistemin kararsız olabilmesi için herhangi bir 3. dereceden kısmi denklemin kararsız olması yeterlidir.

Bu koşullar göz önüne alınarak kararlılık için yeter koşullar düzenlenirse:

$$a_i > 1.12 [(a_{i-1} / a_{i+1}) a_{i+2} + (a_{i+1} / a_{i-1}) a_{i-2}] \quad (2.18)$$

$$\gamma_i > 1.1243\gamma_i^*, \text{ tüm } i=1\sim n-2 \text{ için} \quad (2.19)$$

olarak elde edilir. (2.18) ve (2.19)'un her ikisi de yeter koşul belirtmektedir ve sadece bir koşulun sağlanması kararlılık için yeterli olacaktır. KDY'de (2.19) yeter koşul olarak kullanılmaktadır. Bu durum göz önüne alındığında kararsızlık için yeter koşullar düzenlenirse:

$$a_{i+1}a_i \leq a_{i+2}a_{i-1} \quad (2.20)$$

$$\gamma_{i+1}\gamma_i \leq 1, \text{ herhangi bir } i=1\sim n-2 \text{ için} \quad (2.21)$$

olarak elde edilir (Manabe,1998).

Yukarıda belirtilen koşullar, Manabe tarafından KDY'nin yapısına entegre edilen koşullardır. Lipatov'un makalesinde kararlılık için bir diğer yeter koşul da

$$\sqrt{\gamma_i\gamma_{i+1}} > 1.4546 \quad (2.22)$$

olarak verilmiştir. Bu koşul ve yukarıdaki koşullar göz önüne alındığında, tüm  $\gamma_i$ 'lerin 1.5'ten büyük seçilmesi durumunda sistemin kararlı olacağı görülmektedir. Ayrıca tüm  $\gamma_i$ 'lerin 4'ten büyük seçilmesi durumunda da tüm köklerin reel negatif olacağı Lipatov tarafından ispatlanmıştır. O zaman  $\gamma_i$ 'lerin 1.5~4 aralığında seçimi, yerinde bir seçim olacaktır (Manabe,1998).

#### 2.2.4 Dayanıklılık

Dayanıklılık ve kararlılık birbirinden tamamen farklı kavramlardır. Kararlılık kapalı çevrim köklerinin nerede olduğu ile ilgili bir kavramken; dayanıklılık kapalı çevrim köklerinin, parametrik değişimler sonucunda ne kadar hızlı bir şekilde imajiner eksene hareket ettiği ile ilgili bir kavramdır. Kararlılık, karakteristik polinomu belirleyen  $\gamma_i$ 'lerle belirlenir ancak dayanıklılık açık çevrim transfer fonksiyonu belirlendikten sonra belirlenebilir. Başka bir deyişle aynı karakteristik polinoma

sahip, dolayısıyla aynı kararlılık özelliklerine sahip iki kontrol sistemi, farklı dayanıklılık sergileyebilirler. Hatta bazen biri dayanıklı iken diğeri oldukça dayanıksız olabilmektedir (Manabe,1998). Dayanıklılık için birçok ölçüt vardır. Bunlardan biri de karakteristik polinomun katsayıları olan  $a_i$ 'lerin yüzde değişimine karşılık, B(s) kontrolcü polinomunun katsayıları olan  $k_i$ 'lerin yüzde değişimidir. B(s) kontrolçüsünün derecesi  $q$  olmak üzere,  $k_1/a_1 \dots k_q/a_q$ 'nun hepsinin 1'e eşit veya 1'den daha küçük olması dayanıklılığın iyi olduğunun göstergesidir.

### 2.3 Katsayı Diyagramı

Katsayı diyagramı, üzerinde  $P(s)$  karakteristik polinomunun katsayıları olan  $a_i$ 'lerin, kararlılık indeksi  $\gamma_i$ 'lerin, kararlılık sınır indeksi  $\gamma_i^*$ 'ların, B(s) kontrolcü polinomunun katsayıları,  $k_i$ 'lerin gösterildiği; y eksenini logaritmik bir diyagramdır.  $a_i$ 'lerin gösterildiği eğriye katsayı eğrisi,  $k_i$ 'lerin gösterildiği eğriye kısmi katsayı eğrisi olarak isimlendirilmektedir. Bu diyagram kullanılarak kapalı çevrim sistemin cevap hızı, kararlılığı ve dayanıklılığı hakkında bilgiler oldukça hızlı ve etkin bir biçimde elde edilebilir. Ayrıca tek bir diyagram üzerinde bu üç özelliğin aynı anda görülebilmesi, tasarımcının tasarıma olan hâkimiyetini ve dolayısıyla, iyi bir tasarım için çok önemli olan uzlaşma kabiliyetini artırır. Katsayı diyagramını bir örnekle anlaşılması daha kolay bir hale getirilebilir. Kontrol edilecek sistemin transfer fonksiyonu  $G(s)$

$$G(s) = \frac{2}{3s^3 + 5s^2 + 2s + 1} \quad (2.23)$$

şeklinde olsun. Bu sistem için,  $\tau = 4$  ve kararlılık indeksleri Standart Manabe Formunda seçilirse, bölüm 2.4'te anlatılacak olan tasarım prosedürü uygulandığında hedef karakteristik denklem  $P_d(s)$  ve KDY kontrolcülerini  $A(s)$ , B(s) ve  $F(s)$  aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$P_d(s) = 0.4096s^5 + 2.048s^4 + 5.12s^3 + 6.4s^2 + 4s + 1 \quad (2.24)$$

$$A(s) = 0.13653s^2 + 0.45511s + 0.85713 \quad (2.25)$$

$$B(s) = 0.53381s^2 + 0.91532s + 0.071437 \quad (2.26)$$

$$F = 0.5 \quad (2.27)$$

Bu kontrol sistemi için katsayı diyagramı Şekil 2.6'daki gibi elde edilmiştir. Şimdi bu diyagram kullanılarak kapalı çevrim sistemin cevap hızı, kararlılığı ve dayanıklılığı hakkında bilgilere nasıl ulaşılacağı gösterilecektir.

### 2.3.1 Katsayı diyagramı ile sistemin hızının tayin edilmesi

Sistemin hızı ile ilgili olan  $\tau$  değeri  $a_1/a_0$  olarak tanımlanmıştır.  $\tau$  değeri ve dolayısıyla sistemin hızı hakkında bilgi, KD aracılığıyla oldukça kolay bir şekilde elde edilebilir. Katsayı eğrisinin ilk elemanı  $a_0$  ve ikinci elemanı  $a_1$  dir. O zaman katsayı eğrisini oluşturan ilk doğrunun,  $a_0$ 'ı  $a_1$ 'e birleştiren doğrunun eğimi  $a_1/a_0$  değerini ve dolayısıyla  $\tau$ 'nun değerini verir.  $\tau$  değeri elde edildikten sonra sistemin hızı hakkında bilgi elde edilmiş olur.

### 2.3.2 Katsayı diyagramı ile sistemin kararlılığının tayin edilmesi:

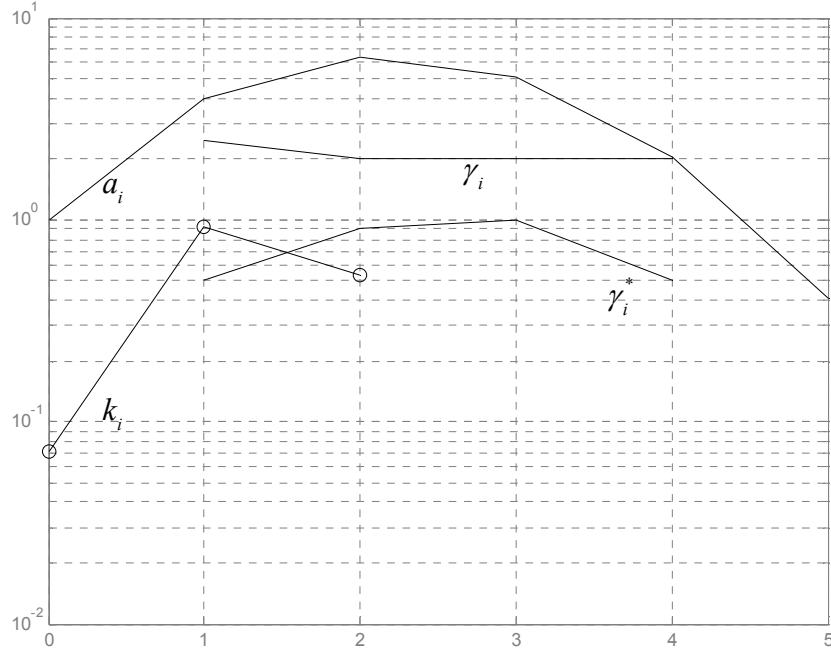
Bölüm 2.2.3'te kontrol sisteminin kararlılığı ve kararsızlığı ile ilgili yeter koşullar gösterilmiştir. Kararlılık için yeter koşullardan biri

$$\sqrt{\gamma_{i+1}\gamma_i} > 1.4546 \quad (2.28)$$

şeklinde verilmiştir. Bu koşul, kararlılık için yeter koşulu vermesinin yanında kararlılığın derecesi hakkında da bilgi verir. Yani  $\gamma_i$ 'ler büyüdükçe sistemin kararlılığı artar.

Katsayı eğrisinin konveksliğinin derecesi kararlılık için bir ölçüttür (Manabe, 1994a). Şekil 2.7'de  $\gamma_i$ 'lerin katsayı eğrisinden nasıl bulunabileceği gösterilmiştir. Şekle

bakılınca anlaşılabilir ki; katsayı eğrisinin konveksliğinin artması,  $\gamma_i$ 'lerin büyümesine denk düşer ve bu da sistemin kararlılığının artması demektir. Bu durumu Kim ve Manabe (2001) “katsayı eğrisinin konveksliğinin derecesi kararlılık için bir ölçüttür” şeklinde ifade etmiştir.



Şekil 2.6 : Katsayı diyagramı.

Katsayı diyagramından sistemin kararlılığının anlaşılması için (2.29)'daki yeter koşul da kullanılabilir.

$$\gamma_i > 1.12\gamma_i^*, \text{ tüm } i=1\sim n-2 \text{ için} \quad (2.29)$$

KD'de hem kararlılık indeksleri, hem de kararlılık sınır indeksleri çizildiği için (2.29)'u sağlayıp sağlamadığı hızlı ve kolay bir şekilde belirlenebilir.

Katsayı diyagramından sistemin kararsızlığının anlaşılması için (2.30) kullanılabilir.

$$a_{i+1}a_i \leq a_{i+2}a_{i-1}, \text{ herhangi bir } i=1\sim n-2 \text{ için} \quad (2.30)$$

KD'nin y eksenini logaritmik olduğu için iki sayının çarpımının karekökü işlemi, iki

noktayı birleştiren doğrunun ortasına tekâbul etmektedir. O zaman KD ile sistemin kararsızlığının anlaşılması için (2.30) yerine, aynı şeyi ifade eden (2.31) kullanılabilir:

$$\sqrt{a_{i+1}a_i} \leq \sqrt{a_{i+2}a_{i-1}}, \text{ herhangi bir } i=1 \sim n-2 \text{ için} \quad (2.31)$$

$A_i = \sqrt{a_i a_{i+1}}$  ve  $B_i = \sqrt{a_{i-1} a_{i+2}}$  olmak üzere, katsayı diyagramı Şekil 2.8'de gösterilmiştir. Kapalı çevrim sistemin kararlı olması için Şekil 2.8'de görülen  $A_1$ 'in  $B_1$ 'den veya  $A_2$ 'nin  $B_2$ 'den veya  $A_3$ 'ün  $B_3$ 'ten altta olması yeterlidir ancak şekilde de görüldüğü gibi böyle bir durum söz konusu olmadığından dolayı sistemin kararsızlığı için yeter koşul sağlanamamış olur. Ayrıca, eğer katsayı eğrisi konveks bir yapıya sahipse, belirtilen koşul hiçbir zaman gerçekleşmez. Yani sistemin kararsızlığı için yeter şart sağlanmamış olur. Ancak katsayı eğrisi konveks bir yapıya sahip değilse, belirtilen koşul sağlanıyor olabilir. Yeter şartı sağlayıp sağlamadığı  $A_i$  ve  $B_i$  değerlerini bulduktan sonra belirlenebilir. Tüm  $A_i$  ve  $B_i$  değerlerinin bulunması konveks yapının bozulmadığı sistemlerde gereksiz olacaktır. Öncelikle katsayı eğrisinin konveks olup olmadığı kontrol edilmeli, konveks yapının bozulduğu kısımlardaki  $A_i$  ve  $B_i$  değerlerinin değerlendirilmesi gerekir.

Katsayı diyagramından sistemin kararsızlığının anlaşılması için (2.32)'deki yeter koşul da kullanılabilir.

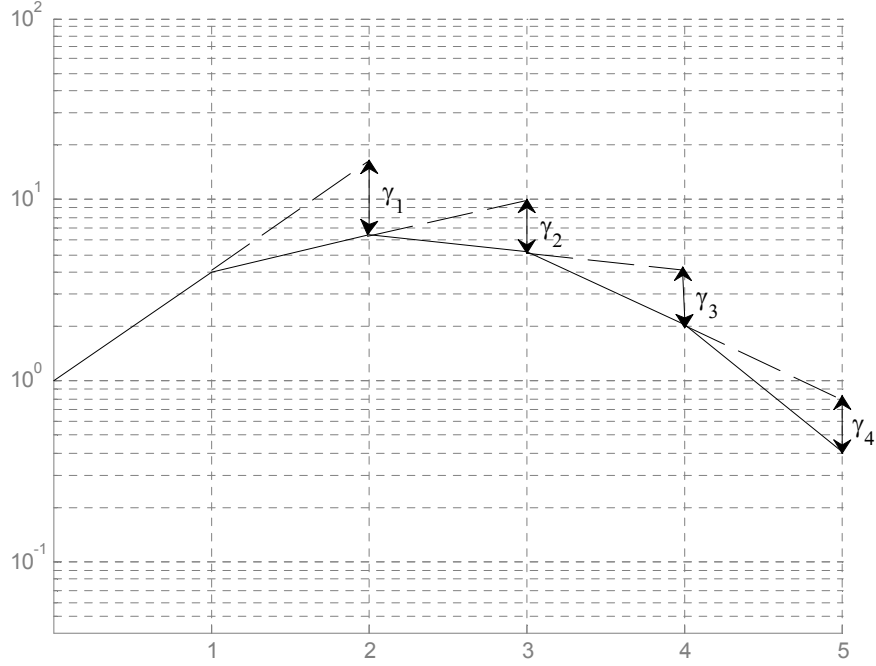
$$\gamma_{i+1}\gamma_i \leq 1, \text{ herhangi bir } i=1 \sim n-2 \text{ için} \quad (2.32)$$

KD'de kararlılık indeksleri çizildiği için kapalı çevrim sistemin (2.32)'deki koşulu sağlayıp sağlamadığı hızlı ve kolay bir şekilde belirlenebilir.

### 2.3.3 Katsayı diyagramı ile sistemin dayanıklılığının tayin edilmesi:

Dayanıklılık için birçok ölçüt vardır. Bunlardan biri de  $a_i$ 'lerin yüzde değişimine karşılık  $k_i$ 'lerin yüzde değişimidir.  $B(s)$  kontrolcüsünün derecesi  $q$  olmak üzere,

$k_1/a_1 \dots k_q/a_q$ 'nin hepsinin 1 veya 1'den daha küçük olması dayanıklılığın iyi olduğunun göstergesidir (Kim ve Manabe, 2001). Bu durum katsayı diyagramında,  $k_i$ 'lerin oluşturduğu kısmi katsayı eğrisinin,  $a_i$ 'lerin oluşturduğu katsayı eğrisinin altında olmasına karşılık gelir. Bu şekilde KD kullanılarak kontrol sisteminin dayanıklılığı, oldukça hızlı ve kolay bir şekilde belirlenmiş olur (Manabe,1998).



Şekil 2.7 : Katsayı diyagramından kararlılık indekslerinin bulunması.

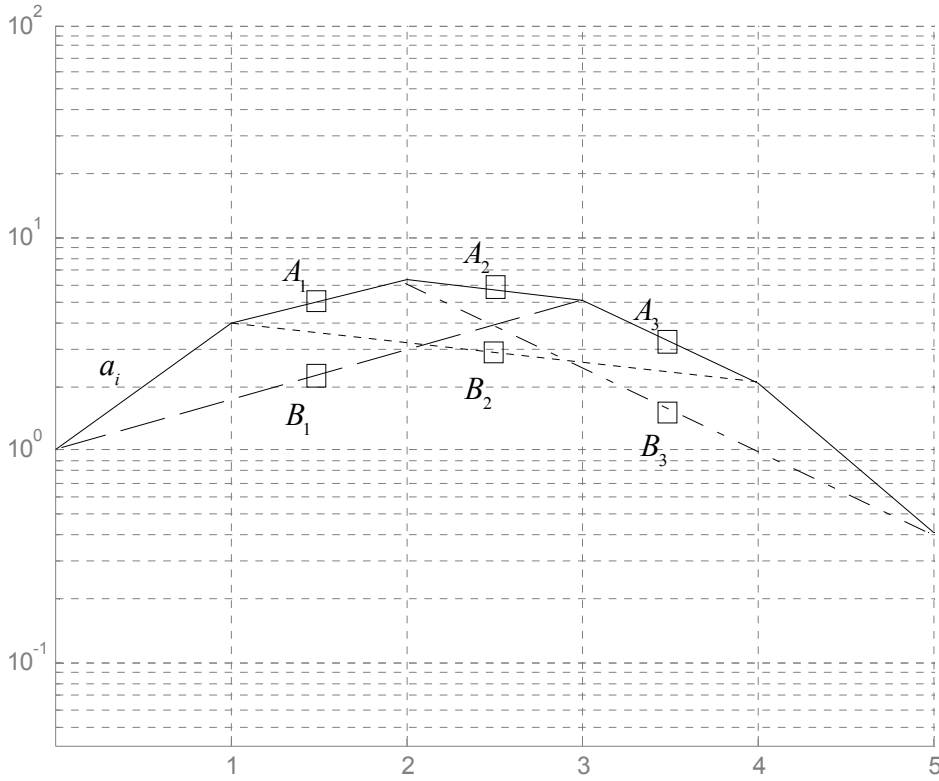
Yukarıdaki örneğin dayanıklılığını inceleyecek olursak; katsayı eğrisinin katsayılarını elde etmek için (2.24)'ten ve kısmi katsayı eğrisinin katsayılarını elde etmek için de (2.26)'dan yararlanılır.  $a_i$ 'lerin yüzde değişimine karşılık  $k_i$ 'lerin yüzde değişimi:

$$\frac{k_0}{a_0} = \frac{0.071437}{1} = 0.071437 \leq 1 \quad (2.33)$$

$$\frac{k_1}{a_1} = \frac{0.91532}{4} = 0.22883 \leq 1 \quad (2.34)$$

$$\frac{k_2}{a_2} = \frac{0.53381}{6.4} = 0.0834078 \leq 1 \quad (2.35)$$

şeklinde bulunur. Bu durumda sistemin dayanıklı olduğu söylenilebilir. Bu durum, katsayı diyagramı aracılığıyla görsel olarak hızlı bir şekilde de ortaya konabilir. Şekil 6'da görüldüğü gibi kısmi katsayı eğrisi, katsayı eğrisinin altındadır. Dolayısıyla sistem dayanıklıdır.



Şekil 2.8 : Katsayı diyagramı ile kararlılığın belirlenmesi.

Katsayı diyagramının önemi; bir kontrol sisteminin 3 önemli özelliği olan kararlılık, cevap hızı ve dayanıklılığı grafiksel olarak tek bir diyagram üzerinde göstermesinden kaynaklanmaktadır (Manabe,1998). KD sayesinde tasarımcı, tasarımla ilgili tüm resmi aynı anda görür ve bu da tasarımcının, daha dengeli, daha tutarlı kararlar vermesine olanak tanır. Tasarımcı, kendi ihtiyaçlarını karşılayacak şekilde bu üç önemli özellik arasında bir uzlaşma sağlayabilecektir.

Uygulamada  $\gamma_1 = 2.5$ ,  $\gamma_2 = \gamma_3 = 2$  olması kararlılık ve cevap hızı kriterlerini sağlaması için tavsiye edilir fakat  $\gamma_i, i \geq 4$  için  $\gamma_i > 1.5\gamma_i^*$  olacak şekilde seçilebilir.

Böyle bir özgürlükle, tasarımcı kontrolcüyü karakteristik polinomla birlikte tasarlama özgürlüğüne erişir ve kararlılık ve cevap hızından ödün vererek dayanıklılığı artırabilir. KDY'nin özü uygun  $\gamma_i$ 'lerin seçimine dayandığı için tasarım, diğer birçok tasarım yönteminde de geçerli olduğu gibi, bir miktar tecrübe gerektirir.

## 2.4 Tasarım Prosedürü

Lineer cebirsel bir yaklaşım olan KDY'de, klasik ve modern kontrole göre daha avantajlı olan eşzamanlı tasarım söz konusudur. Bu tasarımda, ilk olarak kontrolcü yapısı ve kapalı çevrim transfer fonksiyonu kısmen belirlenir ve diğer parametreler, tasarım tarafından belirlenir. KDY'de performans kriterleri, KDY tasarım parametreleri olan  $\tau$  ve  $\gamma_i$  cinsinden yazılır. Bu parametreler kapalı çevrim transfer fonksiyonunu belirler. Bunun yanında bu parametreler kontrolcü parametreleri ile de cebirsel olarak açık bir şekilde ilişkilidir. Bu özellikleri, KDY'de eşzamanlı yaklaşımı kullanılabilir hale getirmektedir (Manabe,1998). KDY ile çeşitli şekillerde tasarımlar yapılmıştır. Bu bölümde Köksal ve Hamamcı (2004)'nin önerdiği tasarım yöntemi anlatılacaktır.

Sistem pay polinomu  $N(s)$  payda polinomu  $D(s)$  ve kontrolcü polinomları  $A(s)$ ,  $B(s)$  ve  $F(s)$  kontrolcü polinomları (2.1) (2.2) ve (2.3)'de tanımlandıkları gibidir.  $A(s)$  ve  $B(s)$  polinomlarının dereceleri kontrol edilecek sistemin derecesine ve kontrol sistemine etkiyecek bozucu tipine göre değişir.  $D(s)$ 'in ve dolayısıyla kontrol edilecek sistemin derecesi  $r$  olmak üzere,  $A(s)$ ,  $B(s)$  ve  $P(s)$ 'in dereceleri Çizelge 2.4'teki gibi seçilir (Hamamcı, 2004). Çizelge 2.4'te görüldüğü gibi, sisteme bozucu etkidiğinde bu etki kapalı çevrimli sisteme, interatör veya integratörler ekleyerek söndürülmeye çalışılmıştır.  $A(s)$  ve  $B(s)$  polinomlarının derecelerinin ne olması gerektiği bulunduktan sonra uygun kontrolcü polinomları parametrik olarak belirlenir. Bu veriler ışığında kontrol sisteminin karakteristik polinomu

$$P(s) = A(s)D(s) + B(s)N(s) = \sum_{i=0}^n a_i s^i \quad (2.36)$$

şeklinde elde edilir. Daha sonra, tasarım parametrelerinden biri olan  $\gamma_i$  KDY standart formuna göre ve bir diğer tasarım parametresi olan  $\tau$  ise hedeflenen  $T_s$ 'ye göre belirlenir. Bu parametreler belirlendikten sonra hedef karakteristik polinom

$$Pd(s) = a_0 \left[ \sum_{i=2}^n \left( \prod_{j=1}^{i-1} \frac{1}{\gamma_{i-j}^j} \right) (\tau s)^i \right] + \tau s + 1 \quad (2.37)$$

şeklinde bulunur. Daha sonra sistemin karakteristik polinomu  $P(s)$  ile hedef karakteristik polinom  $Pd(s)$  birbirine eşitlenir ve diophantine eşitliği olarak adlandırılan eşitlik elde edilir. Bu eşitlik (2.38)'deki gibi Sylvester formuna dönüştürülürse kontrolcü katsayıları daha kolay bir şekilde bulunabilir.

$$[C]_{rxr} \begin{bmatrix} l_i \\ k_i \end{bmatrix}_{rxl} = [a_i]_{rxl} \quad (2.38)$$

Kontrolcü katsayılarının bulunmasıyla tasarım sona erer ancak unutulmamalıdır ki tasarım parametrelerinin tümü, tasarım öncesinde belirlenmiştir. Dolayısıyla elde edilen kontrol sistemi için dayanıklılığın garantisi yoktur. Sistemin dayanıklılığı KD üzerinden tespit edilmelidir. Eğer sistem dayanıklılığı istenilen düzeyde değilse cevap hızından ödün verip  $\tau$ 'yu değiştirerek veya kararlılıktan ödün verip  $\gamma_i$ 'yi değiştirerek sistem daha dayanıklı hale getirilebilir.

**Çizelge 2.4 :** Kontrolcü polinomlarının dereceleri.

	<b>Bozucu Tipi</b>		
	<b>Bozucu yok</b>	<b>Basamak Tipi</b>	<b>Rampa Tipi</b>
<b>Derece(A(s))</b>	$r-1$	$r$	$r+1$
<b>Derece(B(s))</b>	$r-1$	$r$	$r+1$
<b>Koşul</b>	-	$l_0=0$	$l_0=0, l_1=0$
<b>Derece(P(s))</b>	$2r-1$	$2r$	$2r+1$

## 2.5 Bir Örnek

$$G(s) = \frac{2}{5s^2 + 2s + 1} \text{ sistemi ele alınsın.}$$

Bu durumda  $N(s) = 2$ ,  $D(s) = 5s^2 + 2s + 1$  olur. Basamak tipi bozucuyu söndürecek bir kontrolcü tasarlanacak olursa, sistem derecesi 2 olduğu için, kontrolcü polinomları  $A(s)$  ve  $B(s)$ 'in dereceleri 2 olması gerekir. Bu durum da  $A(s)$  ve  $B(s)$  şu şekilde belirlenir:

$$A(s) = l_2 s^2 + l_1 s \quad (2.39)$$

$$B(s) = k_2 s^2 + k_1 s + k_0 \quad (2.40)$$

O zaman kontrol sisteminin karakteristik polinomu şu şekilde bulunur:

$$P(s) = 5l_2 s^4 + (5l_1 + 2l_2)s^3 + (2k_2 + 2l_1 + l_2)s^2 + (2k_1 + l_1)s + 2k_0 \quad (2.41)$$

$\tau=2$  için kararlılık indeksleri de Manabe standart formunda seçilirse hedef karakteristik polinom

$$Pd(s) = 0.128s^4 + 0.64s^3 + 1.6s^2 + 2s + 1 \quad (2.42)$$

olarak bulunur.  $P(s)$  ve  $Pd(s)$  birbirine eşitlenir ve diophantine eşitliği Sylvester formuna çevrilirse

$$\begin{pmatrix} 5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 5 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} l_2 \\ l_1 \\ k_2 \\ k_1 \\ k_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.128 \\ 0.64 \\ 1.6 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.43)$$

Kontrolcü katsayıları bu denklemin çözümünden kolayca elde edilir. Katsayılar yerine konulursa kontrolcü polinomları

$$A(s) = 0.0256s^2 + 0.11776s \quad (2.44)$$

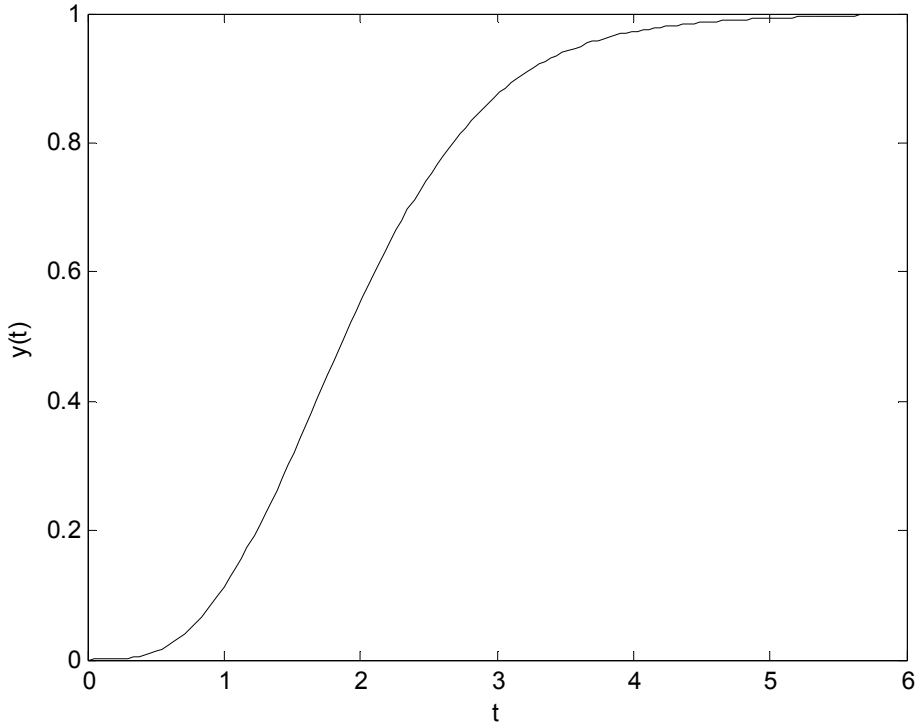
$$B(s) = 0.66944s^2 + 0.94112s + 0.5 \quad (2.45)$$

$$F(s) = 0.5 \quad (2.46)$$

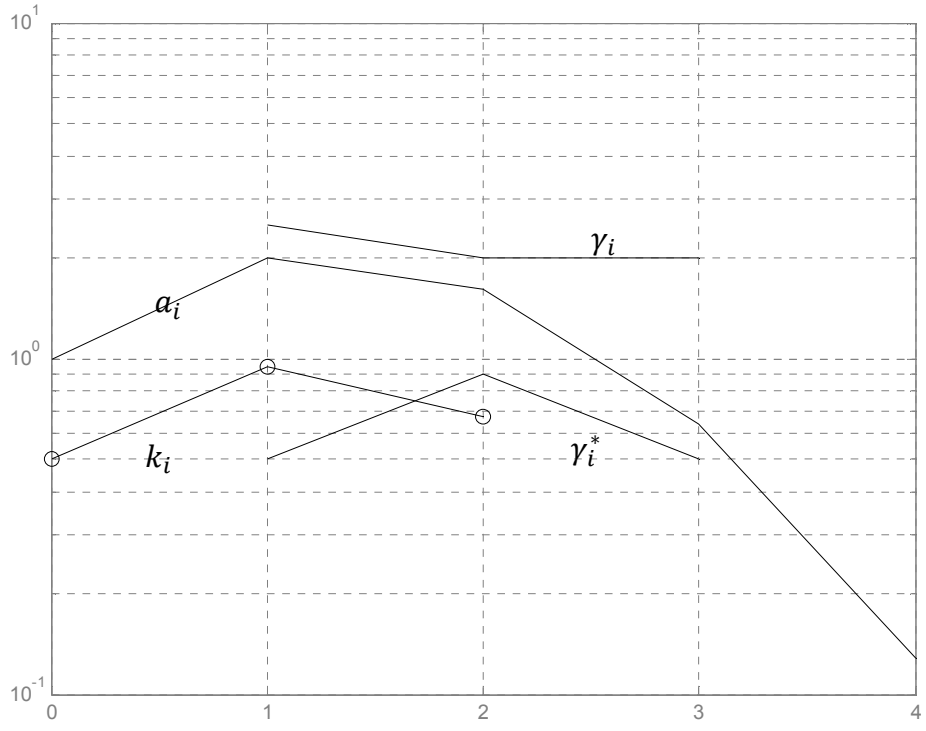
olarak bulunur. Bu durumda kontrol sisteminin basamak yanıtı Şekil 2.9'daki gibidir.

Son olarak katsayı diyagramından sistemin dayanıklılığı test edilmelidir. Bu sistemin katsayı diyagramı Şekil 2.10'deki gibidir. KD'de  $a_i$  ile gösterilen kısmi katsayı eğrisi,  $a_i$  ile gösterilen katsayı eğrisinin oldukça altındadır. Bu da kontrol sisteminin oldukça dayanıklı olduğunu belirtmektedir. Böylelikle, kontrol sisteminin 3 önemli unsuru olan kararlılık, cevap hızı ve dayanıklılığı sağlayan bir kontrolcü tasarımı gerçekleştirilmiş oldu.

Tezin ileriki kısımlarında da KDY tasarım örnekleri verildiği için, örnek kısmında bir örnek vermenin yeterli olacağı düşünülmüştür. Tezin ilerleyen kısımlarında birçok örnekle karşılaşılacaktır.



Şekil 2.9 : Kontrol sisteminin basamak yanıtı.



Şekil 2.10 : Katsayı diyagramı.



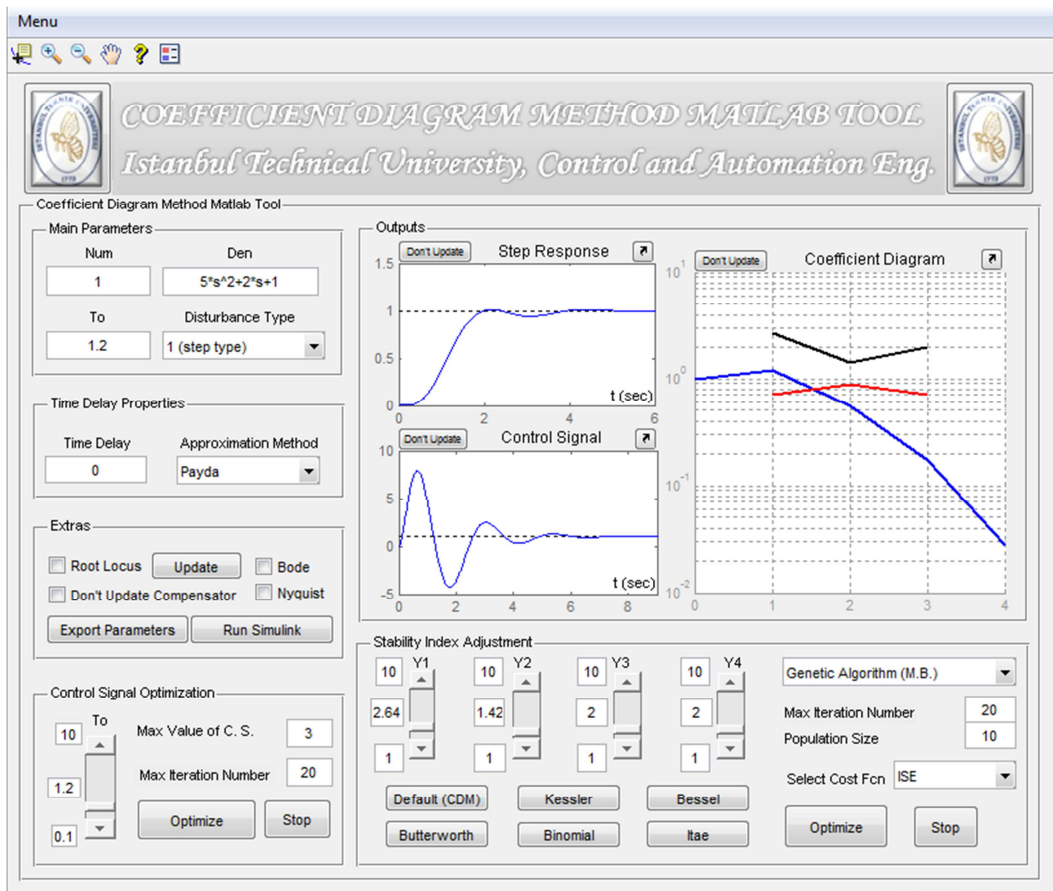
### 3. KDY MATLAB ARAYÜZÜ

KDY, etkili bir kontrolcü tasarım yöntemidir ancak etkin bir şekilde kullanımı için bilgisayar programına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ihtiyacı karşılamak üzere 2000’li yıllarda çeşitli çalışmalar yapılmıştır (Hara ve Hori, 2000; Pang ve Manabe, 2000). Bu çalışmalara rağmen, Manabe (2002a) iyi bir KDY programına şiddetle ihtiyaç olduğunu belirtmiş ve bu çalışmaların geliştirilmesi gerektiğini ifade etmiştir. Bu tarihten sonra bu konuda birkaç çalışma daha yapılmıştır. Bunlardan biri Manabe’nin kendi sitesinde yayınladığı Matlab tabanlı CDMCAD yazılımı (CDM CAD, t.y.), diğeri ise Köksal ve Hamamcı (2004) ’nın tasarladığı Matlab tabanlı bir arayüzdür. CDMCAD, bir arayüz içermemektedir. Bir klasör içinde birçok m-file bulunmaktadır ve ihtiyaca göre çeşitli m-file’ların kullanımı gerekmektedir. Bir arayüz olmadığı için fonksiyonların kullanımını ve hangisinin nerede kullanılacağını öğrenmek ekstra emek harcamayı gerektirmektedir. Hamamcı’nın tasarladığı arayüz ise etkileşimli bir arayüz değildir. KDY kontrolcülerini bulmaktadır ancak derinlemesine analiz yapmaya imkân tanımamaktadır. Bu bölümde, bu tez kapsamında geliştirilmiş ve ‘CDM Matlab Tool’ şeklinde isimlendirilmiş, kullanıcı dostu bir arayüz tanıtılacaktır. Bu arayüz, KDY’nin etkin ve hızlı bir şekilde kullanımı için tasarlanmıştır ve KDY kontrolcülerini bulunmasının yanı sıra, kullanıcının çok çeşitli analizler yapmasına olanak tanır. Tasarım aşamasında akla gelebilecek sorulara cevap vermeye çalışılmıştır. Arayüz, kullanım esnasında kullanıcıya yol gösterecek birçok bildirim ve uyarılarla donatılmıştır. Bu arayüz, KDY’nin etkin bir şekilde kullanımının yanı sıra, KDY’yi öğrenmek isteyenler için de oldukça öğretici bir araç olarak kullanılabilir.

Geliştirilen arayüzün ana menü görünümü Şekil 3.1’deki gibidir.

### 3.1 'Main Parameters' Paneli

Bu panel, KDY kontrolcü tasarımı için gerekli olan temel parametreleri sorgular. 'Num' kısmına sistemin pay polinomu, 'Den' kısmına sistemin payda polinomu yazılır.  $\tau$  kısmına istenilen yerleşme süresi ile orantılı olarak bir  $\tau$  değeri girilir. 'Disturbance type' kısmında, sistemin hangi tip bozucuya maruz kaldığı seçilmelidir. Duruma göre 0 (bozucu yok), 1 (basamak tipi) ve 2 (rampa tipi) seçeneklerinden biri seçilebilir.



Şekil 3.1 : 'CDM Matlab Tool' arayüzü genel görünümü.

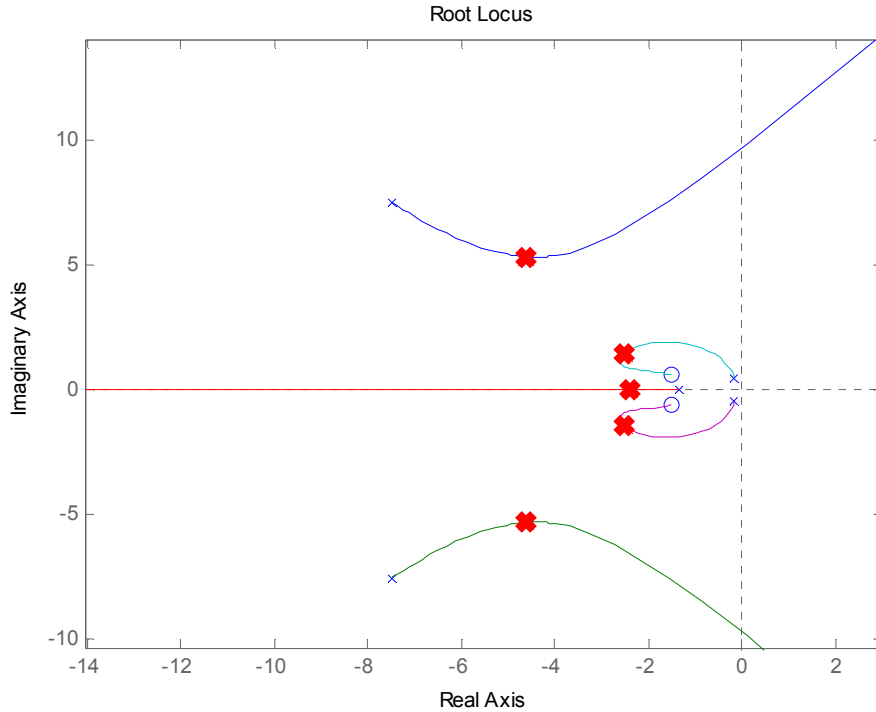
### 3.2 'Time Delay Properties' Paneli

Bu panel, sistemde ölü zaman olup olmadığını ve ölü zaman varsa ne tür yaklaşım yapılacağını sorgular. 'Time delay' kısmına ölü zaman değeri yazılır. 'Approximation method' kısmında yaklaşım metodu seçilir. Seçenekler arasında denominator, numerator, pade, pade2, pade3 yaklaşımları vardır. Denominator

yaklaşımı, taylor serisinin payda yaklaşımına; numerator yaklaşımı, taylor serisinin pay yaklaşımına; pade, birinci derece pade yaklaşımına; pade2, ikinci dereceden pade yaklaşımına; pade3, üçüncü dereceden pade yaklaşımına karşılık düşer.

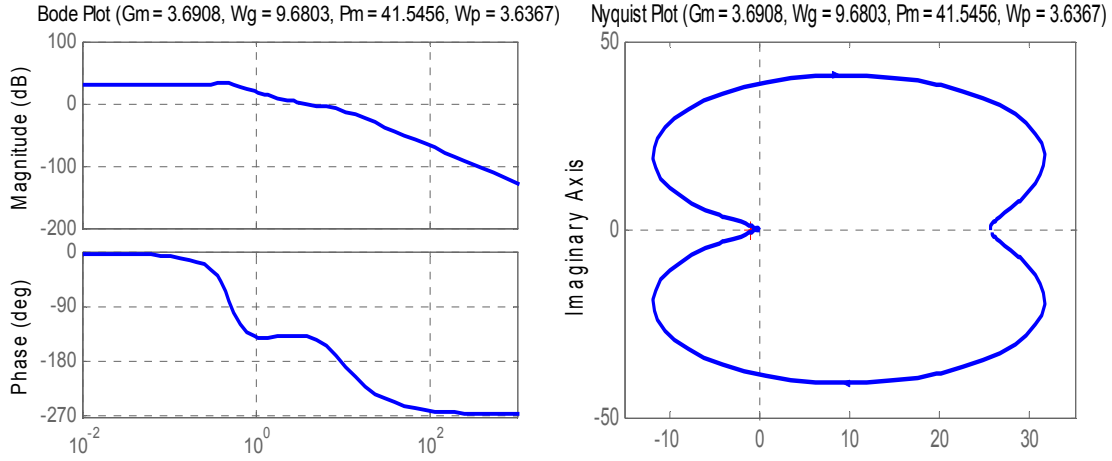
### 3.2 'Extras' Paneli

Bu panel, kontrol sisteminin daha detaylı analizine olanak sağlamak ve kontrol sistemlerinin analizinde sıkça kullanılan çeşitli kriterlere göre değerlendirebilmek için çeşitli araçlar içerir. 'Routh locus' seçeneği seçilirse, en son yapılmış tasarım için kök eğrisini çizer. Ayrıca, kök eğrisi üzerinde kontrol sisteminin kapalı çevrim köklerinin yeri daha kalın ve kırmızı 'x' işareti ile gösterilmektedir. Bu şekilde elde edilmiş bir kök eğrisi Şekil 3.2'deki gibidir. 'Routh locus' seçeneği ile kök eğrisi bir defaya mahsus olarak çizilir. Kök eğrisinin yeni tasarımlar için sürekli olarak güncellenmesi isteniyorsa 'update' butonuna basılmalıdır.



Şekil 3.2 : Kök eğrisi.

Bode ve nyquist seçenekleri seçilirse, bir defaya mahsus olarak, en son yapılmış tasarım için bode ve nyquist diyagramları çizilir. Bu şekilde elde edilmiş bir bode ve nyquist diyagramı Şekil 3.3'deki gibidir. Şekilde de görüldüğü gibi sistemin isim kısmında, sistemin kazanç - faz payları ve kazanç – faz geçiş frekansları belirtilmiştir.



Şekil 3.3 : Bode ve nyquist eğrileri.

'Don't update compensator' seçeneği ile, tasarlanan kontrolcünün değiştirilen parametrelere göre yeniden tasarlanıp tasarlanmayacağı belirlenir. Bu seçenek ile, sistemin parametre belirsizliğine olan dayanıklılığının hızlı bir şekilde değerlendirilebilmesi amaçlanmıştır. Bu tür programlarda, genellikle, parametre belirsizliğine karşı dayanıklılık sistemin çeşitli parametrelerine belirli aralıklarda griding yapmak suretiyle belirlenir ancak bu yöntem, çoğu zaman ağır işlem yükü oluşturur ve bu da işlemin tamamlanması için beklenen süreyi oldukça artırmaktadır. 'Don't update compensator' seçeneği ile kullanıcının nokta atışlarla sistemin parametre belirsizliğine karşı dayanıklılığını hızlı bir şekilde belirlemesi hedeflenmiştir. Bahsedilen şekilde griding yapmak, biraz sonra anlatılacak yöntemlerle yapılabilir. Bu seçenek ile parametre belirsizliğine karşı dayanıklılık şu şekilde belirlenebilir:

1. Önce 'Don't update compensator' seçeneği işaretlenir.

2. Daha sonra main parameters kısmından, sistemde hangi parametrelerde belirsizlik olacağı düşünülüyorsa o parametreler manuel olarak değiştirilir.

Sistemin çıkışları, 'Don't update compensator' seçeneği seçildiği andaki kontrolcü ile yeni - parametresi değiştirilmiş - sistemin oluşturduğu kontrol sistemi kullanılarak elde edilir.

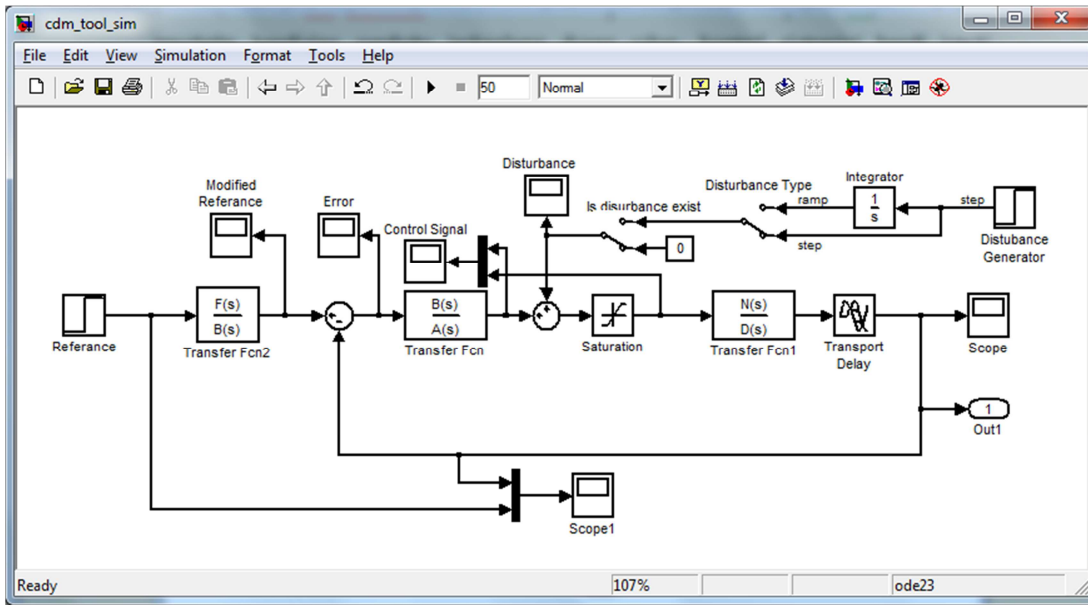
'Export parameters' butonu ile sistem polinomları ve tasarlanan kontrolcü polinomları, katsayı matrisi şeklinde workspace'e aktarılır. Bu şekilde kullanıcının, arayüzün kendisine sunduğu imkânların dışına çıkıp, bu polinomları kullanarak kontrol sistemini istediği şekilde analiz edebilme yeteneğine sahip olması amaçlanmıştır. Mesela, biraz önce bahsedilen parametre belirsizliğine karşı dayanıklılığı belirlemek için uygulanabilecek griding metodu, parametreler workspace'e aktarıldıktan sonra küçük bir kod aracılığıyla uygulanabilir.

'Run simulink' butonu ile kontrol sisteminin simulink modeli açılır. Bu seçenek ile, kullanıcının arayüzün kendisine sunduğu imkanların dışına çıkıp, kontrol sistemini kendi isteği doğrultusunda simulink üzerinden analiz edebilmesi amaçlanmıştır. Mesela, kontrol sisteminin çeşitli bozucu türlerine karşı yanıtına veya ölçme gürültüsünün yanıtı olan etkisi gibi konular kolaylıkla analiz edilebilir. Simulink modeli Şekil 3.4'teki gibidir. Şekilde görüldüğü gibi sistem polinomları ve kontrolcü polinomları parametrik olarak girilmiştir. Bu sayede arayüzde yapılan her değişiklik modele otomatik olarak etkir. Dolayısıyla, sistem değiştirildiğinde veya tasarım parametreleri değiştirildiğinde, simulink ekranında herhangi bir değişiklik yapmaya gerek kalmaz, sadece run simulink butonuna basmak yeterli olur.

### **3.3 'Control Signal Optimization' Paneli**

Tüm fiziksel sistemlerin kontrol işaretinin bir sınırı vardır. Eğer bu sınır düşünülmeden tasarım yapılırsa, simülasyonlarda sistem çok güzel kontrol ediliyor

gibi gözükse bile, gerçek sistem doyuma gidebilmekte ve bu da istenmeyen osilasyonlara, hatta kararsızlığa neden olabilmektedir. Literatürde doyuma gitme probleminin önüne geçmek için anti-integral sarması gibi yapılar önerilmiştir ancak bu yapılar kullanıldığında da çıkışın kararlı olacağını garantilemek oldukça güçtür. Bu tür bir problemi aşmak için kullanılabilir etkili ve ilk akla gelecek yöntemlerden biri kontrolcüyü kontrol işaretini doyuma götürmeyecek şekilde tasarlamaktır. Bu düşünceden yola çıkarak arayüze, tasarım parametrelerini değiştirerek kontrol işaretinin tepe değerini istenen değere getirmesi için kullanılması amaçlanan bu panel eklenmiştir.

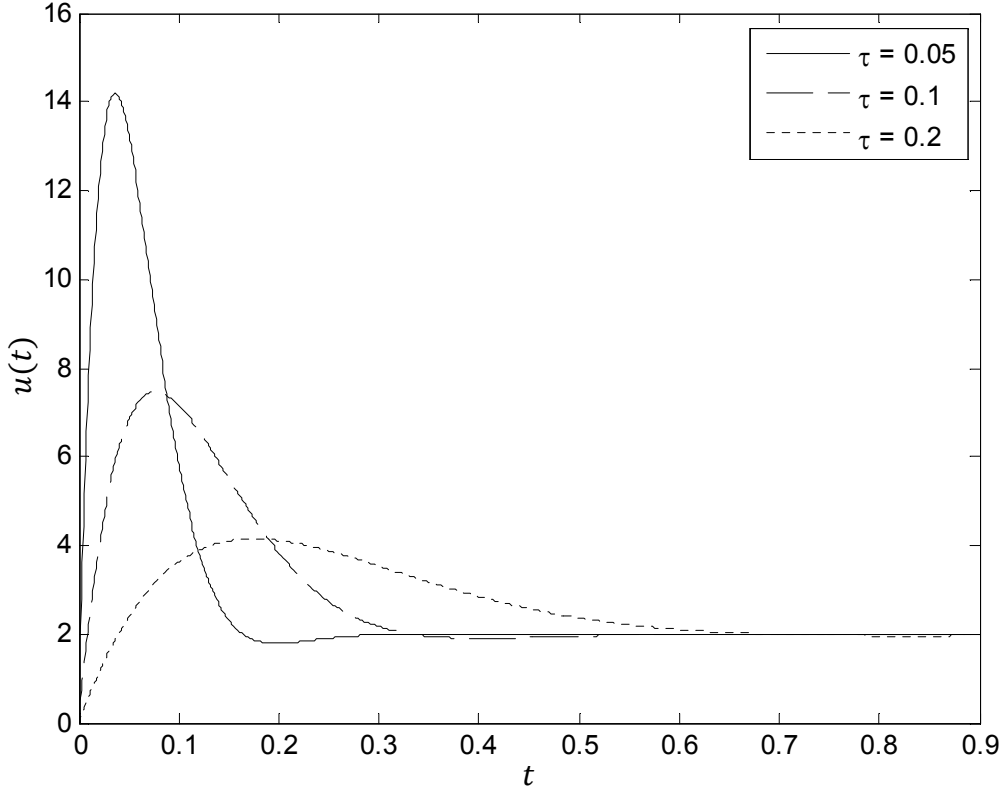


Şekil 3.4 : Simulink modeli.

Pek çok kontrolcü tasarım yöntemi için, tasarım parametreleri ile kontrol işaretinin genliği arasında doğrusal olmayan bir ilişki vardır. Mesela, genellikle, PID kontrolcüsü için  $K_p$ ,  $K_i$  ve  $K_d$  katsayılarının değişimi ile kontrol işaretinin genliği orantılı bir biçimde değişmez ancak KDY kontrolcüsü düşünüldüğü zaman,  $\tau$  parametresi sistemin hızı ile orantılı bir biçimde değişir. Bu da genelde kontrol işaretini orantılı bir biçimde değiştirerek yapılabilir. Dolayısıyla, KDY kontrol parametresi olan  $\tau$  ile kontrol işareti orantılı bir biçimde değişir. Sistem

$$G(s) = \frac{1}{s+2} \quad (3.1)$$

olmak üzere  $\tau$ 'nun birkaç değeri için kontrol işaretleri Şekil 3.5'te gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi kontrolcü, sistemi hızlandırmak işini kontrol işaretini artırarak gerçekleştirmiştir.

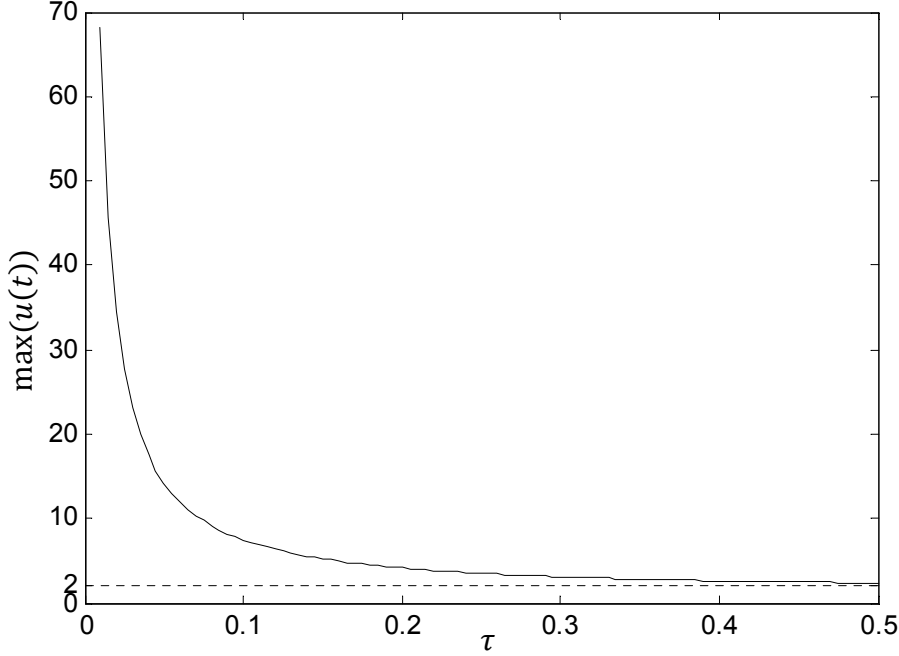


Şekil 3.5 : Birkaç  $\tau$  değeri için kontrol işaretleri.

Aynı sistem için,  $\tau$ 'nun değişimine göre kontrol işaretinin genliğinin değişimi grafiği Şekil 3.6'da verilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi, bu eğrinin 2 asimptotu var gibi düşünülebilir. Bunlardan birincisi  $x=0$  doğrusu yani  $y$  eksenidir.  $\tau=0$  için kontrol işareti  $\infty$ 'a gidiyor. Diğeri ise  $y=2$  doğrusudur. Şekilde de görüldüğü gibi  $\tau$  değeri ne kadar artırılırsa artırılsın, kontrol işaretinin genliği 2'den aşağıya düşmemektedir. Bunun nedeni, verilen  $G(s)$  sisteminin kalıcı halde 1'e gitmesi için kontrol işaretinin kalıcı halde 2 olması gerekliliğidir. Sistem çıkışının 1'e gitmesi için kontrol işaretinin kalıcı halde alması gereken değer  $K$  olsun. Bu değer

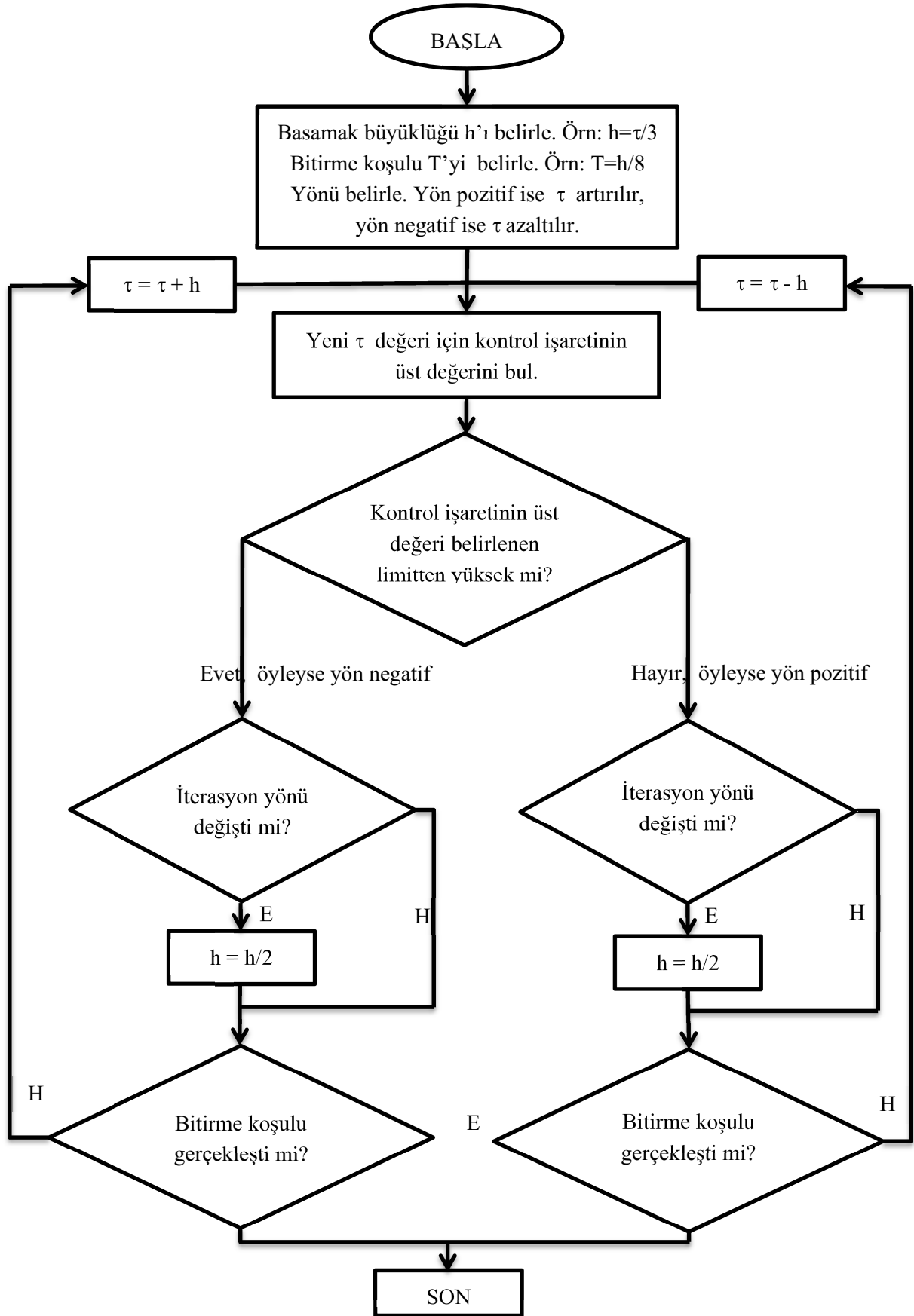
$$K = \frac{1}{\lim_{s \rightarrow 0} G(s)} \quad (3.2)$$

şeklinde bulunabilir. Şekil 3.6’da görüldüğü gibi küçük  $\tau$  değerleri için kontrol işaretinin tepe değeri oldukça büyük değerlere ulaşmakta,  $\tau$  değeri arttıkça kontrol işaretinin tepe değeri sürekli azalmakta ve belli bir  $\tau$  değerinden sonra da sabit kalmaktadır. Durum böyle olunca, kontrol işaretini belli bir sınır içerisinde tutacak kontrolcüyü bulmak için iteratif bir yaklaşım yeterli olacaktır. Bu türlü problemler için genellikle global arama algoritmalarından daha kesin sonuç veren, sonuca daha çabuk ulaşan ve gerçekleştirilmesi de daha kolay olan bir Greedy Algoritması kullanılmıştır. Kullanılan algoritmanın akış diyagramı Şekil 3.7’de verilmiştir. Panel üzerindeki, ‘Max. Value of C.S.’ kısmından kontrol işaretinin tepe değeri belirlenir. ‘Max. iteration number’ kısmından, optimizasyon boyunca yapılabilecek maksimum iterasyon sayısı belirlenir.



Şekil 3.6 :  $\tau$ 'nun değişimine göre kontrol işaretinin genliğinin değişimi.

‘Optimize’ butonuna basılınca, kontrol işaretinin üst değerini,  $\tau$  değerini değiştirerek, belirtilen seviyeye çeken algoritma çalışır.



Şekil 3.7 : Greedy algoritma akış diyagramı.

Kontrol işaretinin üst değerini belirlerken dikkat edilmesi gereken bir husus, ‘Max. value of C.S.’ kısmına girilecek sayının belirlenmesidir. Bu değer, (3.2)’de bulunan K değerinden büyük seçilmelidir. Bunun nedeni, Şekil 3.6’da görüldüğü gibi,  $\tau$  ne kadar artarsa artsın kontrol işaretinin genliğinin K değerinden aşağıya çekilemeyeceğidir. Eğer bu kurala uyulmazsa, bu durumu bildirir uyarı penceresi açılmaktadır. Ayrıca optimizasyon işleminin başarıyla tamamlanması, maksimum iterasyon sayısına ulaşılması, optimizasyonun kullanıcı tarafından durdurulması veya belirtilen kontrol işareti değerinin uygun olmaması gibi durumlarda da kullanıcıya geribildirimlerde bulunulur.

Kontrol işaretinin optimizasyonu otomatik olarak yapılabileceği gibi, manuel olarak da yapılabilir. Bu işlemin daha kolay yapılabilmesi için slider aracı kullanılmıştır. Kullanıcı slider’ı kullanarak  $\tau$ ’yu *manuel olarak artırıp azaltabilir*. Slider’ın üst kısmındaki değiştirilebilir metin kutusundan, slider’ın üst değeri; slider’ın alt kısmındaki değiştirilebilir metin kutusundan, slider’ın alt değeri belirlenir. Slider’ın ortasındaki değiştirilebilir metin kutusundan,  $\tau$  değeri belirlenebilir. Eğer belirlenen  $\tau$  değeri üst ve alt sınırın dışındaysa, üst ve alt sınır yeni belirlenen  $\tau$  değerini içine alacak şekilde otomatik olarak değiştirilir veya benzer şekilde üst ve alt sınır değiştirildiğinde  $\tau$  değeri o sınır içinde değilse,  $\tau$  değeri o sınırın içine girecek şekilde otomatik olarak değiştirilir. Slider’ın adım büyüklüğü, (alt sınır - üst sınır)/100 şeklinde belirlenir.

### **3.4 ‘Stability Index Adjustment’ Paneli**

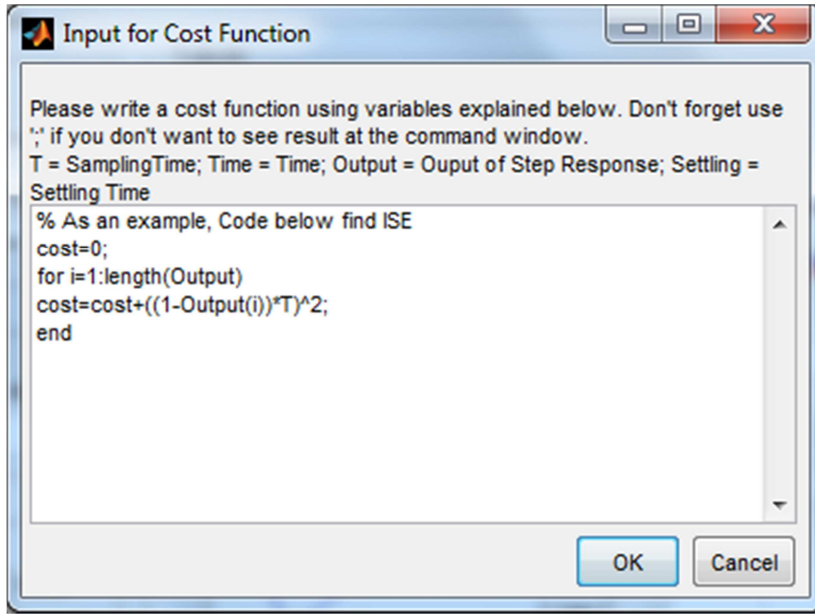
KDY’de kararlılık indeksi, Standart Manabe Formuna göre seçilir ancak bazı durumlarda kararlılık indeksinde çeşitli değişiklikler yapılması gerekebilir. Manabe (1994) çeşitli durumlarda dayanıklılığı artırmak için  $\gamma_i$ ’lerin 4’e kadar artırılabilirliğini belirtmiştir. Hamamcı (2001) çok hassas durumlarda kararlılık, dayanıklılık veya cevap hızı kriterlerini sağlamak için  $\gamma_i$ ’lerin değiştirilebileceğini

bildirmiştir. Demek ki  $\gamma_i$ 'lerin çeşitli durumlarda değiştirilmesi gerekebiliyor ancak bu değişiklik bir kural doğrultusunda gerçekleştirilmiyor. Tabii  $\gamma_i$ 'ler değiştirilirken kararlılık ve kararsızlık için yeter koşullar göz önünde bulundurularak değiştirilirse daha uygun sonuçlar elde edilebilir. Mesela,  $\gamma_i > 1.1243\gamma_i^*$  kararlılık için yeter şartı göz önünde bulundurularak  $\gamma_i$ 'ler seçilirse kararsız bölgeye girilmemiş olur ve böylece istenilen performansı sağlayan kontrol sistemi daha hızlı bir şekilde bulunabilir. Bu hatırlatmanın dışında deneme yanılma ile istenilen performansı sağlayan kontrolcü bulunmaya çalışılır. Durum böyle olunca,  $\gamma_i$ 'leri bir hata fonksiyonu ile optimize etmek,  $\gamma_i$ 'leri değiştirmek için iyi bir seçenek olarak karşımıza çıkar. 'Stability index adjustment' paneli bu ihtiyaca binaen eklenmiştir. Bu panelde  $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$  ve  $\gamma_4$  şeklinde isimlendirilmiş 4 adet slider bulunmaktadır. Bu sliderların üst, alt ve orta kısımlarında düzenlenebilir metin kutuları vardır. Bunlardan üstteki  $\gamma_i$  değerinin üst limitini, alttaki  $\gamma_i$  değerinin alt limitini ve ortadaki  $\gamma_i$  değerini belirtir. Bu kısımlar isteğe göre değiştirilebilir. Bu durumda  $\gamma_i$  değeri slider aracılığıyla veya slider'ın ortasındaki düzenlenebilir metin kısmından değiştirilebilir. Böylelikle kullanıcı  $\gamma_i$  değerlerini, deneme yanılma yoluyla, daha uygun hale getirilebilir.

$\gamma_i$ 'lerin değişimi ile kararlılık, dayanıklılık veya cevap hızı kriterleri arasında sürekli artan veya sürekli azalan tarzda bir ilişki yoktur aksine nonlineer bir ilişki vardır. Dolayısıyla bu optimizasyon probleminde global arama algoritmalarının kullanımı gerekmektedir. Arayüz,  $\gamma_i$ 'lerin optimizasyonu sürecinde kullanılmak üzere genetik algoritma (m.b.), çok hedefli genetik algoritma (m.b.), CRS, pattern arama (m.b.), benzetilmiş tavlama (m.b.) ve benzetilmiş tavlama olmak üzere 6 algoritma kullanılabilir. Bunlardan 4 tanesinin sonunda (m.b.) ibaresi vardır. Bu, algoritmaların Matlab tabanlı olarak çalıştığını belirtmektedir. Kalan iki algoritma tez kapsamında oluşturulmuştur. Her optimizasyonun birkaç ayarı arayüz üzerinden yapılabilmektedir. Mesela genetik algoritma için, maksimum iterasyon sayısı ve

popülasyon büyüklüğü arayüz üzerinden değiştirilebilmektedir. Diğer optimizasyon türlerinde de bunun gibi birkaç ayar arayüz üzerinden değiştirilebilir.

Bir optimizasyon söz konusu olduğu zaman, ihtiyaca uygun hata fonksiyonunun seçimi kritik bir öneme sahiptir. Hata fonksiyonlarının ihtiyaca uygun ve hızlı bir şekilde seçilebilmesi için kontrolcü optimizasyonunda sıkça kullanılan ISE, ITSE ve ITAE gibi hata fonksiyonları 'Select cost fcn' kısmında kullanıcıya seçenekler olarak sunulmuştur. Ayrıca minimum yerleşme zamanı ve aşısız minimum yerleşme zamanı kriterleri de kullanıcıya sunulan seçenekler arasındadır. Kullanıcıya sık kullanılan hata fonksiyonları seçme olanağı tanınmıştır. Kullanıcının çok daha değişik hata fonksiyonları kullanmak istemesi durumunda, kullanıcıya tam olarak istediği hata fonksiyonunu kullanma özgürlüğünü tanımak için 'Select cost fcn' kısmına 'user-defined' seçeneği eklenmiştir. Bu seçenek seçildiğinde kullanıcının kendi hata fonksiyonunu programsal olarak yazması için Şekil 3.8'deki pencere açılır.



Şekil 3.8 : Kullanıcı tanımlı hata fonksiyonu giriş ekranı.

Kullanıcı bu programı yazarken örnekleme zamanı, zaman dizisi, sistemin çıkış dizisi ve yerleşme zamanı değişkenlerini kullanabilir. Geçerli bir hata fonksiyonu yazılıp 'ok' butonuna basılırsa, optimizasyon yapılırken kullanıcı tarafından girilmiş

olan hata fonksiyonu kullanılacaktır. Hata fonksiyonu yazarken Matlab ile programlama kuralları geçerlidir. Mesela hata fonksiyonu kurallara uygun yazılıp bir satırın sonunda noktalı virgül konulmazsa, hata fonksiyonu her çağırıldığında Matlab 'command window' ekranına o değişkenin değeri yazılır. Kullanıcı tarafından geçersiz bir hata fonksiyonu yazılıp 'Ok' butonuna basılırsa, bu durumu bildirir bir uyarı penceresi açığa çıkar. Bu uyarıda girilen hata fonksiyonunun geçersiz olduğu ve hata fonksiyonu olarak ISE kriterinin kullanılacağı kullanıcıya bildirilir.



Uygun bir optimizasyon algoritması ve arzu edilen performans kriterine göre bir hata fonksiyonu seçildikten sonra 'Optimize' butonuna basılırsa, kararlılık indeksi optimizasyonu başlar. Optimizasyon başarılı bir şekilde tamamlandığında, kullanıcı tarafından durdurulduğunda ve kullanıcı tanımlı hata fonksiyonu geçersiz olarak girildiğinde kullanıcıya bu durumlara ilişkin bildirimler yapılır.

Şimdiye kadar karakteristik denklem katsayıları için birçok standart form önerilmiştir. Bu standart formlardan bazıları olan CDM, Kessler, Bessel, ITAE, Binomial ve Butterworth standart formlarına göre hızlı bir şekilde tasarım yapabilmek ve bu standart formları hızlı bir şekilde karşılaştırabilmek için butonlar oluşturulmuştur. İlgili butona basıldığında, kararlılık indeksleri ilgili standart forma göre belirlenir ve tasarım sadece bir defaya mahsus olarak o standart forma göre yapılır. Daha sonra yapılacak tasarımlarda  $\gamma_i$ 'ler belirlenirken,  $i = 1\sim 4$  için arayüzde görülen değerler kullanılır,  $i \geq 5$  için Standart Manabe Formuna göre belirlenmiş kararlılık indeksleri kullanılır.

### **3.5 'Outputs' Paneli**

Bu panelde, elde edilen tasarım çıktıları olan; tasarım sonucu elde edilen kapalı çevrim sistemin basamak yanıtı, kontrol işareti ve katsayı diyagramı çizdirilir. Her kısmın yanında 'don't update' butonu bulunmaktadır. Bu butona basılınca tasarım sonunda ilgili görüntü çizilmez. Bu özellik, optimizasyon yaparken bilgisayarın

Çizim için süre harcamaması ve sonucunda da optimizasyon işlemine daha kısa sürede tamamlaması için kullanılabilir.

 data görüntüleme butonuna basılarak, datalar incelenebilir. Benzer Şekilde pan, zoom ve legend araçları da kullanılabilir.  butonu, tasarım sonucunda elde edilen görüntüleri matlab figure Őekline dönüştürmek için kullanılır. Böylelikle elde edilen Őekiller kolaylıkla kopyalanabilir, üzerinde çeşitli değişiklikler ve düzenlemeler yapılabilir hale dönüştürülmüş olur.

‘CDM Matlab Tool’un bir diğer çıktısı ise tasarımların sonunda ‘command window’a yazılan ve yapılan işlemleri özetleyen ‘Summary’ ıktısıdır. Bu kısımda, yapılan işlemler adım adım kullanıcının bilgisine sunulmaktadır. Bu Şekilde elde edilmiş program ıktısı Şekil 3.9’de gösterilmektedir.

## SUMMARY

### 1. Analysing given system

$N(s) = 1$ ,  $D(s) = 2s+1$ ,  $T_o = 1.2 \Rightarrow T_s = [2.4\sim 3.6]$ , Disturbance = Step type, Dead Time = 1sn

Zeros of  $G(s)$  = not exist ; Poles of  $G(s)$  = -2 -0.5

Coefficients of  $N(s)$  = 1; Coefficients of  $D(s)$  = 2 1

#### 1.1. Pade approximation will be applied:

$N(s) = 2 - s$ ,  $D(s) = (2s + 1)(s + 2)$

Zeros of  $G(s)$  = 2 ; Poles of  $G(s)$  = -2 -0.5

Coefficients of  $N(s)$  = -1 2; Coefficients of  $D(s)$  = 2 5 2

$y_i$ 's:  $y_1 = 2.5$   $y_2 = 2$   $y_3 = 2$

### 2. Determining design parameters

$A(s) = l_1s + l_2s^2$   $B(s) = k_0 + k_1s + k_2s^2$

$P_d(s) = 1 + \tau s + \tau^2 s^2 / (y_1) + \tau^3 s^3 / (y_1^2 y_2) + \tau^4 s^4 / (y_1^3 y_2^2 y_3)$

### 3. Obtaining $P_c(s) = B(s)N(s) + A(s)D(s)$ by substituting known parameters

$P_c(s) = (2l_2)s^4 + (2l_1 - k_2 + 5l_2)s^3 + (2k_2 - k_1 + 5l_1 + 2l_2)s^2 + (2k_1 - k_0 + 2l_1)s + 2k_0$

### 4. Parameters are found by equating coefficients of $P_c(s)$ and $P_d(s)$ as follows:

$F = 0.5$   $l_1 = 0.16029$   $l_2 = 0.0082944$   $k_0 = 0.5$   $k_1 = 0.68971$   $k_2 = 0.22382$

Roots of  $A(s)$  = 0 -19.3257 and roots of  $B(s)$  = -1.9149 -1.1666

### 5. Found $P_d(s)$ . Zeros of $T(s)$ and poles of $T(s)$ equal to $N(s)/P_d(s)$ :

$P_d(s) = 0.016589s^4 + 0.13824s^3 + 0.576s^2 + 1.2s + 1$

Zeros of  $T(s)$  = 2 ; Poles of  $T(s)$  = -2.0833+0.67692i -2.0833+2.8675i -2.0833-2.8675i -2.0833-0.67692i

Şekil 3.9 : Geliştirilen arayüzün 'summary' çıktısı.



#### 4. KDY-P

KDY standart blok diyagramının fiziksel uygulamalarda kullanımı, geri beslemeye türev elamanı ekleyebileceği için, çeşitli sorunlara neden olabilmektedir. Bu yüzden, fiziksel uygulamalarda kullanılmak üzere KDY standart blok diyagramına eş bir blok diyagramı önerilmiştir (Avşar ve Hamamcı, 2011) ancak bu blok diyagramı kullanıldığında tasarlanan bazı KDY kontrolcülerini için sistem iç kararsız olmaktadır. Böyle bir durumda sistemin iç kararsız olmasını engelleyecek KDY-P olarak adlandırılmış bir yöntem önerilmiştir.

İç kararsızlık durumu,  $B(s)$  kontrolcüsünün kararsız olduğu durumlarda oluşmaktadır. Bu tür bir problemin ne zaman ortaya çıktığı yani  $B(s)$  polinomunun köklerinin ne zaman sağ yarı düzleme geçtiği araştırılmıştır. Sonuçta, çoğu sistemlerde kendi zaman sabitine göre yüksek  $\tau$  değerleri için  $B(s)$  kontrolör polinomunun kararsızlığa gittiği görülmüştür.

$$G_1 = \frac{1}{s+1} \quad (4.1)$$

$$G_2 = \frac{1}{s+2} \quad (4.2)$$

şeklinde tanımlanmış sistemler olsun. Bu iki sistem  $Ts = \sim 5s$  olacak şekilde kontrol edilmek istensin. Yerleşme zamanının yaklaşık olarak 5 saniye olması için  $\tau = \sim 2$  seçilmelidir.  $\tau = 2$  için 'CDM Matlab Tool' aracılığıyla tasarım yaptığımızda  $G_1$  sistemi için tasarlanan kontrolcü  $B_1$ ,  $G_2$  sistemi için tasarlanan kontrolcü  $B_2$  olmak üzere kontrolcüler aşağıdaki gibi aşağıdaki gibi bulunmuştur:

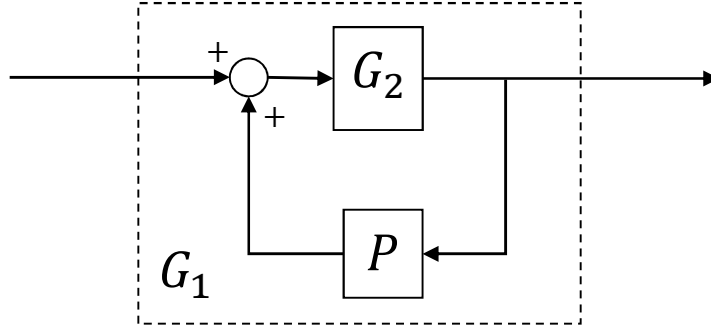
$$B_1 = 0.4s + 1 \quad (4.3)$$

$$B_2 = -1.2s + 1 \quad (4.4)$$

Bu durumda  $B_2$  kontrolör polinomu kararsız olur ve dolayısıyla  $G_2$  sistemi bu şekilde kontrol edilemez. Bu problemin  $G_2$  sisteminin simülasyonun içerisinde bir şekilde  $G_1$  sistemine benzetilmesi ile çözülebileceği düşünülmüştür. Bu benzetim için Şekil 4.1'deki yapı kullanılmış ve problem çözülmüştür. P kazanç elemanıdır. Bu yapı kullanıldığında

$$G_1 = \frac{G_2}{1 - G_2 P} \quad (4.5)$$

eşitliği oluşur. Bu örnek için (4.5)'ten  $P$  çekilirse  $P=1$  olarak bulunur. Klasik KDY prosedürü ile  $\tau=2$  için kontrol edilememiş  $G_2$  sistemi, KDY-P ile başarıyla kontrol edilmiş olur.



Şekil 4.1 : Simülasyonda bir sistemi başka bir sisteme benzetme.

Klasik KDY prosedürü uygulandığında  $B(s)$  polinomu kararsız olan bir  $G_2$  sistemi, KDY-P yöntemi ile kontrol edilmek istenirse, aşağıdaki prosedür uygulanır:

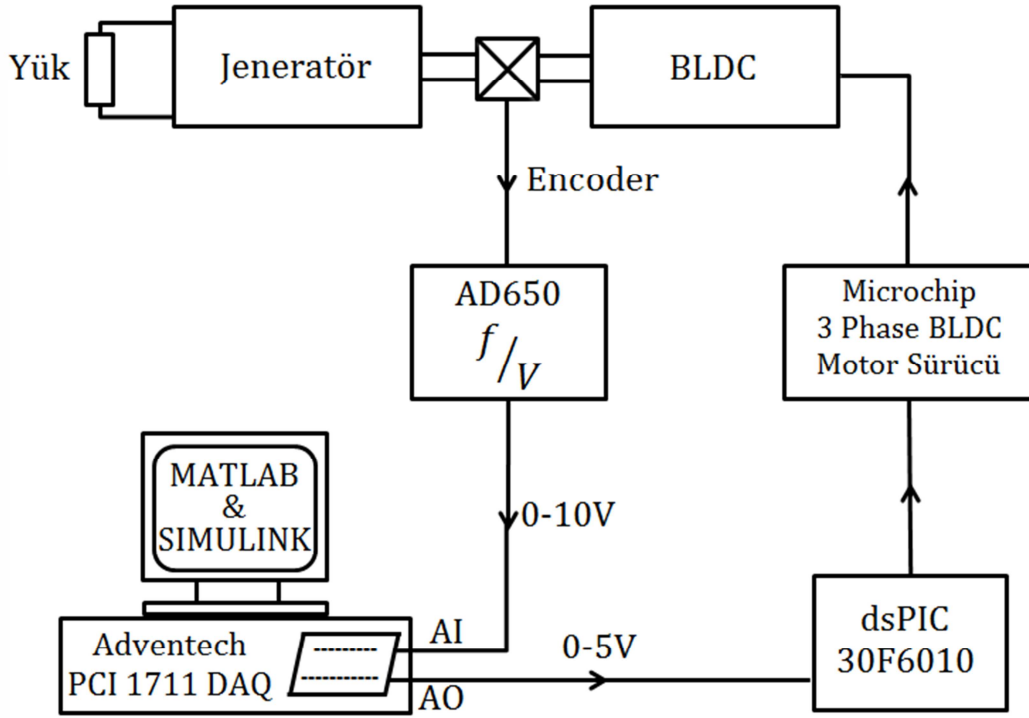
1. 'CDM Matlab Tool' ile sadece payda polinomunun  $s^0$  terimi farklı olan ve kontrol edilebilen  $G_1$  sistemi bul.
2. (4.5)'i kullanarak  $G_2$  sistemini,  $G_1$  sistemine benzetecek P değerini bul.
3. Şekil 4.1'deki yapıyı kullan.

## 5. FİZİKSEL UYGULAMA

Bu bölümde KDY'nin fiziksel uygulamalardaki performansı incelenecektir. Fiziksel sistem olarak İnönü Üniversitesi Kontrol Laboratuvarında bulunan, resmi Şekil 5.1'de verilen ve blok diyagramı Şekil 5.2'teki gibi olan BLDC (Brushless DC) motorun hız kontrolü yapılmıştır. KDY kontrolcüsünün performansının daha tutarlı bir şekilde incelenebilmesi amacıyla optimize edilmiş diğer bir deyişle optimal PI kontrolcüsü ile karşılaştırılmıştır. Optimal PI kontrolcüsü elde edilirken, Matlab programının tek-giriş tek-çıkış sistemlerin analizi için geliştirilmiş olan 'sisotool' içerisindeki optimizasyon tabanlı otomatikleştirilmiş katsayı ayarlama (automated tuning) aracından faydalanılmıştır.



Şekil 5.1 : Uygulamanın yapıldığı laboratuvar ortamının görüntüsü



Şekil 5.2 : Uygulamanın blok diyagramı.

### 5.1 Modelin Elde Edilmesi

Fırçasız motor sisteminin modeli, sistemden veri toplanıp verinin analizi sonucunda elde edilmiştir. Modelleme için veri toplama uygulamalarında giriş işareti sıklıkla basamak tipinde seçilmektir. Bunun yanında giriş işareti beyaz gürültü veya birbirinden farklı genlikte, frekansta ve fazda olan çeşitli sinüs işaretlerini toplamı olarak da seçilebilmektedir. Bu uygulamada bu üç yöntemin her biri sisteme uygulanmıştır ve Matlab sistem tanıma aracı (system identification tool) ile 3 adet model elde edilmiştir. Bu 3 farklı modelden hangisinin sistem modeli olarak kabul edileceğini bulmak için 3 modele göre de aynı zaman tanım bölgesi cevabını verecek kontrolcüler tasarlanmış ve en iyi sonucu veren (simülasyon sonucuyla en çok uyuşan) kontrol sistemindeki model, fiziksel sistemin modeli olarak kabul edilmiştir. Şekil 5.2’te görülebileceği gibi analog çıkışın alabileceği maksimum değer, yani

kontrolcünün sürücü sisteme gönderebileceği maksimum değer 5V'tur. Simulink içerisinde analog çıkışa giden işaret 2.75 ile çarpılmıştır. Böylelikle kontrol işaretinin doyma değeri 1.8 olarak normalize edilmiştir. Analog çıkıştan 5V uygulandığında, motor 3500rpm hızında dönmektedir ve bu da AD650 tarafından ~9.5V luk gerilime dönüştürülmektedir. 2350rpm'nin 1'e tekabül etmesi istenmiştir. Bunun için 9.5V'un  $3500/2350 \cong 1.5$ 'a tekabül etmesi gerekir. Dolayısıyla analog girişten okunan bilgi  $1.5/9.5 \cong 0.158$  ile çarpılarak normalize edilmiştir. Kontrol sistemine bu şekilde yukarıda bahsedilen üç tüp giriş uygulanmış ve daha sonra da Matlab sistem tanıma aracı ile modeller elde edilmiştir. Model elde edilirken, sistemin birinci dereceden bir sistem olacağı tahmini girilmiştir. Bu durumda fırçasız DC motor ve DC motora bağlı tam yükteki jeneratörün oluşturduğu sistemin modeli:

$$G(s) = \frac{0.8267}{0.08376s + 1} \quad (4.1)$$

şeklinde elde edilmiştir.

## 5.2 Kontrolcülerin Elde Edilmesi

Bu bölümde BLDC motor sistemini kontrol edecek KDY kontrolcüsü ve optimal PI kontrolcüsü tasarlanacaktır. Her fiziksel sistemde olduğu gibi, bu sistemde de kontrol işaretinin bir doyum noktası vardır. Kontrolcüler tasarlanırken bu durum göz önünde bulundurularak tasarım yapılmıştır.

### 5.2.1 KDY kontrolcüsünün elde edilmesi

KDY kontrolcüsü elde edilirken tasarıma etki edecek parametrelerden biri, sisteme etkileyen bozucu türüdür. Çizelge 2.4'te de görüldüğü gibi sisteme etkileyen bozucu türüne göre, seçilecek kontrolcünün mertebesi değişmektedir. KDY tasarım prosedüründe bulunan 'bozucu yok' seçeneği simülasyonlarda iyi bir performans göstermesine karşın, gerçek kontrol sistemlerinde bozucu kaçınılmaz olduğu için

referansı iyi bir şekilde takip edemeyecektir. Bu yüzden gerçek sistem üzerinde çalışılırken beklenmedik sonuçlarla karşılaşmamak için kontrolcünün en az basamak tipi bozucuyu bastırarak şekilde seçilmesi gerekmektedir. Bu durumda

$$A(s) = l_1 s \quad (4.2)$$

$$B(s) = k_1 s + k_0 \quad (4.3)$$

şeklinde seçilmelidir. (4.1)'den

$$N(s) = 0.8267 \quad (4.4)$$

$$D(s) = 0.08376s + 1 \quad (4.5)$$

olarak bulunur. Bu durumda sistem karakteristik polinomu

$$P(s) = B(s)N(s) + A(s)D(s) = 0.08376l_1 s^2 + (0.8267k_1 + l_1)s + 0.8267k_0 \quad (4.6)$$

şeklinde bulunur. Tasarım prosedürüne göre bir sonraki adım, hedef karakteristik polinomun belirlenmesidir ancak kontrol işaretini istenilen sınırlar içerisinde tutacak bir  $\tau$  değeri bilinmemektedir. Bu  $\tau$  değerini bulabilmek için CDM Matlab Tool ile bölüm 3.3'te belirtildiği gibi kontrol işareti 1.5 değerini geçmeyecek şekilde optimizasyon yapılır. Kapalı çevrim sistem 2. dereceden olacağı için kısım 2.2.2'de anlatıldığı üzere  $\gamma_1 = 3$  olarak seçilmiştir. Bu optimizasyon sonucunda elde edilen CDM Matlab Tool ekran görüntüsü Şekil 5.3'teki gibidir.

Optimizasyon sonucunda kontrol işaretinin maksimum değerini 1.5 yapan KDY kontrolcüsü için  $\tau$  değerinin  $\sim 0.075$  olduğu bulunmuş olur. Bu  $\tau$  değeri için sistemin yerleşme zamanı (%1) 0.2s olarak bulunmuştur. Bu durumda hedef karakteristik polinom

$$Pd(s) = 0.001875s^2 + 0.075s + 1 \quad (4.7)$$

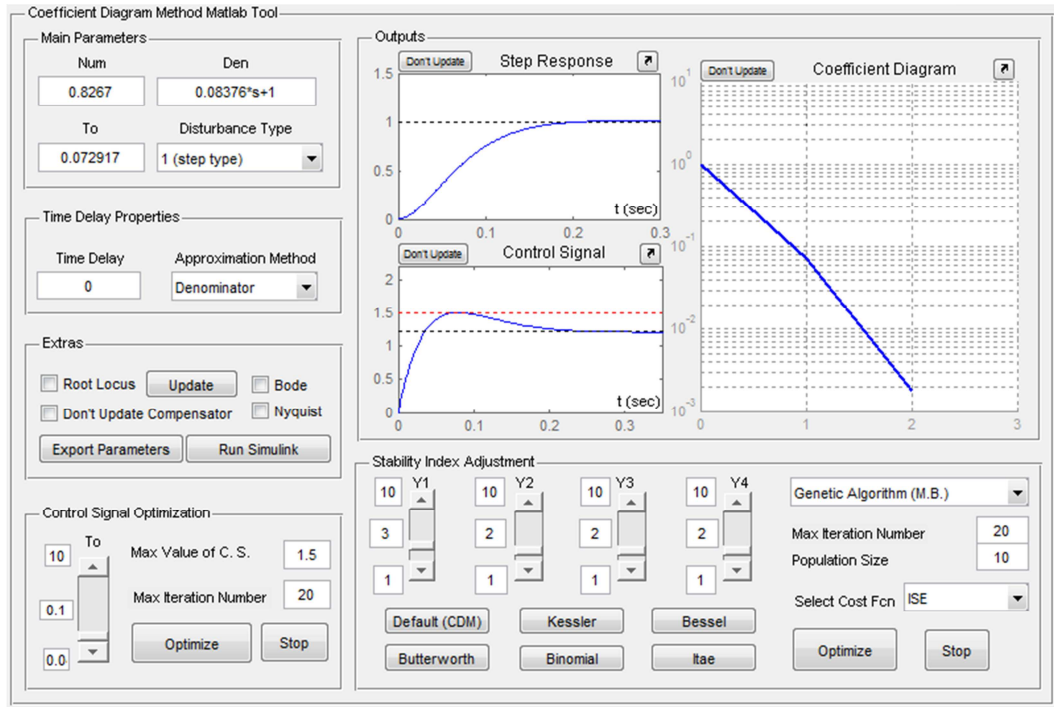
şeklinde bulunur. Kapalı çevrim sistemin karakteristik polinomu ile hedef karakteristik polinom birbirine eşitlenirse, kontrolcü polinomları

$$A(s) = 0.0224s \quad (4.8)$$

$$B(s) = 0.063644s + 1.21 \quad (4.9)$$

$$F(s) = 1.21 \quad (4.10)$$

şeklinde elde edilir. ‘CDM Matlab Tool’un tasarım sonu çıktularından biri olan ve ‘command window’ ekranında oluşturduğu, yapılan işlemleri adım adım yazan ‘summary’ kısmına bakılarak da KDY kontrolcülere elde edilebilirdi.



Şekil 5.3 : Optimizasyon sonucunda elde edilen ekran çıktısı.

## 5.2.2 Optimal PI kontrolcüsünün elde edilmesi

Optimal PI kontrolcüsü elde edilirken, Matlab programının tek-giriş tek-çıkış sistemlerin analizi için geliştirilmiş olan ‘sisotool’ içerisindeki optimizasyon tabanlı otomatikleştirilmiş katsayı ayarlama (automated tuning) aracından faydalanılmıştır. Kontrolcü elde edilirken, sistemin olabildiğince aşısız olması, kontrol işaretinin

1.5'i geçmemesi ve yerleşme zamanının (%1) 0.2s'den küçük olması hususlarına dikkat edilmiştir. Optimal PI kontrolcüsü (4.11)'deki gibi bulunmuştur.

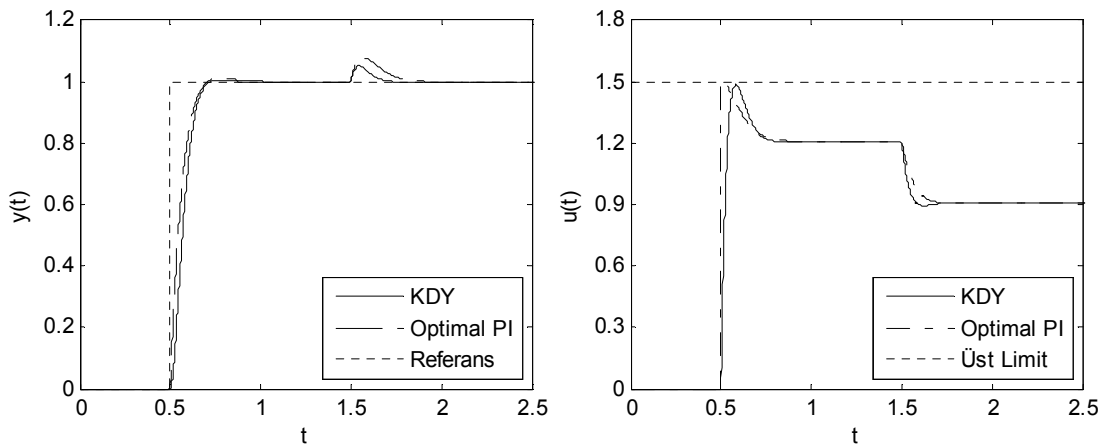
$$C(s) = \frac{1.509s + 22.184}{s} \quad (4.11)$$

### 5.3 Performans Karşılaştırması

Bu bölümde, KDY kontrolcüsü ile optimal PI kontrolcüsü, önce simülasyon üzerinden daha sonra da uygulama üzerinden performans karşılaştırmasına tâbi tutulmuştur.

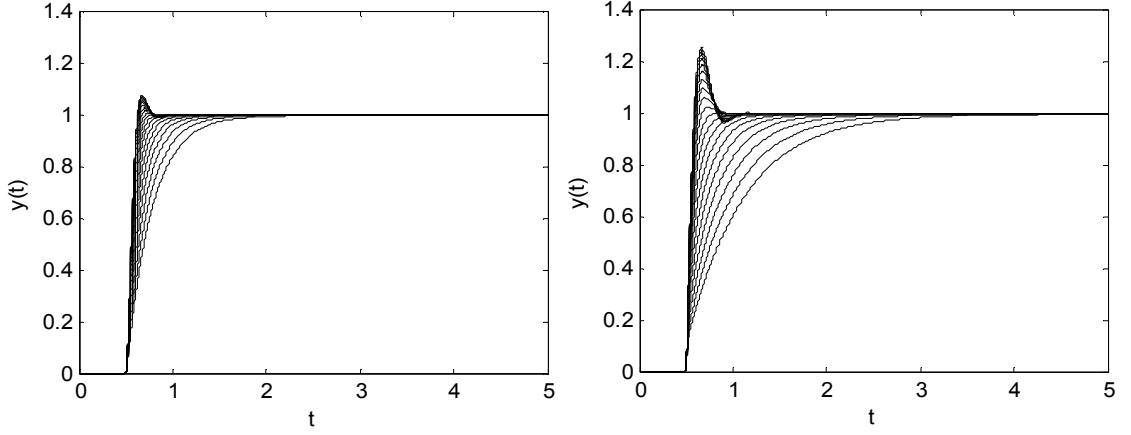
#### 5.3.1 Simülasyon performansı karşılaştırmaları

Kontrolcülerin simülasyon performansları, basamak yanıtları ile bozucuya ve parametre belirsizliğine dayanıklılıkları açısından incelenmiştir. Şekil 5.4'te kontrol sisteminin basamak yanıtı ve 1.5s'de sisteme etkiyen 0.3 genliğindeki basamak tipi bozucuya tepkisi gösterilmektedir. Şekil 5.5'te ise kontrol sisteminin parametrik belirsizliklere olan tepkisi gösterilmektedir. Belirsizlik olarak payda polinomunun sıfırıncı mertebeden terimi belirsiz parametre olarak belirlenmiş ve 0.1 ile 10 arasında logaritmik olarak alınan 20 veriye göre parametre belirsizliği sınanmıştır. Bu şekillerdeki veriler, Çizelge 5.1'de özetlenmiştir.



Şekil 5.4 : Basamak yanıtı ve bozucuya tepki.

Çizelge 5.1'e göre, iki kontrolcünün cevabı nominal sistem için birbirine oldukça yakındır ancak bozucu etkimesi ve parametre belirsizliği durumlarında KDY kontrolcüsünün birkaç adım önde olduğu görülmektedir.



Şekil 5.5 : KDY ve optimal PI kontrolcülerinin parametre belirsizliklerine tepkisi.

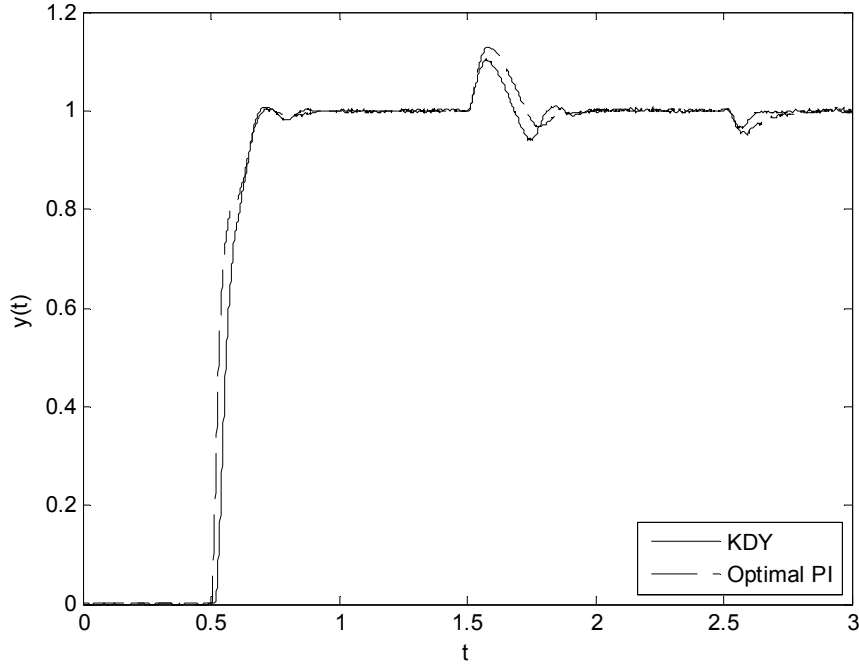
Çizelge 5.1 : Kontrolcülerin simülasyon performanslarının karşılaştırılması.

		<b>KDY</b>	<b>Optimal PI</b>
<b>Basamak Yanıtı</b>	Yerleşme Zamanı (%1)	0.2s	0.19s
	% Overshoot	0.4	1
	% Undershoot	-	-
	Kontrol İşareti Genliği	1.49	1.51
<b>Bozucu Etkinin de</b>	Yerleşme Zamanı (%1)	1.6	2.8
	% Overshoot	5.2	7.9
	% Undershoot	-	-
<b>Para- metre Belir- sizliği</b>	Yerleşme Zamanı (%1)	1.245s	2.72s
	% Overshoot	7.8	25.7
	% Undershoot	0.0064	0.345

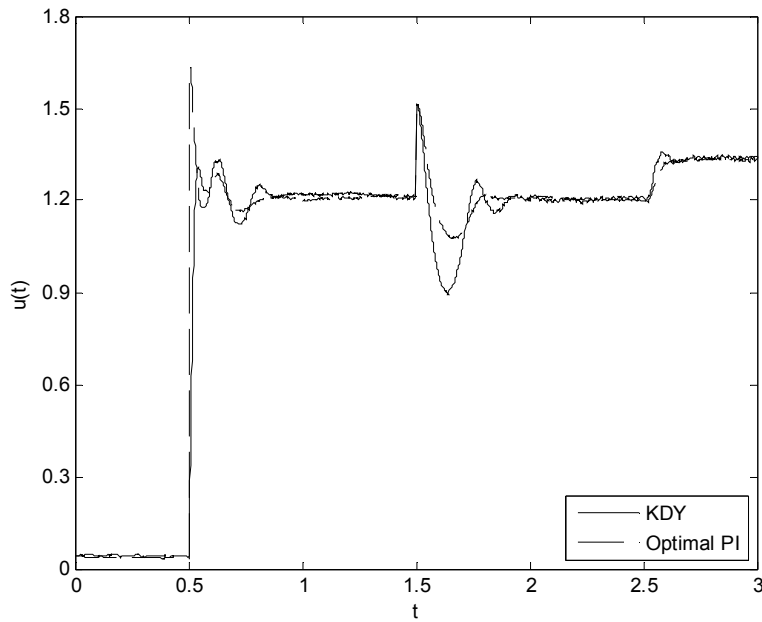
### 5.3.2 Uygulama performansı karşılaştırmaları

Kontrolcülerin uygulama performansları; basamak yanıtları, bozucuya ve yüke dayanıklılıkları açısından incelenmiştir. Şekil 5.6'da kontrol sisteminin basamak yanıtı ve 1.5s'de sisteme etkiyen 0.3 genliğindeki basamak tipi bozucuya tepkisi gösterilmektedir. Ayrıca 2.5s'de jeneratöre bağlanan  $15\Omega$  yüke karşı tepkisi de gösterilmektedir. Sistem yüklendiğinde jeneratörden  $\sim 1A$ 'lık akım çekilmeye

başlanmıştır ve yüklenmeden önce jeneratör ucunda  $\sim 19.7V$  olarak elde edilen gerilim, yüklendikten sonra  $\sim 16V$ 'a kadar düşmüştür. Şekil 5.7'de ise kontrol işaretinin değişimi gösterilmektedir. Bu şekillerdeki veriler, Çizelge 5.2'de özetlenmiştir. Çizelgeye göre, basamak iki kontrolcünün basamak yanıtları da kabul



Şekil 5.6 : Basamak yanıtı, bozucu ve yüke dayanım.



Şekil 5.7 : Uygulamadaki kontrol işaretleri.

edilebilecek düzeydedir ancak optimal PI'nın kontrol işaretinin 1.632'ye kadar çıkması, daha hassas uygulamalarda kullanıldığında sorun çıkartabileceğini gösterebilir. Bozucu sistemi etkilediğinde ve yük altında KDY kontrolcüsünün bir adım önde olduğu görülmektedir.

**Çizelge 5.2 :** Kontrolcülerin uygulama performansının karşılaştırılması.

		<b>KDY</b>	<b>Optimal PI</b>
<b>Basamak Yanıtı</b>	Yerleşme Zamanı (%2)	0.176s	0.183s
	% Overshoot	0.8	0.3
	% Undershoot	1.93	0.9
	Kontrol İşareti Genliği	1.332	1.632
<b>Bozucu Etkisinin de</b>	Yerleşme Zamanı (%2)	0.293	0.328
	% Overshoot	10.2	12.9
	% Undershoot	5.88	3.28
<b>Yük Etkisinin de</b>	Yerleşme Zamanı (%2)	0.102s	0.172s
	% Overshoot	-	-
	% Undershoot	3.54	4.78

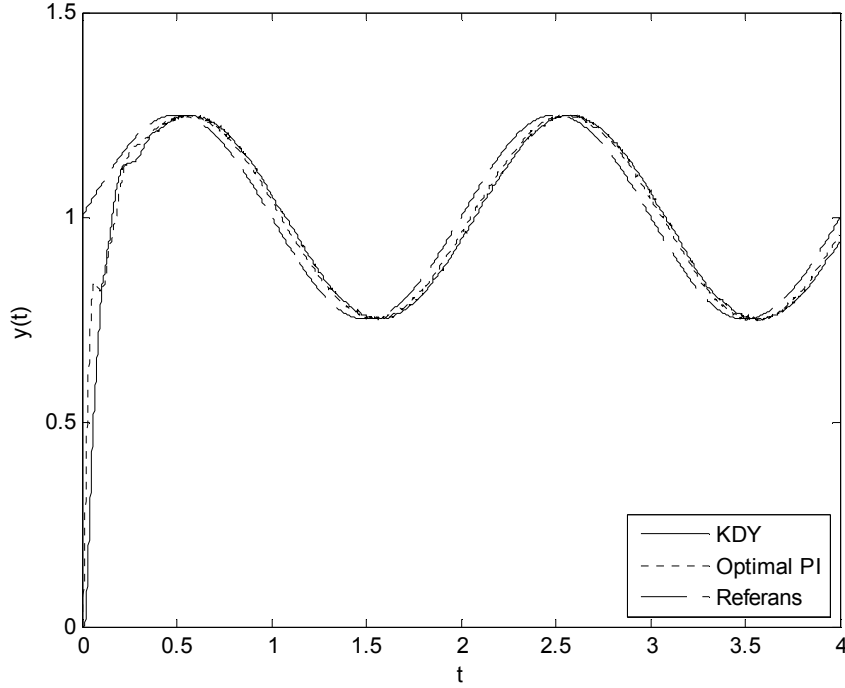
Şekil 5.8'de BLDC motorun sinüzoidal referansı takibi gösterilmiştir. İki kontrolcünün performansının da oldukça iyi olduğu görülmektedir.

#### **5.4 Konum Kontrolü Simülasyon Karşılaştırması**

Bu bölümde, KDY kontrolcüsünün ve optimal PI kontrolcüsünün performansı BLDC motorun konum kontrolü için karşılaştırılacaktır. Bu karşılaştırma, laboratuvarında konum kontrolü yapmak için yeterli teçhizat olmadığı için simülasyon üzerinden yapılacaktır. Konum, hızın integrali alınarak elde edilebilirdi ancak bu işlem de simülasyonvâri olacağı için simülasyon üzerinden karşılaştırma yapılmıştır.

Kontrol sistemin hız kontrolü için modeli (4.1)'deki gibi elde edilmişti. Bu durumda BLDC motorun konum kontrolü için modeli aşağıdaki şekilde elde edilmiştir:

$$G(s) = \frac{0.8267}{s(0.08376s + 1)} \quad (4.12)$$



Şekil 5.8 : Sinüsoidal izleme.

KDY kontrolcileri tasarlanırken, kontrolcü yapısının en az basamak tipi bozucuyu bastırarak şekilde seçilmesi gerekmektedir. Bu durumda

$$A(s) = l_2 s^2 + l_1 s \quad (4.13)$$

$$B(s) = k_2 s^2 + k_1 s + k_0 \quad (4.14)$$

şeklinde seçilmelidir. (4.12)'den

$$N(s) = 0.8267 \quad (4.15)$$

$$D(s) = 0.08376 s^2 + s \quad (4.16)$$

şeklinde elde edilir. Bu durumda kontrol sisteminin karakteristik polinomu

$$P(s) = 0.08376 l_2 s^4 + (0.08376 l_1 + l_2) s^3 + (0.8267 k_2 + l_1) s^2 + 0.8267 k_1 s + 0.8267 k_0 \quad (4.17)$$

şeklinde bulunur. Tasarım prosedürüne göre bir sonraki adım, hedef karakteristik denklemin belirlenmesidir ancak kontrol işaretini istenilen sınırlar içerisinde tutacak

bir  $\tau$  değeri bilinmemektedir. Bu  $\tau$  değerini bulabilmek için CDM Matlab Tool ile bölüm 3.3'te anlatılan şekilde kontrol işareti 1.5 değerini geçmeyecek şekilde optimizasyonu yapılır. Optimizasyon sonucunda  $\tau$  değeri  $\sim 0.8$  olarak bulunur. Bu  $\tau$  değeri için yerleşme zamanı (%1) 2s olarak bulunmuştur. Kararlılık indeksleri de Standart Manabe Formunda seçilirse hedef karakteristik polinom

$$Pd(s) = 0.00334s^4 + 0.041551s^3 + 0.25846s^2 + 0.80383s + 1 \quad (4.18)$$

şeklinde bulunur. Kapalı çevrim sistemin karakteristik polinomu ile hedef karakteristik polinom birbirine eşitlenirse kontrolcü polinomları şu şekilde elde edilir:

$$A(s) = 0.039875s^2 + 0.02s \quad (4.19)$$

$$B(s) = 0.28844s^2 + 0.97233s + 1.2096 \quad (4.20)$$

$$F(s) = 1.21 \quad (4.21)$$

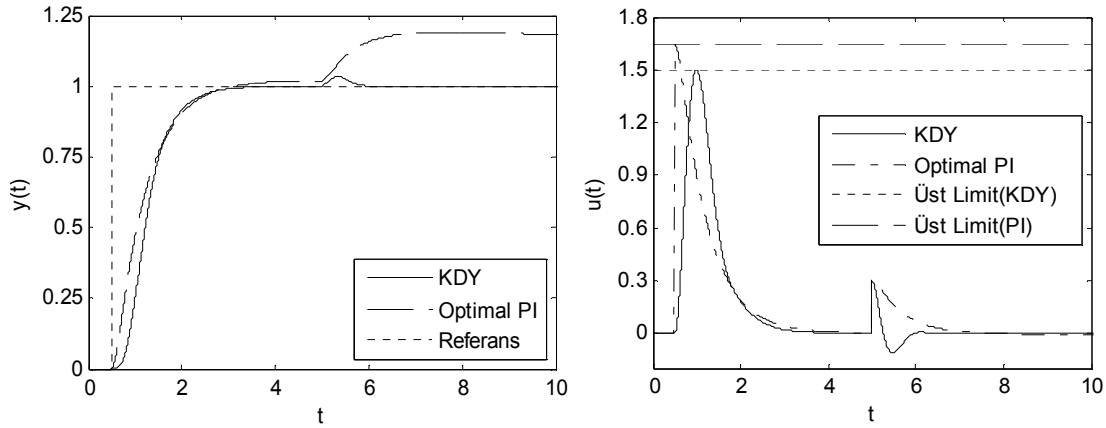
'CDM Matlab Tool'un tasarım sonu çıktılarından biri olan ve 'command window' ekranında oluşturduğu, yapılan işlemleri adım adım yazan 'summary' kısmına bakılarak da KDY kontrolcülerini elde edilebilirdi.

Optimize PI kontrolcüsü önceki bölümde olduğu gibi 'sisotool' içerisindeki optimizasyon tabanlı otomatikleştirilmiş katsayı ayarlama (automated tuning) aracı ile elde edilmiştir. Yapılan işlemler sonucunda, KDY kontrolcü ile benzer yerleşme zamanına sahip ve kontrol işareti 1.5'i geçmeyen bir PI kontrolcüsü bulunamamıştır. Bu yüzden kontrol işaretinin genliğinin değeri 1.65'e çıkarılmak zorunda kalmıştır. Bu koşullarda optimize PI kontrolcüsü (4.22)'deki gibi bulunmuştur.

$$C(s) = \frac{1.646s + 0.047}{s} \quad (4.22)$$

Bulunan bu kontrolcülerin basamak yanıtı ve bozucu tepkisi Şekil 5.9'daki gibidir. 0.5s'de basamak referansı verilmiştir ve 5s'de 0.3 genliğinde bozucu etkimiştir. Kontrolcülerin performansı Çizelge 5.3'te özetlenmiştir. Bu verilere göre KDY kontrolcüsü %2'lik yerleşme zamanına göre bir miktar daha hızlıdır. KDY kontrolcüsü aşım yapmaz ancak optimal PI az da olsa bir aşım yapar. Optimal PI kontrolcüsü %1'lik yerleşme bandına 27.5s'de girer ki bu KDY kontrolcüsünün performansına göre oldukça düşüktür. KDY kontrolcüsü basamak yanıtında birkaç basamak öndedir.

Bozucu etkidiğinde iki kontrolcü arasındaki performans farkı daha da artmaktadır. 5. saniyede etkiyen bozucunun etkisi KDY kontrolcüsü tarafından hızlı bir şekilde bertaraf edilmesine karşın, optimal PI kontrolcünün sistemi %2'lik yerleşme bandına sokması 80 saniyeden fazla vakit almaktadır. Tabii performans değerlendirilirken şu konu da göz ardı edilmemelidir: Bu örnek için, KDY kontrolcüsü 2. dereceden bir kontrolcüdür ve 2 serbestlik dereceli yapı kullanır. Buna karşılık optimal PI 1. dereceden bir kontrolcüdür ve 1 dereceli yapı kullanır.



Şekil 5.9 : Konum kontrolü için basamak yanıtı ve bozucu tepkisi.

**Çizelge 5.3 :** Konum kontrolcülerinin performans karşılaştırması.

		<b>KDY</b>	<b>Optimal PI</b>
<b>Basamak Yanıtı</b>	Yerleşme Zamanı (%2)	2.168 s	2.2 s
	Yerleşme Zamanı (%1)	2.48 s	27.5 s
	% Overshoot	0	1.9
	% Undershoot	-	-
	Kontrol İşareti Genliği	1.5	1.65
<b>Bozucu Etkisinde</b>	Yerleşme Zamanı (%2)	1.68s	81.58s
	% Overshoot	3.8	17.5
	% Undershoot	-	-
	Kontrol İşareti Genliği	1.332	1.632



## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez boyunca, KDY'nin teorik altyapısı olabildiğince incelenmiş ve KDY'nin ne gibi üstünlüklerinin olduğu ortaya çıkarılmaya çalışılmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında; kullanıcı dostu, KDY'nin etkin ve hızlı bir şekilde kullanımını sağlayan, kullanıcının kontrol sistemini çok çeşitli şekillerde analiz edebilmesine olanak tanıyan 'CDM Matlab Tool' geliştirilmiştir. Bu arayüz, KDY'nin etkin bir şekilde kullanımının yanı sıra, KDY'yi öğrenmek isteyenler için de oldukça öğretici bir araç olarak kullanılabilir.

Literatürde, KDY standart blok diyagramının uygulamada, ölçme gürültüsünü kuvvetlendireceği belirtilmiş ve eşdeğer bir blok diyagramı önerilmiştir. Bu blok diyagramının kullanımı belirtilen problemi çözmüştür ancak kontrol sisteminin, bazı tasarımlar için kararsızlığa gittiği gözlenmiştir. Bu problemi çözmek için KDY-P yöntemi önerilmiş ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

KDY'nin simülasyonlarda gösterdiği başarıyı, fiziksel uygulamalarda da gösterip göstermeyeceğini incelemek üzere BLDC motor kontrolü yapılmış ve KDY uygulamada da başarılı sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

KDY, kontrol tasarımı için oldukça etkili bir yöntem olmasına rağmen kullanımı yaygınlaşmamış bir yöntemdir. Oldukça yaygın bir şekilde PI, PID kontrolcileri kullanılmaktadır. PI ve PID kontrolcülerinin popüleritelerinin en önemli etkeni düşük mertebeden kontrolörler olmaları, tasarımlarının ve gerçeklenmelerinin basit olmasıdır ancak artık gelişen teknoloji ile birlikte kontrolcü tasarımı ve gerçekleştirilmesi olabildiğince kolaylaşmıştır. Mertebenin düşük olması iyi olacaktır ancak KDY gibi yöntemler istenilenleri sağlayacak en düşük mertebeden kontrolcüyü kullanmayı

hedefler. Dolayısıyla artık diğer kontrolörlerin kullanımından kaçınmaya gerek kalmamıştır. KDY gibi yeni nesil kontrolcülerin kullanımının artması insanlık adına yararlı olacaktır.

## KAYNAKLAR

- Avşar, S. F., ve Hamamcı, S. E.** (2011). Yüksek Hızlı Trenler için Pantograf Kontrolü. *Elektrikli Ulaşım Sistemleri Sempozyumu ve Sergisi, EUSİS*, Bursa (CD-ROM).
- Bölükbaşı, O.** (2006, Haziran). Katsayı Diyagram Yönteminin (KDY) Doğrusal Olmayan Sistemlere Uygulanması (yüksek lisans tezi). İTÜ.
- CDM CAD.** (t.y.). 05 01, 2012 tarihinde <http://www.cityfujisawa.ne.jp/~manabes/CDMCAD.htm> adresinden alındı
- Chestnut, H., ve Mayer, R. W.** (1951). Servomechanism and regulating system design. *John Wiley, vol. 1, chap. 14.*
- Hamamcı, S. E., Kaya, I., ve Köksal, M.** (2001). Improving performance for a class of processes using Coefficient Diagram Method. *MED'01 The 9th Mediterranean Conference on Control and Automation*. Dubrovnik.
- Hamamcı, S. E.** (2002). Katsayı Diyagram Metodu'nun Özel Durumlara ve ÇGÇÇ Sistemlere Uygulanması (doktora tezi). Elazığ: Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Hamamcı, S. E., Köksal, M., ve Manabe, S.** (2002). On the control of some nonliinear systems with the Coefficient Diagram Method. *ASCC'02 The 4th Asian Control Conference*. Singapore.
- Hamamcı, S. E., ve Köksal, M.** (2003). Robust controller design for TITO systems with Coefficient Diagram Method. *CCA 2003 IEEE Conference on Control Applications, Vol.2*, s. 1431 - 1436. İstanbul.
- Hamamcı, S. E.** (2004). İntegratörlü Sistemler için Katsayı Diyagram Metodu ile Kontrolör Tasarımı. *İtü Dergisi*, 3-12.
- Hara, S., ve Hori, Y.** (2000). MATLAB base system for CDM and design example of vibration suppression controller for 2-inertia system. *ASSC'2000 3rd Asian Control Conference*, (s. 2085 - 2090). Shangai.
- İmal, E.** (2009). CDM based controller design for nonlinear heat exchanger process. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 143 - 161.
- Kaşka, F.** (2008, Ocak). Ölü Zamanlı Endüstriyel Süreçler için Kontrol Sistemi Gerçekleme. (yüksek lisans tezi) İTÜ.

- Kim, S. K., Choi, Y. H., ve Kim, Y. C.** (1998). A New Performance Index. *13th Korea Automatic Control Conference, KACC'98*.
- Kim, Y., ve Manabe, S.** (2001). Introduction to Coefficient Diagram Method. *1st IFAC Symposium on System Structure and Control*. Prague, Czech.
- Kim, Y. C., Keel, L. H., ve Bhattacharyya, S. P.** (2002). Transient Response Control via Characteristic Ratio Assignment. *Proceeding of the American Control Conference, vol.2*, s. 1639 - 1646. Anchorage.
- Köksal, M., ve Hamamci, S. E.** (2004). A program for the design of linear time invariant control systems: CDMCAD. *Computer Applications in Engineering Education, v.12*, 165-174.
- Manabe, S.** (1994a). A Low-Cost Inverted Pendulum System for Control System Education. *The 3rd IFAC Symposium on Advances in Control Education*, (s. 21 - 24). Tokyo.
- Manabe, S.** (1994b). Coefficient Diagram Method as applied to the attitude control of controlled bias-momentum-satellite. *13th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace*, (s. 322 - 327). Palo Alto.
- Manabe, S.** (1998). Coefficient Diagram Method. *14th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace*, (s. 199 - 210). Seoul.
- Manabe, S.** (1999). The Sufficient Condition for Stability and Instability by Lipatov and Its Application to the Coefficient Diagram Method. *9th Workshop on Astrodynamics and Flight Mechanics, ISAS*, (s. 440 - 449). Sagami-hara.
- Manabe, S.** (2001a). Diophantine Equations in Coefficient Diagram Method. *1st IFAC Symposium on System Structure and Control*. Prague.
- Manabe, S.** (2001b). Application of Coefficient Diagram Method to Dual-Control-Surface Missile. *15th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace*, (s. 499 - 504). Bologna.
- Manabe, S.** (2002a). Brief Tutorial and Survey of Coefficient Diagram Method. *The 4th Asian Control Conference*, (s. 1161 - 1166). Singapore.
- Manabe, S.** (2002b). Application of Coefficient Diagram Method to MIMO Design in Aerospace. *15th Triennial World Congress, IFAC*. Barcelona.
- Manabe, S.** (2003). Importance of Coefficient Diagram Method. *Proceedings of the 42nd IEEE Conference on Decision and Control*, (s. 3489 - 3494). Maui.
- Manabe, S.** (2004). Comparison of H-inf and Coefficient Diagram Method in Aerospace. *16th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace*, (s. 394 - 399). Saint-Petersburg.

- Manabe, S.** (2009). Improvement of Youla Parameterization by Coefficient Diagram Method. *ICROS-SICE International Joint Conference*, (s. 3514-3519). Fukuoka.
- Manabe, S.** (2009a). *Coefficient Diagram Method for Control System Design*. Alındığı tarih: 01.05.2012, adres: <http://www.cityfujisawa.ne.jp/~manabes/CDMBook.htm>
- Manabe, S., ve Kim, Y.** (2000). Recent Development of Coefficient Diagram Method. *Proceedings of the 3rd Asian Control Conference*, (s. 2055 - 2060). Shanghai.
- Öcal, Ö., Bir, A., ve Tibken, B.** (2009). Digital Design of Coefficient Diagram Method. *American Control Conference, ACC'09*, (s. 2849 - 2854). St. Louis.
- Pang, G. K., ve Manabe, S.** (2000). Coefficient diagram method toolbox for use with MATLAB. *ASSC'2000 3rd Asian Control Conference*, (s. 2079-2084). Shanghai.
- Tanaka, Y., ve Ashikaga, M.** (1992). A low-sensitive robust control for a gas turbine. *Transaction of SICE, vol. 28*, 255 - 263.
- Yang, D. J., Kim, Y. C., ve Kim, H. S.** (2000). New target transfer function with no overshoot. *4th Asia-Pasific Conference on Control and Measurement*. Guillin.



## ÖZGEÇMİŞ

**Ad Soyad** : Selman Fatih AVŞAR

**E-Posta** : [favsars@yahoo.com](mailto:favsars@yahoo.com)

**Lisans** : İTÜ, Elektrik – Elektronik Fakültesi, Kontrol Mühendisliği Bölümü

## TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

**Avşar, S. F.** ve Söylemez, M. T. (2012). Optimizing CDM Controllers under Control Signal Constraints, *Intelligent Systems and Applications, Inista'12*, Trabzon.