T.C
DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PI VE PID KONTROLÖR TASARIMI İÇİN GENELLEŞTİRİLMİŞ KARARLILIK BÖLGELERİNİN OLUŞTURULMASI

Serdal ATİÇ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DİYARBAKIR
HAZİRAN-2018

T.C. DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ
DİYARBAKIR

Serdal ATİÇ tarafından yapılan "PI ve PID Kontrolör Tasarımı İçin Genelleştirilmiş Kararlılık Bölgelerinin Oluşturulması" konulu bu çalışma, jürimiz tarafından Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Nusret TAN

Üye : Prof. Dr. İbrahim KAYA

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Abdulnasır YILDIZ

Tez Savunma Sınavı Tarihi: 27/06/2018

Yukarıdaki bilgilerin doğruluğunu onaylarım.

.../...../.....

Doç. Dr. Sevtap SÜMER EKER

Enstitü Müdürü

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince yardımlarını ve tecrübelerini esirgemeyen değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. İbrahim KAYA'ya teşekkür ederim.

Çalışmam esnasında bana yardımcı olan ablam Selma EKİNCİ'ye ve desteklerini her zaman hissettiğim aileme teşekkür ederim.

Bu tez çalışması, Dicle Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (DÜBAP) Koordinatörlüğü tarafından MÜHENDİSLİK.16.007 proje numarası ile desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

		Sayfa
TEŞEKKÜR…….		I
İÇİNDEKİLER…….....		II
ÖZET…….....		IV
ABSTRACT…….....		V
ÇİZELGE LİSTESİ…….		VI
ŞEKİL LİSTESİ…….....		VII
KISALTMA VE SİMGELER…….		X
1.	**GİRİŞ**…….....	1
2.	**KAYNAK ÖZETLERİ**……..	5
3.	**MATERYAL VE METOT**……	9
3.1.	Zaman Gecikmeli Süreçler.....…..……...	9
3.2.	Zaman Gecikmeli Süreçler için GKSB ile PI ve PID Kontrolör Tasarımı…...…….....	10
3.2.1.	Kararlı ve Zaman Gecikmeli Süreçler için PI ve PID Kontrolör Tasarımı.....	10
3.2.1.1.	PI Kontrolör Tasarımı……..……	10
	- FOPDT Model ile Eşleşen Transfer Fonksiyonuna Sahip Bir Süreç Örneği…	15
	- Yüksek Mertebeden Transfer Fonksiyonuna Sahip Bir Süreç Örneği……..	17
	- Yüksek Mertebeden Transfer Fonksiyonuna Sahip Bir Süreç Örneği……..	19
3.2.1.2.	PID Kontrolör Tasarımı……..……..……	20
	- PID Kontrolör Tasarım Örneği……..……	24
3.2.2.	Kararsız ve Zaman Gecikmeli Süreçler için PI ve PID Kontrolör Tasarımı.....	26
3.2.2.1.	PI Kontrolör Tasarımı…….....	26
	- UFOPDT Model ile Eşleşen Transfer Fonksiyonuna Sahip Bir Süreç Örneği..	32
	- Yüksek Mertebeden Transfer Fonksiyonuna Sahip Bir Süreç Örneği……..	33
	- Yüksek Mertebeden Transfer Fonksiyonuna Sahip Bir Süreç Örneği……..	35
3.2.2.2.	PID Kontrolör Tasarımı……..……	37
	- UFOPDT Model ile Eşleşen Transfer Fonksiyonuna Sahip Bir Süreç Örneği..	41
	- Yüksek Mertebeden Transfer Fonksiyonuna Sahip Bir Süreç Örneği……..	42

- Yüksek Mertebeden Transfer Fonksiyonuna Sahip Bir Süreç Örneği…….. 45

3.2.3. İntegratör İçeren Zaman Gecikmeli Süreçler için PI ve PID Kontrolör Tasarımı ……... 46

3.2.2.1. PI Kontrolör Tasarımı…..... 46

- IFOPDT Model ile Eşleşen Transfer Fonksiyonuna Sahip Bir Süreç Örneği... 49

- Yüksek Mertebeden Transfer Fonksiyonuna Sahip Bir Süreç Örneği…….. 50

- Yüksek Mertebeden Transfer Fonksiyonuna Sahip Bir Süreç Örneği…….. 52

3.2.2.2. PID Kontrolör Tasarımı……...…… 54

- IFOPDT Model ile Eşleşen Transfer Fonksiyonuna Sahip Bir Süreç Örneği... 58

- Yüksek Mertebeden Transfer Fonksiyonuna Sahip Bir Süreç Örneği…….. 59

- Yüksek Mertebeden Transfer Fonksiyonuna Sahip Bir Süreç Örneği…….. 61

4. BULGULAR VE TARTIŞMA…….. 65

5. SONUÇ VE ÖNERİLER..... 69

6. KAYNAKLAR……..... 71

ÖZGEÇMİŞ……... 73

ÖZET

PI VE PID KONTROLÖR TASARIMI İÇİN GENELLEŞTİRİLMİŞ KARARLILIK BÖLGELERİNİN OLUŞTURULMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Serdal ATİÇ

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

2018

Bu çalışmada, endüstriyel uygulamaların büyük bir bölümünü oluşturan zaman gecikmeli süreçlerin kapalı çevrim kararlılığı için genelleştirilmiş bir kontrolör tasarım metodu sunulmuştur. Bu metot ile açık çevrim kararlı, kararsız ve integratör içeren transfer fonksiyonuna sahip süreçleri kapalı çevrim kararlı yapan tüm Oransal İntegral (PI) ve Oransal İntegral Türevsel (PID) kontrolör parametre değerlerinin belirlenmesi sağlanabilir.

Önerilen metotta, açık çevrim kararlı artı zaman gecikmeli süreçlerin birinci derece artı zaman gecikmeli (FOPDT) model transfer fonksiyonu ile modellenebileceği kabul edilmiştir. Benzer şekilde, integratörlü artı zaman gecikmeli süreçlerin integratörlü artı birinci derece artı zaman gecikmeli (IFOPDT) model transfer fonksiyonu ile modellenebileceği ve açık çevrim kararsız artı zaman gecikmeli süreçlerin ise kararsız birinci derece artı zaman gecikmeli (UFOPDT) model transfer fonksiyonu ile modellenebileceği varsayılmıştır. Kontrolörün ve süreç transfer fonksiyon modelinin normalize edilmiş formları, kapalı çevrim süreci kararlı yapan tüm PI ve PID kontrolör ayar parametrelerinin belirlenmesi için Genelleştirilmiş Kararlılık Sınırı Bölgeleri (GKSB)'nin oluşturulmasında kullanılmıştır.

Önerilen metot ile süreç transfer fonksiyonunun değişmesi ile Kararlılık Sınırı Bölgesi (KSB)'nin yeniden oluşturulması gerekliliği ortadan kaldırılmıştır. Oluşturulan GKSB'ler ile kararlı, kararsız ve integratör içeren transfer fonksiyonuna sahip süreçler için kapalı çevrim süreci kararlı yapan tüm PI ve PID kontrolör parametre değerleri belirlenebilmektedir. Gerçek süreç ile model transfer fonksiyonları arasında tam bir eşleşme olması durumunda, önerilen metot herhangi bir yaklaşıklık içermez. Ancak, gerçek süreç transfer fonksiyonu yüksek dereceden olursa önerilen metot bazı yaklaşıklıklar içerebilir. Bu durumun üstesinden gelmek için bazı öneriler sunulmuştur. Sunulan metodun kullanımının gösterilmesi amacıyla örneklere yer verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kararlılık, PI kontrolör, PID kontrolör, Transfer fonksiyonu, Zaman gecikmesi, Modelleme

ABSTRACT

PI AND PID CONTROLLER DESIGN BASED ON GENERALIZED STABILITY BOUNDARY LOCUS

MsC THESIS

Serdal ATİÇ

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
UNIVERSITY OF DICLE

2018

In this study, a generalized controller design method has been presented for closed loop stability of time delay processes that form a large part of industrial applications. Through this method, it is possible to determine all Proportional Integral (PI) and Proportional Integral Derivative (PID) controller parameter values which provide closed loop stability of the processes including open loop stable, unstable and integrator transfer functions.

In the proposed method, it is acknowledged that open loop stable plus time delay processes can be modeled by first order plus dead time (FOPDT) model transfer function. Similarly, plus time delay processes with integrator can be modeled by plus first order plus dead time (IFOPDT) with integrator model transfer function and open loop unstable plus time delay processes can be modeled by unstable first order plus dead time (UFOPDT) model transfer function. Normalized forms of the controller and the process transfer function model are used to compose the generalized stability boundary locuses for calculating all PI and PID controller setting parameters that make the closed loop process stable.

The necessity of re-forming the stability boundary locus by changing the process transfer function has been abolished with the suggested method. All PI and PID controller parameter values that make the closed loop system stable for processes including open loop stable, unstable and integrator transfer functions can be determined through the formed generalized stability boundary locus. In the event that there is an exact match between the actual system and the model transfer functions, the proposed method does not contain any approximations. On the other hand, if the actual system transfer function occurs at high level, the proposed method may contain some approximations. Some suggestions have been presented to overcome this situation. In addition, some examples have been given to display the usage of the proposed method.

Keywords: Stability, PI controller, PID controller, Transfer function, Time delay, Modelling

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge No		Sayfa
Çizelge 3.1.	Kararlılık bölgesinden seçilen bazı noktalar için hesaplanan kontrolör parametre değerleri	16
Çizelge 3.2.	Kararlılık bölgesinden seçilen bazı noktalar için hesaplanan kontrolör parametre değerleri	18
Çizelge 3.3.	Kararlılık bölgesinden seçilen bazı noktalar için hesaplanan kontrolör parametre değerleri	20
Çizelge 3.4.	Kararlılık bölgesinden seçilen bazı noktalar için hesaplanan kontrolör parametre değerleri	25
Çizelge 3.5.	Kararlılık bölgesinden seçilen bazı noktalar için hesaplanan kontrolör parametre değerleri	33
Çizelge 3.6.	Kararlılık bölgesinden seçilen bazı noktalar için hesaplanan kontrolör parametre değerleri	35
Çizelge 3.7.	Kararlılık bölgesinden seçilen bazı noktalar için hesaplanan kontrolör parametre değerleri	36
Çizelge 3.8.	Kararlılık bölgesinden seçilen bazı noktalar için hesaplanan kontrolör parametre değerleri	42
Çizelge 3.9.	Kararlılık bölgesinden seçilen bazı noktalar için hesaplanan kontrolör parametre değerleri	44
Çizelge 3.10.	Kararlılık bölgesinden seçilen bazı noktalar için hesaplanan kontrolör parametre değerleri	46
Çizelge 3.11.	Kararlılık bölgesinden seçilen bazı noktalar için hesaplanan kontrolör parametre değerleri	50
Çizelge 3.12.	Kararlılık bölgesinden seçilen bazı noktalar için hesaplanan kontrolör parametre değerleri	52
Çizelge 3.13.	Kararlılık bölgesinden seçilen bazı noktalar için hesaplanan kontrolör parametre değerleri	54
Çizelge 3.14.	Kararlılık bölgesinden seçilen bazı noktalar için hesaplanan kontrolör parametre değerleri	58
Çizelge 3.15.	Kararlılık bölgesinden seçilen bazı noktalar için hesaplanan kontrolör parametre değerleri	61
Çizelge 3.16.	Kararlılık bölgesinden seçilen bazı noktalar için hesaplanan kontrolör parametre değerleri	62

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil No		Sayfa
Şekil 3.1.	Zaman gecikmeli fiziksel bir sistem	9
Şekil 3.2.	Tek-Girişli Tek-Çıkışlı kontrol sistemi	11
Şekil 3.3.	NEZG'nin $0.25 \le \tau \le 1$ aralığındaki değerleri için KSB'ler	14
Şekil 3.4.	NEZG'nin $1.25 \le \tau \le 2$ aralığındaki değerleri için KSB'ler	14
Şekil 3.5.	NEZG'nin $2.25 \le \tau \le 4$ aralığındaki değerleri için KSB'ler	15
Şekil 3.6.	Hesaplanan PI kontrolör parametre değerleri için kapalı çevrim cevapları	16
Şekil 3.7.	Gerçek süreç ve FOPDT model transfer fonksiyonlarının KSB'leri	17
Şekil 3.8.	Hesaplanan PI kontrolör parametre değerleri için kapalı çevrim cevapları	19
Şekil 3.9.	Hesaplanan PI kontrolör parametre değerleri için kapalı çevrim cevapları	20
Şekil 3.10.	Sabit $KK_c\left(T/T_i\right)$ değerleri için $\left(KK_c, KK_c\left(T_d/T\right)\right)$ düzleminde KSB'ler	22
Şekil 3.11.	Sabit $KK_c\left(T_d/T\right)$ değerleri için $\left(KK_c, KK_c\left(T/T_i\right)\right)$ düzleminde KSB'ler	22
Şekil 3.12.	$\tau = 1$ ve $KK_c = 0.5$ için $\left(KK_c\left(T/T_i\right), KK_c\left(T_d/T\right)\right)$ düzleminde KSB'ler	23
Şekil 3.13.	Farklı NEZG değerleri ve $KK_c = 0.5$ için $\left(KK_c\left(T/T_i\right), KK_c\left(T_d/T\right)\right)$ düzleminde KSB'ler	24
Şekil 3.14.	Hesaplanan PID kontrolör parametre değerleri için kapalı çevrim cevapları	25
Şekil 3.15.	NEZG'nin $0.025 \le \tau \le 0.075$ aralığındaki değerleri için KSB'ler	27
Şekil 3.16.	NEZG'nin $0.1 \le \tau \le 0.175$ aralığındaki değerleri için KSB'ler	28
Şekil 3.17.	NEZG'nin $0.2 \le \tau \le 0.275$ aralığındaki değerleri için KSB'ler	28
Şekil 3.18.	NEZG'nin $0.3 \le \tau \le 0.375$ aralığındaki değerleri için KSB'ler	29
Şekil 3.19.	NEZG'nin $0.4 \le \tau \le 0.475$ aralığındaki değerleri için KSB'ler	29
Şekil 3.20.	NEZG'nin $0.5 \le \tau \le 0.575$ aralığındaki değerleri için KSB'ler	30
Şekil 3.21.	NEZG'nin $0.6 \le \tau \le 0.675$ aralığındaki değerleri için KSB'ler	30
Şekil 3.22.	NEZG'nin $0.7 \le \tau \le 0.775$ aralığındaki değerleri için KSB'ler	31

Şekil 3.23. NEZG'nin $0.8 \le \tau \le 0.875$ aralığındaki değerleri için KSB'ler 31

Şekil 3.24. NEZG'nin $0.9 \le \tau \le 0.975$ aralığındaki değerleri için KSB'ler 32

Şekil 3.25. Hesaplanan PI kontrolör parametre değerleri için kapalı çevrim cevapları 33

Şekil 3.26. Gerçek süreç ve UFOPDT model transfer fonksiyonlarının KSB'leri 34

Şekil 3.27. Hesaplanan PI kontrolör parametre değerleri için kapalı çevrim cevapları 35

Şekil 3.28. Hesaplanan PI kontrolör parametre değerleri için kapalı çevrim cevapları 36

Şekil 3.29. Sabit $KK_c(T_d/T)$ değerleri için $(KK_c, KK_c(T/T_i))$ düzleminde KSB'ler 38

Şekil 3.30. Sabit $KK_c(T/T_i)$ değerleri için $(KK_c, KK_c(T_d/T))$ düzleminde KSB'ler 38

Şekil 3.31. $KK_c = 1.5$ ve $\tau = 0.5$ için $(KK_c(T/T_i), KK_c(T_d/T))$ düzleminde KSB'ler 39

Şekil 3.32. Farklı NEZG değerleri ve $KK_c = 1.5$ için $(KK_c(T/T_i), KK_c(T_d/T))$ düzleminde KSB'ler 40

Şekil 3.33. Farklı NEZG değerleri ve $KK_c = 1.5$ için $(KK_c(T/T_i), KK_c(T_d/T))$ düzleminde KSB'ler 40

Şekil 3.34. Farklı NEZG değerleri ve $KK_c = 1.5$ için $(KK_c(T/T_i), KK_c(T_d/T))$ düzleminde KSB'ler 41

Şekil 3.35. Hesaplanan PID kontrolör parametre değerleri için kapalı çevrim cevapları 42

Şekil 3.36. Gerçek süreç ve UFOPDT model transfer fonksiyonlarının KSB'leri 43

Şekil 3.37. Gerçek süreç ve NEZG değeri $\tau = 0.64$ için oluşturulan KSB'ler 44

Şekil 3.38. Hesaplanan PID kontrolör parametre değerleri için kapalı çevrim cevapları 45

Şekil 3.39. Hesaplanan PID kontrolör parametre değerleri için kapalı çevrim cevapları 46

Şekil 3.40. NEZG'nin $0.25 \le \tau \le 1$ aralığındaki değerleri için KSB'ler 48

Şekil 3.41. NEZG'nin $1.25 \le \tau \le 2$ aralığındaki değerleri için KSB'ler 48

Şekil 3.42. NEZG'nin $2.25 \le \tau \le 4$ aralığındaki değerleri için KSB'ler 49

Şekil 3.43. Hesaplanan PI kontrolör parametre değerleri için kapalı çevrim cevapları 50

Şekil 3.44. Gerçek süreç ve IFOPDT model transfer fonksiyonlarının KSB'leri 51

Şekil 3.45. Hesaplanan PI kontrolör parametre değerleri için kapalı çevrim cevapları 52

Şekil 3.46. Gerçek süreç ve IFOPDT model transfer fonksiyonlarının KSB'leri 53

Şekil 3.47. Hesaplanan PI kontrolör parametre değerleri için kapalı çevrim cevapları 54

Şekil 3.48. Sabit KK_cT_d değerleri için $\left(KK_cT, KK_c\left(T^2/T_i\right)\right)$ düzleminde KSB'ler 55

Şekil 3.49. Sabit $KK_c\left(T^2/T_i\right)$ değerleri için $\left(KK_cT, KK_cT_d\right)$ düzleminde KSB'ler 56

Şekil 3.50. $KK_cT=1$ ve $\tau=1$ için $\left(KK_c\left(T^2/T_i\right), KK_cT_d\right)$ düzleminde KSB'ler 57

Şekil 3.51. NEZG'nin farklı değerleri ve $KK_cT=1$ için $\left(KK_c\left(T^2/T_i\right), KK_cT_d\right)$ düzleminde KSB'ler 57

Şekil 3.52. Hesaplanan PID kontrolör parametre değerleri için kapalı çevrim cevapları 59

Şekil 3.53. Gerçek süreç ve IFOPDT model transfer fonksiyonlarının KSB'leri 60

Şekil 3.54. Hesaplanan PID kontrolör parametre değerleri için kapalı çevrim cevapları 61

Şekil 3.55. Hesaplanan PID kontrolör parametre değerleri için kapalı çevrim cevapları 63

KISALTMA VE SİMGELER

PID : Proportional Integral Derivative

PI : Proportional Integral

FOPDT : First Order Plus Dead Time

IFOPDT : Integrating First Order Plus Dead Time

UFOPDT : Unstable First Order Plus Dead Time

KSB : Kararlılık Sınırı Bölgesi

GKSB : Genelleştirilmiş Kararlılık Sınırı Bölgeleri

NEZG : Normalize Edilmiş Zaman Gecikmesi

IMC : Internal Model Control

ÇGÇÇ : Çok-Girişli Çok-Çıkışlı

SOPDT : Second Order Plus Dead Time

T_d : Fiziksel Sistem için Zaman Gecikmesi

d : Fiziksel Sistem için Karışımın Yapıldığı Yer ile Ölçüm Noktası Arası Uzaklık

v : Fiziksel Sistem için Karışımın Düzenek İçerisindeki Hızı

$y(t)$: Fiziksel Sistem için Karışım Noktasındaki Yoğunluk

$b(t)$: Fiziksel Sistem için Ölçülen Büyüklük

$C(s)$: Denetleyici Transfer Fonksiyonu

$G(s)$: Süreç Transfer Fonksiyonu

$C(\bar{s})$: Normalize Edilmiş Denetleyici Transfer Fonksiyonu

$G(\bar{s})$: Normalize Edilmiş Süreç Transfer Fonksiyonu

$\Delta(\bar{s})$: Normalize Edilmiş Denetleyici ve Süreç Transfer Fonksiyonları ile Elde Edilen Kapalı Çevrim Sürecin Karakteristik Denklemi

K : Kazanç

T : Zaman Sabiti

θ : Zaman Gecikmesi

τ : Normalize Edilmiş Zaman Gecikmesi

K_c : Denetleyici Kazancı

T_i : İntegral Zaman Sabiti

T_d : Türevsel Zaman Sabiti

ω : Frekans

ω_c : Kritik Frekans

1. GİRİŞ

Endüstriyel kontrol sistemlerinde çoğunlukla kullanılan PID kontrolörlerin parametre değerlerinin belirlenmesi konusuna, araştırmacılar tarafından geçmişten bu yana ilgi duyulmuştur. PID kontrolörler basit ve güçlü yapıları ile endüstriyel süreçlerin büyük bölümünde kullanılmaktadır. PI kontrolörlerin kullanım alanlarının da oldukça yaygın olmasına karşın, türevsel kontrolörler daha az kullanılmaktadır. Bundan dolayı kontrol sistemlerinin kararlılığı için PI ve PID kontrolör tasarımının önemi oldukça büyüktür (Aström ve Hägglund 2001). Ziegler ve Nichols (1942), Cohen ve Coon (1953) ve Aström ve Hägglund (1984) metotları, kontrol sistemlerinin kararlılığı için PID kontrolör parametrelerinin belirlenmesi ile ilgili en yaygın kullanılan metotlar olarak sayılabilir. Bununla birlikte integral performans kriterine dayalı kontrolör tasarım metotları da yaygın kullanılan yaklaşımlardandır (Zhuang ve Atherton 1993). PID kontrolör parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan diğer metotlar da Dâhili Model Kontrol (IMC) (Morari ve Zafiriou 1989) ve denetleyici sentezi (Smith ve Corripio 1997) metotlarıdır. Ho ve ark. (1996, 1997a, 1997b, 1997c) tarafından yapılan çalışmalar ile herhangi bir kontrol sistemini kararlı yapan tüm PI ve PID kontrolör parametrelerinin belirlenmesi konusu büyük bir ilgi oluşturmuştur. Bu çalışmalar sayesinde sabit bir oransal kazanç değeri için tüm integral ve türevsel kazanç değerlerinin bir düzlemde gösterilmesi sağlanmıştır. Bu metot ile kontrolör kazancının geniş kapsamlı taranması gerektiğinden, metodun uygulanacağı kontrol sisteminin kararlılığı için tüm PI ve PID kontrolör parametre değerlerinin belirlenmesi zaman almaktadır. Munro ve Söylemez (2000) ve Söylemez ve ark. (2003) tarafından önerilen metot ile bir kontrol sisteminin kararlılığı için tüm PID kontrolör parametre değerlerinin hızlı bir şekilde hesaplanması sağlanmıştır. Shafiei ve Shenton (1997) ve Huang ve Wang (2000) yaptıkları çalışmalar ile bir kontrol sistemini kararlı yapacak tüm kontrolör parametre değerlerinin belirlenmesi amacıyla grafiksel çözümler ortaya koymuşlardır. Sonraki yıllarda Tan ve ark. (2003) ve Tan (2005) tarafından yapılan çalışmalar ile kontrol sistemlerinin kararlılığı için tüm PI veya PID kontrolör parametre değerlerinin belirlenmesinde, KSB oluşturulmasına dayalı yeni ve hızlı bir yaklaşım geliştirilmiştir. Bu yaklaşım günümüze değin farklı çalışmalarda kullanılmıştır. Zàvackà ve ark. (2013) tarafından yapılan, sürekli karıştırılan bir tank reaktörü için güçlü PI denetleyici tasarımı, Sandeep ve Yogesh (2014) tarafından yapılan KSB kullanılarak

ters sarkaç sistemi için PID denetleyici tasarımı ve Deniz ve ark. (2014) tarafından yapılan bir PI denetleyici kullanılarak Smith öngörücü yapılarında kararlılık bölgesi analizi yaklaşımın kullanıldığı çalışmalardandır.

Kontrol sistemlerinin kararlılığı için PI ve PID kontrolör parametre değerlerinin belirlenmesi ile ilgili bu çalışmalardaki dezavantaj; süreç transfer fonksiyonu değiştikçe, KSB'nin yeniden çizilmesine gerek duyulmasıdır.

Bu tez çalışmasında; açık çevrim kararlı, kararsız ve integratörlü transfer fonksiyonuna sahip süreçleri kapalı çevrim kararlı yapacak tüm PI ve PID kontrolör parametre değerlerinin belirlenmesinde yeni bir metot önerilmiştir. Bu metotta; açık çevrim kararlı artı zaman gecikmeli transfer fonksiyonuna sahip süreçler için, yüksek mertebeden süreç transfer fonksiyonlarının modellenmesi ile elde edilecek, FOPDT süreç transfer fonksiyon modelleri kullanılmaktadır. Benzer şekilde açık çevrim integratörlü artı zaman gecikmeli transfer fonksiyonuna sahip süreçler için; IFOPDT süreç transfer fonksiyon modelleri ve açık çevrim kararsız artı zaman gecikmeli süreçler için de UFOPDT süreç transfer fonksiyon modelleri kullanılmaktadır. Bu amaçla; FOPDT model, IFOPDT model ve UFOPDT model transfer fonksiyon parametrelerinin belirlenmesi için röle geri beslemeli tanımlama metodu kullanılmıştır (Kaya ve Atherton 2001). Bu tanımlama metodu, bozucuların ve ölçüm hatasının olmadığı varsayımı yapılırsa, kesin kestirim sonuçları vermektedir. Kontrolörün ve süreç transfer fonksiyon modelinin normalize edilmiş formları PI ve PID kontrolör tasarımı için GKSB'lerin oluşturulmasında kullanılmıştır. Oluşturulan bu GKSB'ler açık çevrim kararlı, kararsız ve integratör içeren transfer fonksiyonuna sahip süreçleri kapalı çevrim kararlı yapacak tüm PI ve PID kontrolör parametrelerinin belirlenmesinde kullanılabilmektedir. Böylelikle süreç transfer fonksiyonu değiştikçe KSB'nin tekrar oluşturulması gerekliliği ortadan kaldırılmıştır. Bu sayede; açık çevrim kararlı, kararsız ve integratör içeren transfer fonksiyonuna sahip süreçleri kapalı çevrim kararlı yapacak tüm PI ve PID kontrolör parametre değerlerinin belirlenmesi kolaylaşmaktadır.

Bu tez altı bölümden oluşmaktadır. Giriş bölümünü izleyen ikinci bölümde, PI ve PID denetleyici tasarımı ile ilgili yapılan literatür araştırması sonucunda elde edilen bilgilere yer verilmiştir.

Üçüncü bölümde, zaman gecikmeli sistemler anlatılmış ve tez çalışmasında

uygulanacak olan PI ve PID denetleyici tasarım metodu açıklanmıştır. Bu amaçla gerek metodun uygulanışı gerekse de örneklerle açıklanışı esnasında Matlab yazılımı kullanılmıştır.

Dördüncü bölümde, verilen örneklere ait sonuçlara yer verilmiş olup tez çalışmasında sunulan metodun sağladığı avantajlardan söz edilmiştir.

Beşinci bölümde, yapılan tez çalışmasına ait sonuçlara yer verilmiş ve önerilerde bulunulmuştur.

Altıncı bölümde ise tez içerisinde atıfta bulunulan kaynaklara yer verilmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Bu bölümde, PI ve PID kontrolör tasarımı konusunda yapılan literatür araştırması sonucunda, faydalanılan kaynaklar hakkında bilgiler verilmiştir.

Ziegler ve Nichols (1942)'ün çalışması ile kontrolör ayar parametrelerinin, denetlenecek sürecin gecikme ve birim cevap hızının deneysel olarak elde edilmiş veya hesaplanmış değerleri ile belirlenmesini sağlayan formüller verilmiştir. Böylelikle, kontrolörü tasarlamak için hızlı bir yöntemin temeli oluşturulmuştur.

Cohen ve Coon (1953) tarafından yapılan çalışma Ziegler ve Nichols (1942) tarafından yapılan çalışmaya göre daha çeşitli süreçlere uygulanabilir olmasıyla avantaj sağlamaktadır. Cohen ve Coon (1953) metodunda sürecin; zaman gecikmesi, zaman sabiti ve süreç kazancı karakteristikleri kullanılmıştır.

Åström ve Hägglund (1984)'ın yaptığı çalışmada ise basit bir röle deneyi ile sürecin Nyquist eğrisinden bir nokta tanımlanır. Röle, sürecin küçük ve kontrollü bir genlikle salınım yapmasını sağlar. Yöntem, röle üzerinde tanımlanan bu noktanın başka bir noktaya taşınması esasına dayalıdır.

Morrari ve Zafiriou (1989)'un kitabında kontrol teorisinin gelişimi, Tek-Girişli Tek-Çıkışlı (TGTÇ) ve Çok-Girişli Çok-Çıkışlı (ÇGÇÇ) geri beslemeli kontrol, kararlı süreçler için TGTÇ IMC yapısı ve tasarımı, kararsız süreçler için TGTÇ IMC tasarımı ve ÇGÇÇ IMC tasarımı gibi konular işlenmiştir.

Zhaung ve Atherton (1993) tarafından yapılan çalışma ile endüstriyel sistemlerde yaygın bir yaklaşım olan FOPDT model süreçler için, formüller oluşturulması vasıtasıyla PID kontrolör parametrelerinin belirlenmesi sağlanmıştır.

Smith ve Carripio (1997)'nin kitabında kontrol sislerinin analizi için matematiksel teoremler, birinci mertebeden ve yüksek mertebeden süreçlerin analizi, denetim sistemlerinin temel bileşenleri, kapalı çevrim kontrol sistemlerinin tasarımı, Root Locus diyagramlarının çizim kuralları, kaskat kontrol ayarları ve uygulamaları ve bilgisayar kontrol sistemlerinin tasarımı gibi konular işlenmiştir.

Ho ve ark. (1996, 1997a, 1997b, 1997c)'nın yaptığı çalışmalar ile sabit bir oransal kazanç değeri için tüm integral ve türevsel kazanç değerlerinin bir düzlemde gösterilmesi sağlanmıştır. Bu amaçla Hermite Biehler teoreminin genelleştirilmiş bir

versiyonu verilmiştir. Önerilen yaklaşımda, kontrolör kazancının geniş kapsamlı taranması gerektiğinden, yöntemin uygulanacağı kontrol sisteminin kararlılığı için tüm PI ve PID kontrolör parametre değerlerinin belirlenmesi zaman almaktadır.

Shafiei ve Shenton (1997) tarafından yapılan çalışmada, doğrusal zamanla değişmeyen TGTÇ süreçler için PID kontrolör parametrelerinin ayarlanması amacıyla yeni bir yaklaşım geliştirilmiştir. Bu yöntemde minimum kazanç ve faz payı gereksinimleri mevcuttur. Yöntemin kararlı veya kararsız transfer fonksiyonuna sahip süreçlere uygulanabilir olmasının yanı sıra önemli zaman gecikmesine sahip süreçlere de uygulanabilir olması önceki çalışmalara göre sunduğu avantajlardandır.

Huang ve Wang (2000)'nın yaptığı çalışma ile sistematik ve grafiksel yolla bir kontrolör tasarım yöntemi verilmiştir. Yöntemde, oluşturulan Kharitonov bölgesinden alınan kontrolör parametre değerleri kararsız transfer fonksiyonuna sahip bir sürecin kararlılığı için kullanılabilir. Böylelikle yöntem ile kararsız bir süreç için tüm PID kontrolör parametrelerinin belirlenmesi sağlanabilir.

Munro ve Söylemez (2000) ve Söylemez ve ark. (2003)'nın çalışması ile TGTÇ bir süreci kararlı yapacak tüm PID kontrolör parametre değerlerinin belirlenmesi için yeni ve hızlı bir yaklaşım verilmiştir.

Aström ve Hägglund (2001) tarafından yapılan çalışmada genel olarak PID kontrolör tasarımı ile ilgili yapılmış olan çalışmalar anlatılmış ve PID kontrolörlerin geniş kullanım alanları olduğuna değinilmiştir. Ayrıca PID kontrolörlerin gelecekteki durumuna dair öngörülerde bulunulmuştur. Çalışmada, özelikle PID denetimin kararlılığı, tasarımı ve performansı üzerinde durulmuştur.

Tan ve ark. (2003) ve Tan (2005)'nın yaptığı çalışmalarda bir süreci kararlı yapacak tüm PI veya PID kontrolör parametre değerlerinin belirlenmesinde, KSB oluşturulmasına dayalı yeni ve hızlı bir yöntem verilmiştir.

Zàvackà ve ark. (2013) tarafından yapılan çalışmada, sürekli karıştırılan bir tank reaktörü için KSB ile güçlü bir PI kontrolör tasarım yöntemi verilmiştir.

Sandeep ve Yogesh (2014)'in çalışması ile KSB kullanılarak ters sarkaç sistemi için PID kontrolör tasarımı açıklanmıştır.

Deniz ve ark. (2014) tarafından yapılan çalışma ile bir PI kontrolör kullanılarak Smith öngörücü yapılarının kararlılığı konusu ele alınmıştır. Bu amaçla gerçek sistem ile FOPDT model ve ikinci dereceden artı zaman gecikmeli (SOPDT) model transfer fonksiyonları için elde edilen KSB'lerin, kusursuz eşleştiği ve hatalı eşleştiği durumlar göz önünde bulundurulmuştur. Burada amaç, Smith öngörücü yapıları için tüm PI kontrolör parametre değerlerini belirlemek ve mükemmel uyumlu ve uyumsuz modeller için kararlılık bölgelerini karşılaştırmaktır.

Zhong (2006)'un kitabında zaman gecikmeli sistemlerin denetimi, PID kontrolör yapısı, PID kontrolör tasarım metotları, zaman gecikmesi sebebiyle denetim zorlukları ve Smith öngörücüsü tabanlı denetim gibi konular işlenmiştir.

Kuo (2016)'nun kitabında bir denetim sisteminin temel öğeleri, geri beslemeli denetim sistemi türleri, fiziksel sistemlerinin matematiksel modellenmesi, doğrusal denetim sistemlerinin kararlılığı ve ayrık verili denetim sistemlerinin tasarımı gibi konular işlenmiştir.

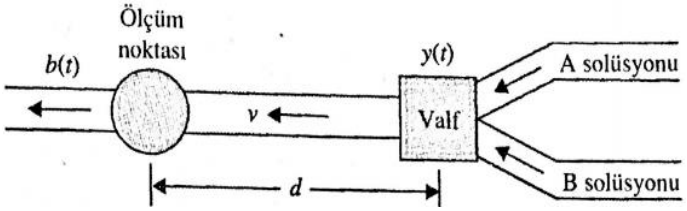
Kaya ve Atherton (1999)'nun çalışmasında, zaman gecikmeli kararlı ya da kararsız birinci derece artı zaman gecikmeli ve ikinci derece artı zaman gecikmeli süreç transfer fonksiyonlarının; parametrelerinin, röle kontrollü geri besleme döngüsünde tek bir asimetrik limit çevrimin; parametrelerinin ölçümlerinden, ölçüm hatasının olmadığı kabul edilerek tam olarak nasıl bulunacağı gösterilmiştir.

3. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde, zaman gecikmeli sistemler anlatılmış olup zaman gecikmeli açık çevrim kararlı, kararsız ve integratör içeren süreçler için GKSB ile PI ve PID kontrolör tasarımı verilmiştir. Ayrıca sunulan metodun kullanımını göstermek amacıyla örneklere yer verilmiştir.

3.1. Zaman Gecikmeli Sistemler

Zaman gecikmeli sistemler, giriş işaretine belirli bir zaman geçmeden cevap veremeyen sistemlerdir. Zaman gecikmesi olmayan süreçlerin transfer fonksiyonları polinomların oranı şeklinde ifade edilebilir. Bilgisayarlar, sayısal işlemleri yerine getirmek amacıyla zamana ihtiyaç duyduklarından bilgisayar kontrollü sistemlerde zaman gecikmesi bulunur. Ayrıca uygulamada çeşitli hidrolik, pnömatik ya da mekanik iletim sistemlerinde zaman gecikmesi ile karşılaşılır. Şekil 3.1.'de iletim gecikmeli ya da zaman gecikmeli bir sistem örneği verilmiştir.



Şekil 3.1. Zaman gecikmeli fiziksel bir sistem

Şekil 3.1.'de iki farklı sıvının belirli oranlarda karıştırılmasına ait düzen görülmektedir. Ölçüm işlemi karışımın homojenliğini sağlamak için sıvıların karıştığı noktanın ilerisindeki bir noktada yapılmıştır. Bu sebeple karışımın yapıldığı yerle yoğunluğun belirlendiği nokta arasında bir zaman gecikmesi mevcuttur. Eğer karışımın yapıldığı yer ile ölçüm noktası arasındaki uzaklık d ise ve karışım düzenek içerisinde v hızıyla hareket ediyor ise, zaman gecikmesi aşağıda verilen (3.1) eşitliği ile hesaplanır.

$$T_d = \frac{d}{v} \tag{3.1}$$

Eğer karışım noktasında yoğunluğun $y(t)$ olduğu ve bu değerin T_d süresi sonunda izleme noktasında değişmeden türetildiği varsayımı yapılırsa ölçülen büyüklük aşağıda verilen (3.2) eşitliği ile ifade edilir.

$$b(t) = y(t - T_d) \tag{3.2}$$

(3.2) ile verilen denkleme Laplace dönüşümü uygulanırsa aşağıda (3.3) ile verilen eşitlik elde edilir:

$$B(s) = e^{-T_d s} Y(s) \tag{3.3}$$

Dolayısıyla $b(t)$ ve $y(t)$ arasındaki transfer fonksiyonu aşağıda (3.4) eşitliği ile verilir (Kuo 2016).

$$\frac{B(s)}{Y(s)} = e^{-T_d s} \tag{3.4}$$

Endüstriyel uygulamaların büyük bir bölümü, yapısında zaman gecikmesi bulunan süreçlerden oluşur. Zaman gecikmesi, sistemin özünden kaynaklanabileceği gibi sistem çıkışlarının işlenip girişte yeniden kullanılması veya giriş-çıkış işaretlerinin senkron olarak ölçülememesi sebebiyle de meydana gelebilmektedir. Zaman gecikmesi, sürecin kararlılığı ile geçici hal karakteristiğini bozucu bir etkiye sebep olmaktadır (Zhong 2006).

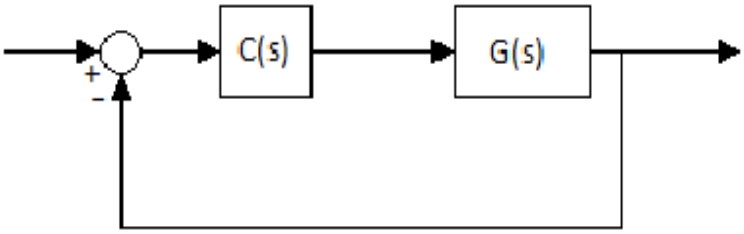
3.2. Zaman Gecikmeli Süreçler için GKSB ile PI ve PID Kontrolör Tasarımı

Bu bölümde; açık çevrim kararlı, kararsız ve integratör içeren transfer fonksiyonlarına sahip zaman gecikmeli süreçler için GKSB ile PI ve PID kontrolör tasarımı verilmiştir.

3.2.1 Kararlı ve Zaman Gecikmeli Süreçler için PI ve PID Kontrolör Tasarımı

3.2.1.1 PI Kontrolör Tasarımı

Bu kısımda Tan ve ark. (2003) ve Tan (2005)'ın önerdikleri metotta verilen prosedür kullanılarak açık çevrim kararlı artı zaman gecikmeli transfer fonksiyonuna sahip süreçler için genelleştirilmiş kararlılık bölgeleri ile kapalı çevrim süreci kararlı yapan tüm PI kontrolör parametre değerlerinin belirlenmesi açıklanmıştır. Şekil 3.2.'de TGTÇ kontrol sistemi gösterilmiştir.



Şekil 3.2. TGTÇ kontrol sistemi

Şekil 3.2.'de $C(s)$ ve $G(s)$ sırasıyla kontrolör ve süreç transfer fonksiyonlarını ifade etmektedir. İdeal PI kontrolör için transfer fonksiyonu aşağıda verilmiştir:

$$C(s) = K_c\left(1+\frac{1}{T_i s}\right). \tag{3.5}$$

Açık çevrim süreç transfer fonksiyonunun FOPDT modeli aşağıda verilmiştir:

$$G(s) = \frac{Ke^{-\theta s}}{Ts+1}. \tag{3.6}$$

(3.5) ve (3.6) denklemlerinde $Ts = \bar{s}$ dönüşümü kullanılırsa aşağıda verilen normalize edilmiş kontrolör ve süreç transfer fonksiyonları elde edilir.

$$C(\bar{s}) = K_c\left(1+T/T_i\bar{s}\right) \tag{3.7}$$

$$G(\bar{s}) = \frac{Ke^{-\frac{\theta}{T}\bar{s}}}{\bar{s}+1} = \frac{Ke^{-\tau\bar{s}}}{\bar{s}+1} \tag{3.8}$$

Buradaki amaç Şekil 3.2.'deki kontrol sistemini kararlılığı için, (3.1) denklemi ile verilen kontrolör parametre değerlerini hesaplamaktır. Sürecin kapalı çevrim karakteristik denklemi $1+C(\bar{s})G(\bar{s})$'dir. (3.7) ve (3.8) denklemleri ile verilen normalize edilmiş kontrolör, $C(\bar{s})$ ve FOPDT model, $G(\bar{s})$ transfer fonksiyonları, karakteristik denklemde yerlerine yazılarak aşağıda verilen karakteristik denklem elde edilir.

$$\Delta(\bar{s}) = KK_cT_i\bar{s}e^{-\tau\bar{s}} + KK_cTe^{-\tau\bar{s}} + T_i\bar{s}^2 + T_i\bar{s} \tag{3.9}$$

(3.8) denklemi ile verilen FOPDT model transfer fonksiyonunun, pay ve paydasının tek ve çift kısımları ayrıştırılırsa ve $\bar{s} = j\bar{\omega}$ dönüşümü uygulanırsa aşağıda verilen denklem elde edilir.

$$G(j\bar{\omega}) = \frac{N_e(-\bar{\omega}^2) + j\bar{\omega}N_o(-\bar{\omega}^2)}{D_e(-\bar{\omega}^2) + j\bar{\omega}D_o(-\bar{\omega}^2)} \tag{3.10}$$

Denklemlerde karmaşıklığı önlemek için, ω üzerindeki çizgi düşürülürse, kapalı çevrim sürecin karakteristik denklemi aşağıda verilen denklem gibi elde edilebilir:

$$\begin{aligned}\Delta(j\omega) &= j\omega KK_c T_i \cos(\omega\tau) \\ &+ \omega KK_c T_i \sin(\omega\tau) + KK_c T \cos(\omega\tau) \\ &- jKK_c T \sin(\omega\tau) - \omega^2 T_i + j\omega T_i \\ &= R_\Delta + jI_\Delta = 0.\end{aligned} \tag{3.11}$$

Karakteristik denklemin reel ve sanal kısımlarının sıfıra eşitlenmesiyle aşağıda verilen (3.12) ve (3.13) denklemleri elde edilir.

$$KK_c\left[\omega\sin(\omega\tau)\right] + \frac{KK_c T}{T_i}\left[\cos(\omega\tau)\right] = \omega^2 \tag{3.12}$$

$$KK_c\left[\omega\cos(\omega\tau)\right] + \frac{KK_c T}{T_i}\left[-\sin(\omega\tau)\right] = -\omega \tag{3.13}$$

Aşağıda verilen (3.14) ve (3.15) denklemleri tanımlanırsa,

$$\begin{aligned} Q(\omega) &= \omega\sin(\omega\tau) \\ R(\omega) &= \cos(\omega\tau) \\ X(\omega) &= \omega^2 \\ S(\omega) &= \omega\cos(\omega\tau) \\ U(\omega) &= -\sin(\omega\tau) \\ Y(\omega) &= -\omega \end{aligned} \tag{3.14}$$

(3.15)

(3.12) ve (3.13) ile verilen denklemler aşağıdaki gibi tekrar düzenlenebilir:

$$KK_c Q(\omega) + KK_c \frac{T}{T_i} R(\omega) = X(\omega).$$

$$KK_c S(\omega) + KK_c \frac{T}{T_i} U(\omega) = Y(\omega). \tag{3.16}$$

(3.16) ile verilen denklemler KK_c ve $KK_c T / T_i$ için çözülürse aşağıda verilen (3.17) ve (3.18) denklemleri elde edilir.

$$KK_c = \frac{X(\omega)U(\omega) - Y(\omega)R(\omega)}{Q(\omega)U(\omega) - R(\omega)S(\omega)} \tag{3.17}$$

$$KK_c \frac{T}{T_i} = \frac{Y(\omega)Q(\omega) - X(\omega)S(\omega)}{Q(\omega)U(\omega) - R(\omega)S(\omega)} \tag{3.18}$$

(3.14) ve (3.15) ile verilen tanımlamalar (3.17) ve (3.18) ile verilen denklemlerde yerine yazılarak aşağıda verilen denklemlere ulaşılabilir.

$$KK_c = \omega\sin(\omega\tau) - \cos(\omega\tau) \tag{3.19}$$

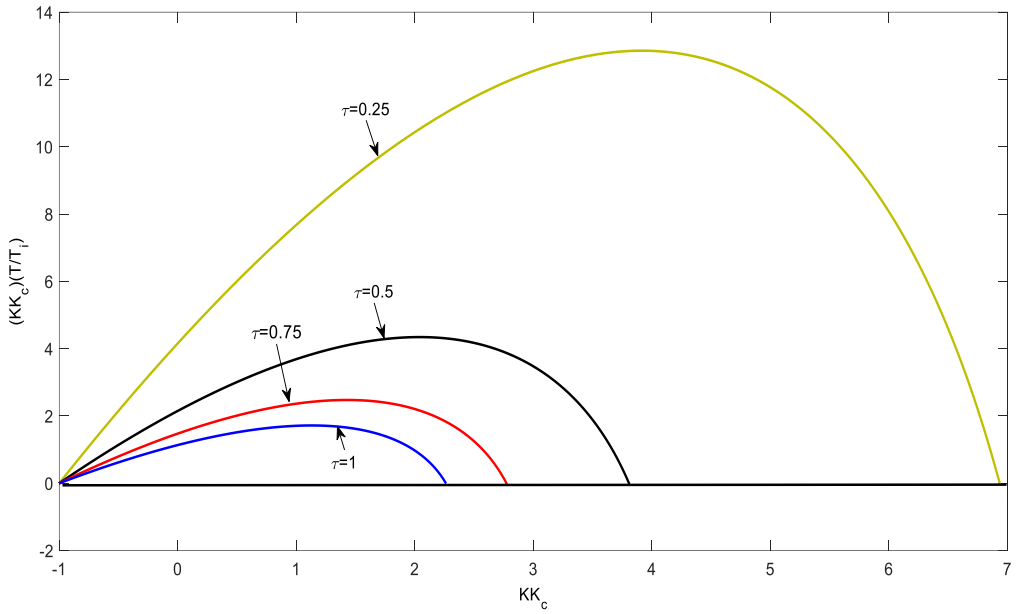
$$KK_c \frac{T}{T_i} = \omega \sin(\omega\tau) + \omega^2 \cos(\omega\tau) \tag{3.20}$$

(3.19) ve (3.20) eşitlikleri kullanılarak belirlenen Normalize Edilmiş Zaman Gecikmesi (NEZG) değeri, $\tau = \theta / T$, için $(KK_c, KK_c(T/T_i))$ düzleminde kararlılık bölgeleri oluşturulabilir. Bu iki denklemin sağladığı avantaj ile süreç transfer fonksiyonunun değişmesiyle KSB'nin yeniden oluşturulması gerekliliği ortadan kaldırılır. Gerçek süreç transfer fonksiyonu, FOPDT model transfer fonksiyonu ile tam olarak eşleşirse, Kaya ve Atherton (2001)'un tanımlama metodu ile FOPDT modelin parametreleri tam olarak hesaplanabilir. Bu durumda, elde edilen FOPDT modele dayalı oluşturulan KSB her hangi bir hata içermeyecektir. Eğer gerçek süreç transfer fonksiyonu yüksek mertebeden ise, FOPDT model ile oluşturulan KSB kritik frekans değeri ω_c civarında ihmal edilebilir hatalar içerecektir. Ancak sonraki örneklerde de gösterileceği üzere bu durum süreç denetiminde kapalı çevrim süreci kararlı yapacak tüm PI kontrolör parametre değerlerinin belirlenmesinde önemli bir soruna neden olmamaktadır.

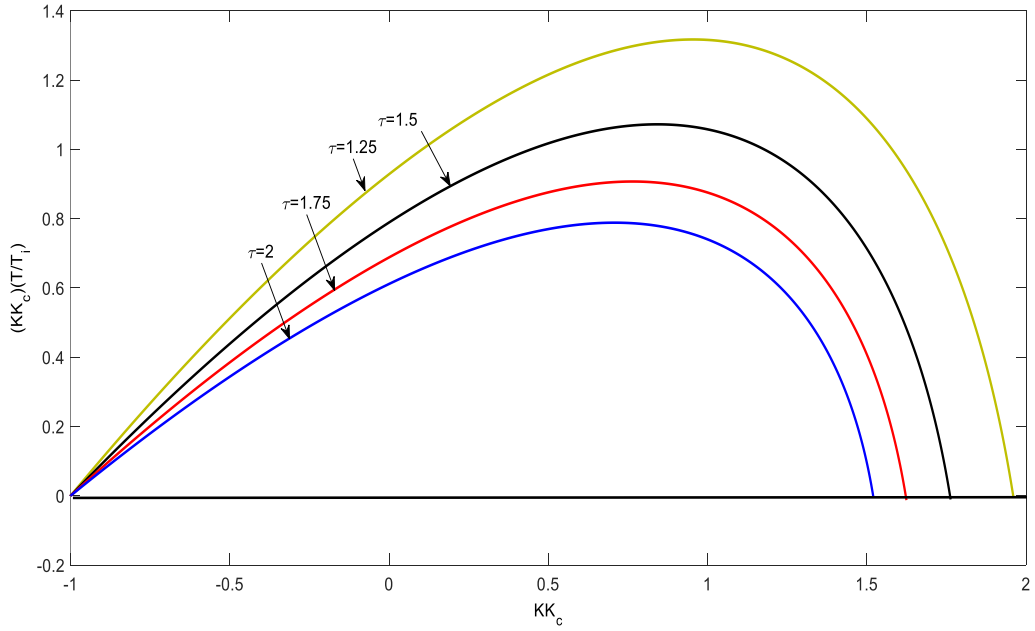
Kontrolör $\omega \in [0, \omega_c]$ frekans değerleri aralığında çalıştığından dolayı KSB'nin bu aralıklar için oluşturulması yeterli olacaktır (Tan, 2005). Burada ω_c, süreç transfer fonksiyonu Nyquist diyagramının, negatif reel eksenle kesiştiği frekans değeridir. Bu frekans değeri, açık çevrim transfer fonksiyonu fazının -180°'ye eşitlenmesiyle hesaplanabilir:

$$\tan^{-1}\left(\frac{\omega N_o}{N_e}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{\omega D_o}{D_e}\right) - \omega\theta = -\pi. \tag{3.21}$$

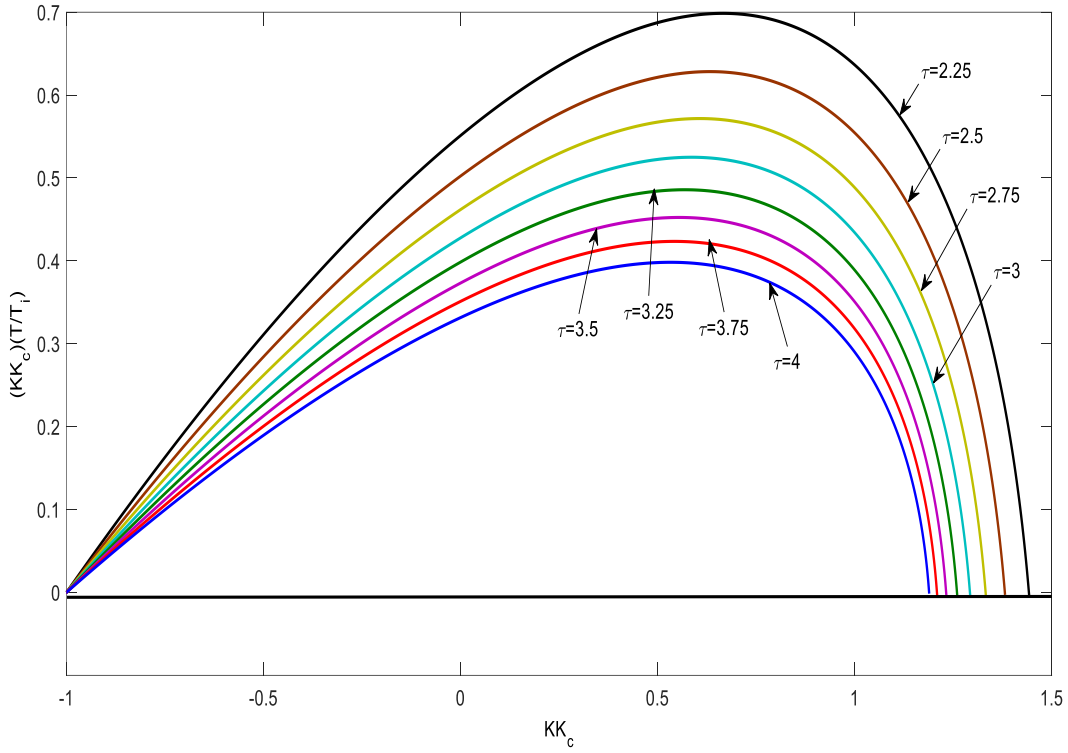
Süreç transfer fonksiyonunun FOPDT modeli kullanılarak elde edilen genelleştirilmiş (3.19) ve (3.20) eşitlikleri ile PI kontrolör tasarımı için $(KK_c, KK_c(T/T_i))$ düzleminde genelleştirilmiş kararlılık bölgeleri oluşturulur. Şekil 3.3., Şekil 3.4. ve Şekil 3.5. NEZG'nin farklı değerleri; $0.25 \le \tau \le 1$, $1.25 \le \tau \le 2$ ve $2.25 \le \tau \le 4$ için elde edilen KSB'leri göstermektedir. Bu şekiller, NEZG'nin farklı değerleri ve daha küçük aralıkları ile daha da genelleştirilebilir ve açık çevrim kararlı süreçlerin denetimi için kapalı çevrim süreci kararlı yapan tüm PI kontrolör parametre değerlerinin belirlenmesinde kullanılabilir. Sonraki örnekler metodun kullanılışını göstermektedir.



Şekil 3.3. NEZG'nin $0.25 \le \tau \le 1$ aralığındaki değerleri için KSB'ler



Şekil 3.4. NEZG'nin $1.25 \le \tau \le 2$ aralığındaki değerleri için KSB'ler



Şekil 3.5. NEZG'nin $2.25 \le \tau \le 4$ aralığındaki değerleri için KSB'ler

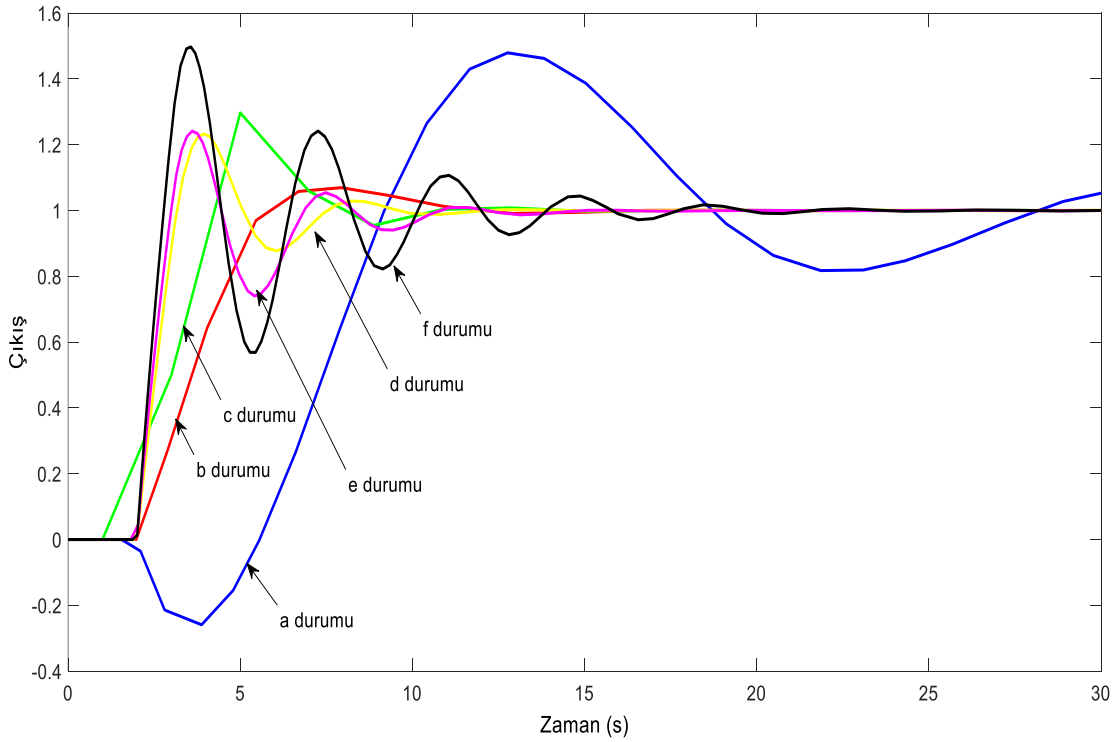
- **FOPDT Model ile Eşleşen Transfer Fonksiyonuna Sahip Bir Süreç Örneği**

Bu örnekte transfer fonksiyonu $G(s) = e^{-s}/(s+1)$ olan süreci göz önüne alalım. Bu süreç için NEZG değeri $\tau = 1$'dir. Gerçek süreç transfer fonksiyonu FOPDT model transfer fonksiyonu ile tam olarak eşleştiği için, Kaya ve Atherton (2001)'un röle geri beslemeli tanımlama metodu FOPDT modelin parametre değerlerini tam olarak verecektir. Şekil 3.3.'teki KSB grafiğinde $\tau = 1$ için oluşturulmuş bölge süreci kararlı yapacak tüm PI kontrolör parametre değerlerinin hesaplanmasında kullanılabilir. Çizelge 3.1. KSB (Şekil 3.3.'te $\tau = 1$'e karşılık gelen bölge) içerisinden seçilen bazı noktalardan alınan değerler için PI kontrolör parametre değerlerini vermektedir. Hesaplanan PI kontrolör parametreleri ile kapalı çevrim sürecin birim basamak cevapları Şekil 3.6.'da verilmiştir. Şekil 3.6.'dan tüm kapalı çevrim basamak cevapların kararlı oldukları, dolayısıyla Şekil 3.3.'de $\tau = 1$'e karşılık gelen bölgenin $G(s) = e^{-s}/(s+1)$ açık çevrim transfer fonksiyonu ile verilen bir süreç için gerçekten

kararlılık bölgesi olduğu görülmektedir. Ayrıca, Şekil 3.6.'da a durumu için sistemin ters cevaplı bir sistem gibi davrandığı görülmektedir.

Çizelge 3.1. Kararlılık bölgesinden seçilen bazı noktalar için hesaplanan kontrolör parametre değerleri

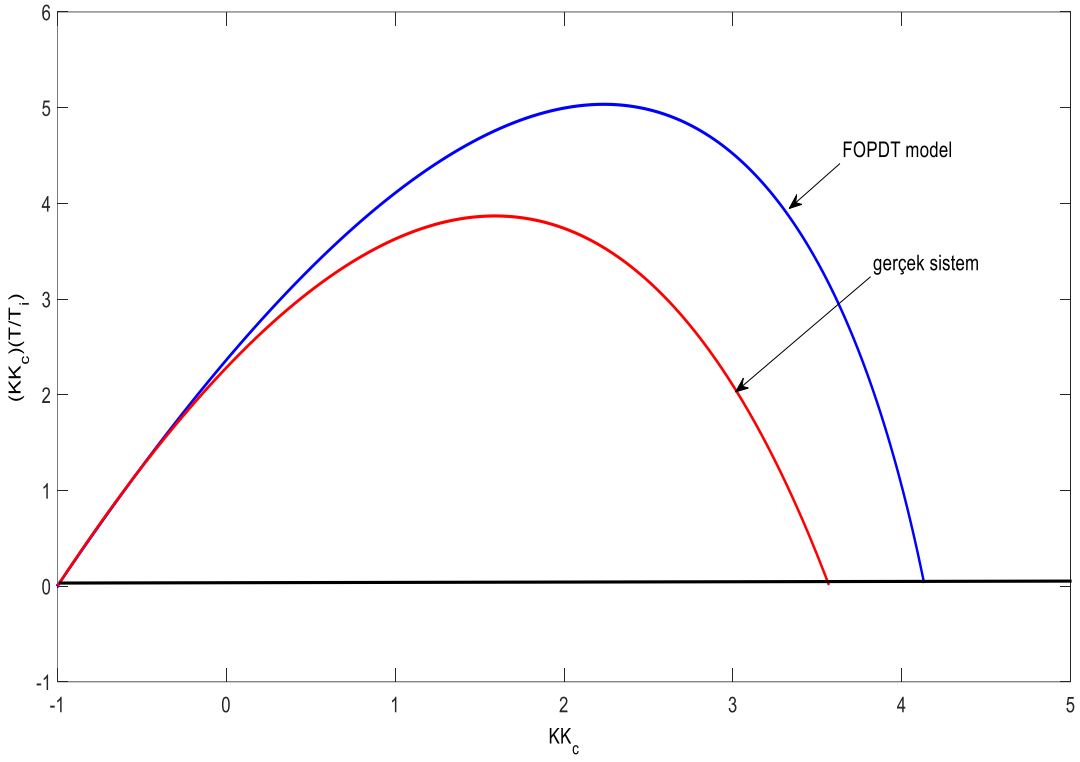
Durum	**Seçilen noktalar**		**Kontrolör parametre değerleri**	
	KK_c	$(KK_c)(T/T_i)$	K_c	T_i
a	-0.5	0.2	-0.5	-2.5
b	0.25	0.4	0.25	0.625
c	0.5	0.5	0.5	1
d	1	0.7	1	1.4285
e	1.25	0.6	1.25	2.0833
f	1.5	0.8	1.5	1.875



Şekil 3.6. Hesaplanan PI kontrolör parametre değerleri için kapalı çevrim cevapları

- **Yüksek Mertebeden Transfer Fonksiyonuna Sahip Bir Süreç Örneği**

Bu örnekte $G(s)=1/(5s+1)(4s+1)(3s+1)(2s+1)(s+1)$ ile verilen yüksek mertebeden bir süreç transfer fonksiyonu ele alınmıştır. Bu süreç transfer fonksiyonu için FOPDT model, Kaya ve Atherton (2001)'un röle geri beslemeli tanımlama metodu kullanılarak, $G_m(\mathrm{s})=e^{-6.8710s}/(15.1917s+1)$ olarak elde edilir. FOPDT model transfer fonksiyonu için NEZG değeri $\tau=0.4523$'tür. Kapalı çevrim süreci kararlı yapan tüm PI kontrolör parametre değerlerinin belirlenmesinden önce, gerçek süreç transfer fonksiyonunun KSB'si ile elde edilen FOPDT model transfer fonksiyonunun KSB'sinin uyuşma derecelerini göstermek önerilen metodun kullanılabilirliği açısından uygun olacaktır (Şekil 3.7.).



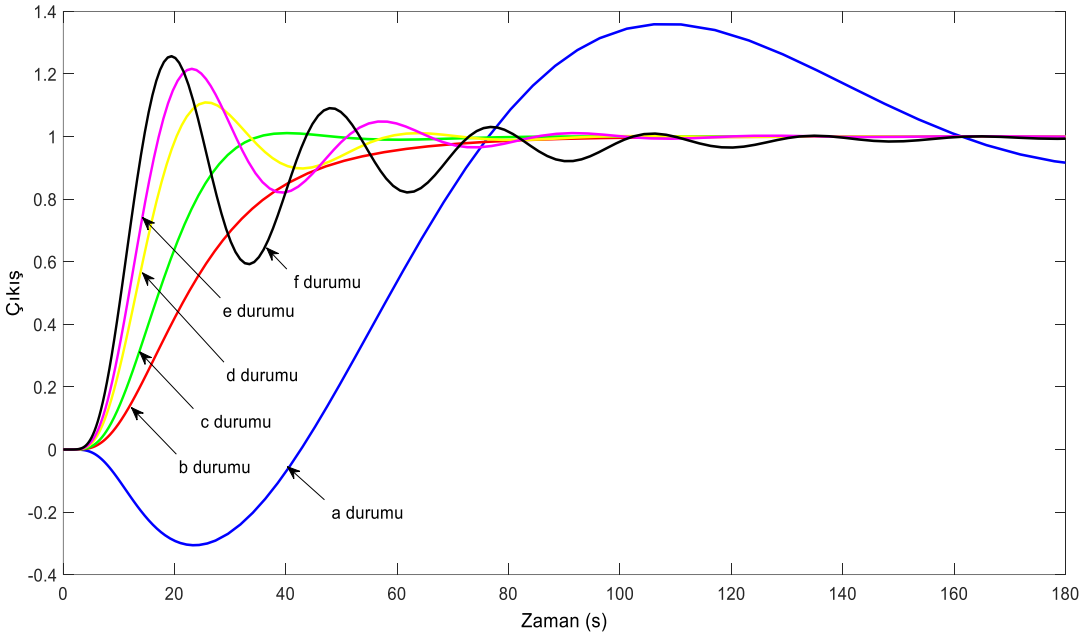
Şekil 3.7. Gerçek süreç ve FOPDT model transfer fonksiyonlarının KSB'leri

Şekil 3.7. incelendiğinde düşük frekans değerlerinde gayet yeterli bir eşleşme olduğu görülmektedir. Kritik frekans değeri civarında ise yanlış eşleşme olduğu görülmektedir. Eğer süreç transfer fonksiyonu yüksek mertebeden ise, kapalı çevrim süreci kararlı yapacak PI kontrolör parametre değerlerinin hesaplanması için, KSB

içerisinden nokta seçimine çok dikkat etmek gerekecektir. Bu durumda, PI kontrolör parametre değerlerinin belirlenmesi amacıyla iki öneri verilecektir: 1) Seçilecek noktalar kararlılık bölgesinin merkezine yakın olmalıdır. 2) Geçerli NEZG değeri ile oluşturulmuş kararlılık bölgesi yerine daha küçük bölge olan; NEZG'nin bir büyük değeri için oluşturulmuş kararlılık bölgesi kullanılmalıdır. Bu örnekte geçerli NEZG değeri $\tau = 0.4523$'tür. $\tau = 0.4523$ için kararlılık bölgesinden alınan noktalar ile hesaplanan PI parametreleri kararsızlığa sebep olabilir. Bunun yerine, Şekil 3.3.'teki NEZG değeri $\tau = 0.75$ için oluşturulan kararlılık bölgesi kullanılmalıdır. $\tau = 0.75$ için oluşturulan kararlılık bölgesinden seçilen PI kontrolör parametre değerleri Çizelge 3.2.'de verilmiştir. Şekil 3.8.'de ise hesaplanan PI kontrolör parametre değerleri için kapalı çevrim sürecin birim basamak cevapları verilmiştir.

Çizelge 3.2. Kararlılık bölgesinden seçilen bazı noktalar için hesaplanan kontrolör parametre değerleri

Durum	**Seçilen noktalar**		**Kontrolör parametre değerleri**	
	KK_c	$(KK_c)(T/T_i)$	K_c	T_i
A	-0.5	0.3	-0.5	-25.3195
B	0.3	0.6	0.3	7.5958
C	0.5	0.9	0.5	8.4398
D	1	1.2	1	12.6597
E	1.3	1.4	1.3	14.1065
F	2	1	2	30.3834



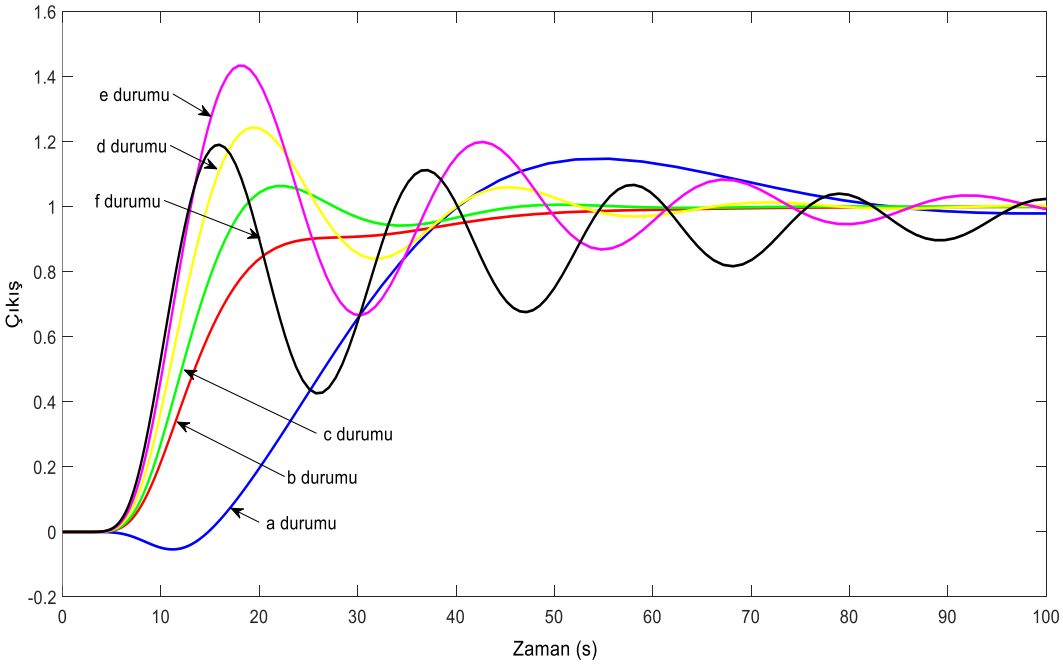
Şekil 3.8. Hesaplanan PI kontrolör parametre değerleri için kapalı çevrim cevapları

- **Yüksek Mertebeden Transfer Fonksiyonuna Sahip Bir Süreç Örneği**

Bu örnekte de bir başka yüksek mertebeden transfer fonksiyonu $G(s)=1/(s+1)^{10}$ ele alınmıştır. Süreç transfer fonksiyonunun FOPDT modeli, Kaya ve Atherton (2001)'un röle geri beslemeli model tanımlama metodu kullanılarak, $G_m(s)=e^{-6.8899s}/(4.5642s+1)$ olarak elde edilir. FOPDT model transfer fonksiyonu için NEZG değeri $\tau=1.5096$'dır. Önceki örnekte önerilen ilkeler doğrultusunda Şekil 3.4.'te NEZG değeri $\tau=1.75$ için oluşturulan KSB, PI kontrolör parametre değerlerinin belirlenmesinde kullanılır. $\tau=1.75$ için oluşturulan KSB'den seçilen PI kontrolör parametre değerleri Çizelge 3.3.'te verilmiştir. Şekil 3.9. ise hesaplanan PI kontrolör parametre değerleri için birim basamak cevapları gösterilmektedir.

Çizelge 3.3. Kararlılık bölgesinden seçilen bazı noktalar için hesaplanan kontrolör parametre değerleri

Durum	**Seçilen noktalar**		**Kontrolör parametre değerleri**	
	KK_c	$(KK_c)(T/T_i)$	K_c	T_i
A	-0.2	0.2	-0.2	-4.5642
B	0.4	0.3	0.3	6.0856
C	0.5	0.4	0.5	5.7052
D	0.7	0.5	0.7	6.3898
E	0.9	0.6	0.9	6.8463
F	1.2	0.25	1.2	21.9081



Şekil 3.9. Hesaplanan PI kontrolör parametre değerleri için kapalı çevrim cevapları

3.2.1.2 PID Kontrolör Tasarımı

Şekil 3.2.'deki TGTÇ kontrol sisteminde, $C(s)$'in bir ideal PID kontrolör olduğu kabul edilsin. İdeal PID kontrolörün transfer fonksiyonu;

$$C(s) = K_c(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s) \tag{3.22}$$

ile verilir. Bölüm 3.2.1.1.'de açıklanan prosedür takip edilerek genelleştirilmiş kararlılık bölgeleri ile PID kontrolörün ayar parametrelerinin hesaplanabilmesi için aşağıda verilen eşitlikler elde edilir:

$$KK_C = \omega \sin(\omega\tau) - \cos(\omega\tau). \tag{3.23}$$

$$KK_C \frac{T}{T_i} = \omega \sin(\omega\tau) + \omega^2 \cos(\omega\tau) + \omega^2 KK_C \frac{T_d}{T}. \tag{3.24}$$

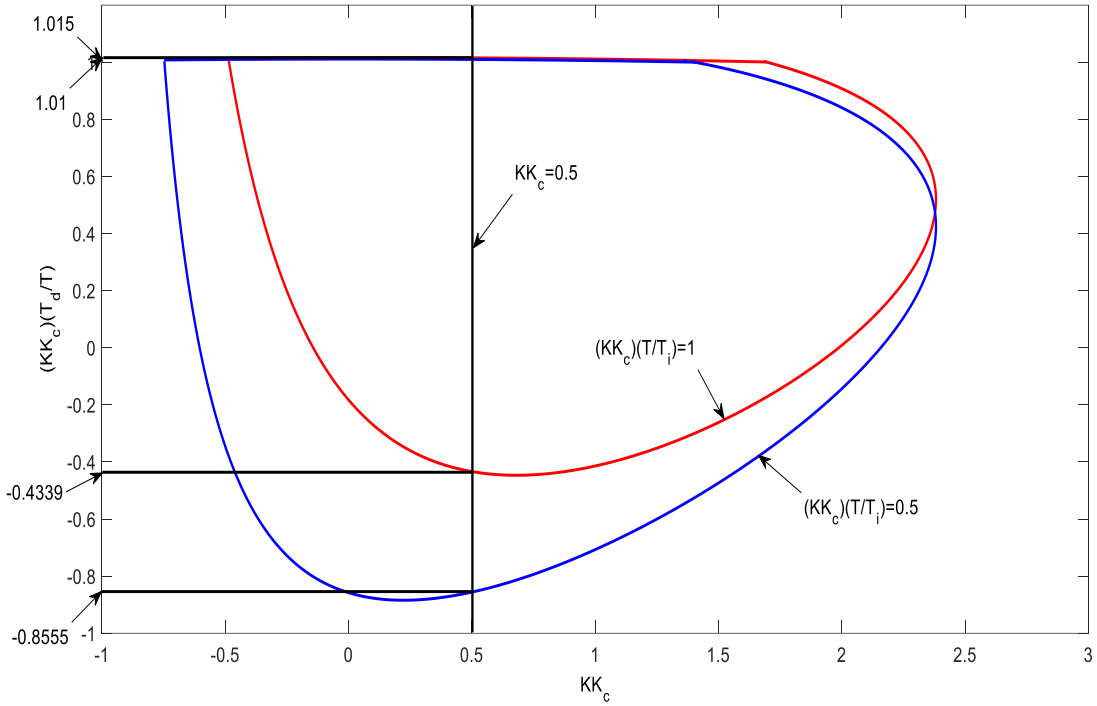
$$KK_C \frac{T_d}{T} = -\omega^{-1} \sin(\omega\tau) - \cos(\omega\tau) + \omega^{-2} KK_C \frac{T}{T_i}. \tag{3.25}$$

Şekil 3.10.'da $(KK_c, KK_c(T_d/T))$ düzleminde (3.23) ve (3.24) ile verilen denklemler kullanılarak belirli $KK_c(T/T_i)$ değerleri için NEZG'nin $\tau = 1$ olduğu varsayılarak KSB'ler oluşturulmuştur. Şekil 3.11.'de ise $(KK_c, KK_c(T/T_i))$ düzleminde (3.23) ve (3.25) ile verilen denklemler kullanılarak belirli $KK_c(T_d/T)$ değerleri için NEZG'nin $\tau = 1$ olduğu varsayılarak KSB'ler oluşturulmuştur.

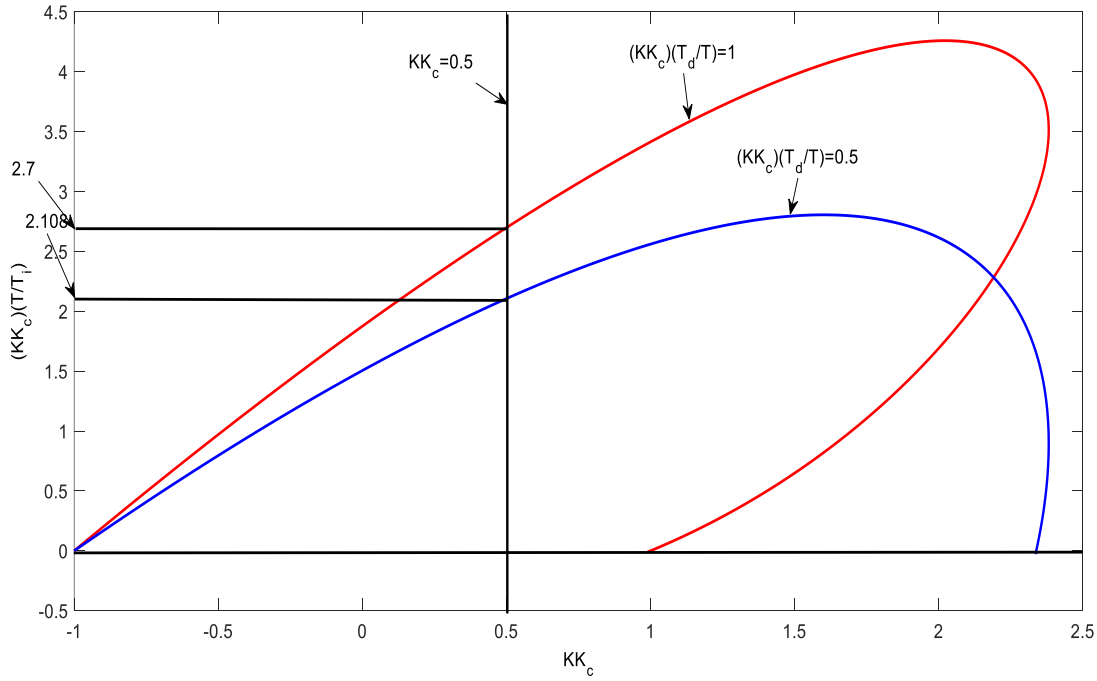
Şekil 3.10 ve Şekil 3.11.'deki grafikler kullanılarak, Şekil 3.12'deki KSB elde edilmiştir. Şekil 3.10.'daki kararlılık bölgeleri grafiğinde KK_c'nin 0.5 değerine karşılık düşen; $\left(KK_c(T/T_i), KK_c(T_d/T)\right) = (1, -0.4339)$ noktası ve $\left(KK_c(T/T_i), KK_c(T_d/T)\right) = (0.5, -0.8555)$ noktası kullanılarak l_1, $\left(KK_c(T/T_i), KK_c(T_d/T)\right) = (1, 1.015)$ ve $\left(KK_c(T/T_i), KK_c(T_d/T)\right) = (0.5, 1.01)$ noktaları kullanılarak l_2 doğru denklemleri elde edilmiştir. Şekil 3.11.'deki kararlılık bölgeleri grafiğinde KK_c'nin 0.5 değerine karşılık düşen; $\left(KK_c(T/T_i), KK_c(T_d/T)\right) = (2.7, 1)$ ve $\left(KK_c(T/T_i), KK_c(T_d/T)\right) = (2.108, 0.5)$ noktaları kullanılarak l_3, $\left(KK_c(T/T_i), KK_c(T_d/T)\right) = (0, 1)$ ve $\left(KK_c(T/T_i), KK_c(T_d/T)\right) = (0, 0.5)$ noktaları kullanılarak l_4 doğru denklemleri elde edilmiştir. Bu doğru denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$l_1: \quad KK_c(T_d/T) = 0.8432\left(KK_c(T/T_i)\right) - 1.2772$$
$$l_2: \quad KK_c(T_d/T) = 0.01\left(KK_c(T/T_i)\right) - 1.005$$

$$l_3: \quad KK_c\left(T_d/T\right)=0.8445\left(KK_c\left(T/T_i\right)\right)-1.2804$$
$$l_4: \quad KK_c\left(T/T_i\right)=0 \qquad (3.26)$$

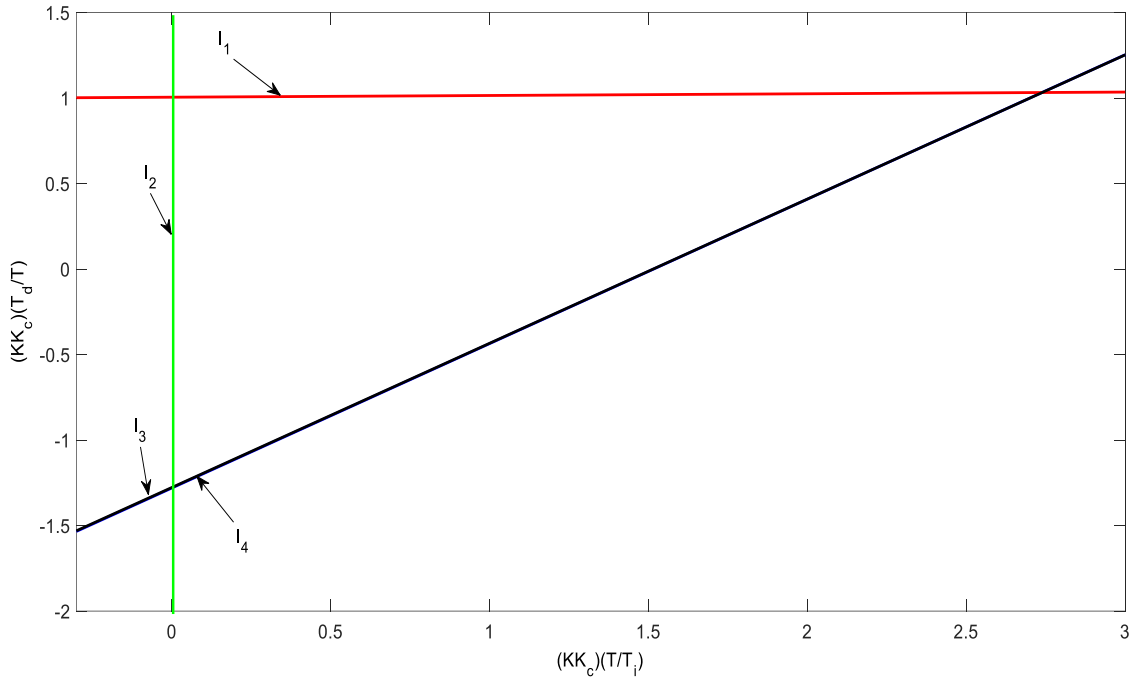


Şekil 3.10. Sabit $KK_c\left(T/T_i\right)$ değerleri için $\left(KK_c, KK_c\left(T_d/T\right)\right)$ düzleminde KSB'ler



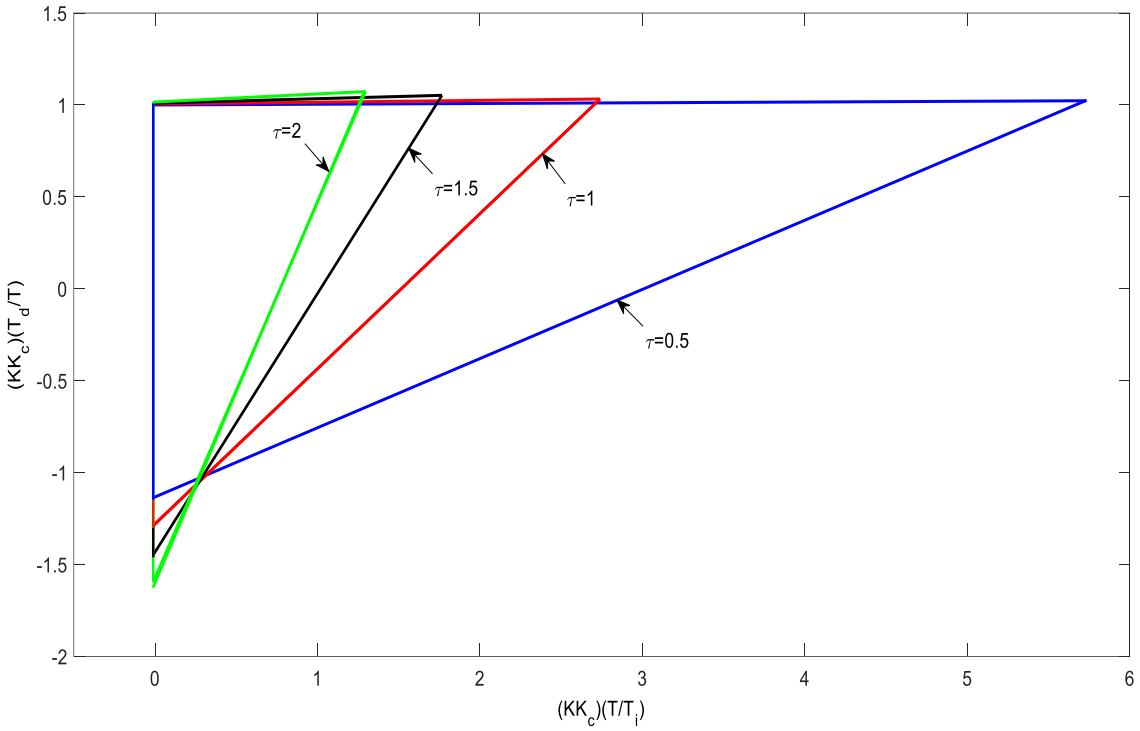
Şekil 3.11. Sabit $KK_c\left(T_d/T\right)$ değerleri için $\left(KK_c, KK_c\left(T/T_i\right)\right)$ düzleminde KSB'ler

Elde edilen doğru denklemleri $KK_c = 0.5$ ve NEZG değeri $\tau = 1$ için, $\left(KK_c\left(T/T_i\right), KK_c\left(T_d/T\right)\right)$ düzleminde kararlılık bölgesinin oluşturulmasında kullanılmıştır (Şekil 3.12.).



Şekil 3.12. $\tau = 1$ ve $KK_c = 0.5$ için $\left(KK_c\left(T/T_i\right), KK_c\left(T_d/T\right)\right)$ düzleminde KSB'ler

Süreçlerin denetimi için sistemi kararlı yapan tüm PID kontrolör parametre değerleri belirlenirken ilk önce kontrolörün kazanç değerine karar verilir. Daha sonra PID kontrolörün diğer iki parametresi olan T_i ve T_d değerleri hesaplanır. GKSB ile PID kontrolör tasarımı için $(KK_c(T/T_i), KK_c(T_d/T))$ düzleminde farklı NEZG değerleri için KSB'lerin çizilmesi gereklidir. Bu nedenle Şekil 3.13.'de NEZG'nin $\tau = 0.5$, $\tau = 1$, $\tau = 1.5$ ve $\tau = 2$ değerleri için KSB'ler verilmiştir. Elde edilen KSB'ler KK_c'nin 0.5 değeri için geçerlidir. Gerekirse farklı NEZG ve KK_c değerleri için de KSB'ler oluşturulabilir. Böylelikle yaklaşım çok daha fazla genel hale dönüştürülmüş olur.



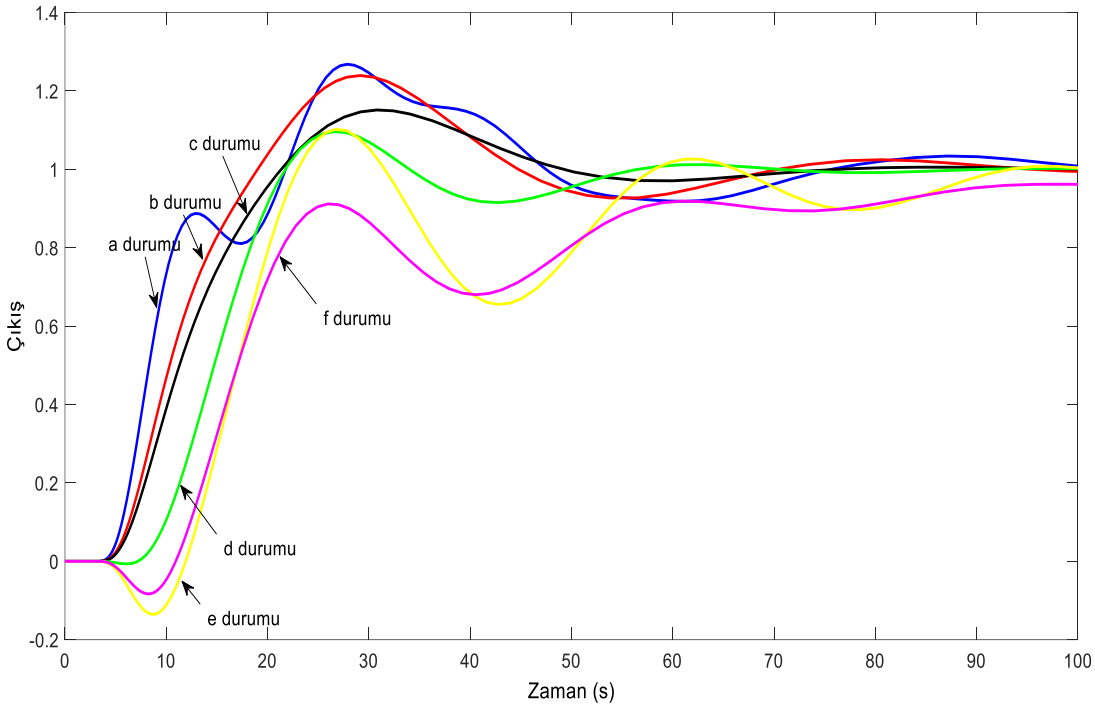
Şekil 3.13. Farklı NEZG değerleri ve $KK_c = 0.5$ için $\left(KK_c\left(T/T_i\right), KK_c\left(T_d/T\right)\right)$ düzleminde KSB'ler

- **PID Kontrolör Tasarım Örneği**

Transfer fonksiyonu $G(s) = e^{-2s}/(2s+1)^5$ olan süreci göz önünde bulunduralım. Bu süreç transfer fonksiyonu için FOPDT model $G_m(s) = e^{-7.42s}/(7.07s+1)$ olarak elde edilir (Kaya ve Atherton 2001). Elde edilen FOPDT model transfer fonksiyonu için NEZG değeri $\tau = 1.05$ ile verilir. Gerçek süreç transfer fonksiyonu ($G(s) = e^{-2s}/(2s+1)^5$) kullanılarak oluşturulan KSB ile FOPDT model transfer fonksiyonu, $G_m(s) = e^{-7.42s}/(7.07s+1)$, kullanılarak oluşturulan KSB karşılaştırıldığında, gerçek sürece ait KSB FOPDT modele ait KSB'den daha geniş olacaktır. Kapalı çevrim süreci kararlı yapan tüm PID kontrolör parametre değerlerini elde etmek amacıyla, Bölüm 3.2.1.1.'de önerilen ilkeler doğrultusunda, NEZG'nin $\tau = 1.5$ olduğu Şekil 3.13.'deki KSB kullanılmalıdır. Çizelge 3.4.'te PID kontrolörün, Şekil 3.13.'deki NEZG'nin $\tau = 1.5$ olduğu KSB kullanılarak hesaplanan diğer iki parametre değerleri verilmiştir. Hesaplanan PID kontrolör parametreleri ile kapalı çevrim sürecin birim basamak cevapları Şekil 3.14.'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.4. Kararlılık bölgesinden seçilen bazı noktalar için hesaplanan kontrolör parametre değerleri

Durum	**Seçilen noktalar**		**Kontrolör parametre değerleri**	
	$(KK_c)(T/T_i)$	$(KK_c)(T_d/T)$	T_i	T_d
a	1.2	0.8	2.9463	11.312
b	1	0.4	3.5360	5.656
c	0.8	0.3	4.4208	4.242
d	0.5	-0.1	7.0721	-1.414
e	0.3	-0.4	11.7924	-5.656
f	0.25	-0.3	14.1643	-4.242



Şekil 3.14. Hesaplanan PID kontrolör parametre değerleri için kapalı çevrim cevapları

3.2.2. Kararsız ve Zaman Gecikmeli Süreçler için PI ve PID Kontrolör Tasarımı

3.2.2.1 PI Kontrolör Tasarımı

Bu bölümde açık çevrim kararsız artı zaman gecikmeli transfer fonksiyonuna sahip süreçler için GKSB metodu ile TGTÇ bir süreci kapalı çevrim kararlı yapan tüm PI kontrolör parametre değerlerinin elde edilmesi açıklanmıştır.

Şekil 3.2.'de $C(s)$ ve $G(s)$, sırasıyla, PI kontrolör ve açık çevrim kararsız artı zaman gecikmeli bir sürecin transfer fonksiyonlarını ifade etmektedir. İdeal PI kontrolör transfer fonksiyonu yine (3.5) ile verilmektedir.

Süreç transfer fonksiyonun UFOPDT model ile verildiği kabul edilmiştir:

$$G(s) = \frac{Ke^{-\theta s}}{Ts - 1}. \tag{3.27}$$

Bölüm 3.2.1.1.'de verilen prosedür takip edilerek, kararsız artı zaman gecikmeli süreçler için GKSB ile kapalı çevrim süreci kararlı yapacak tüm PI kontrolörlerin tasarımı için aşağıdaki denklemler elde edilir.

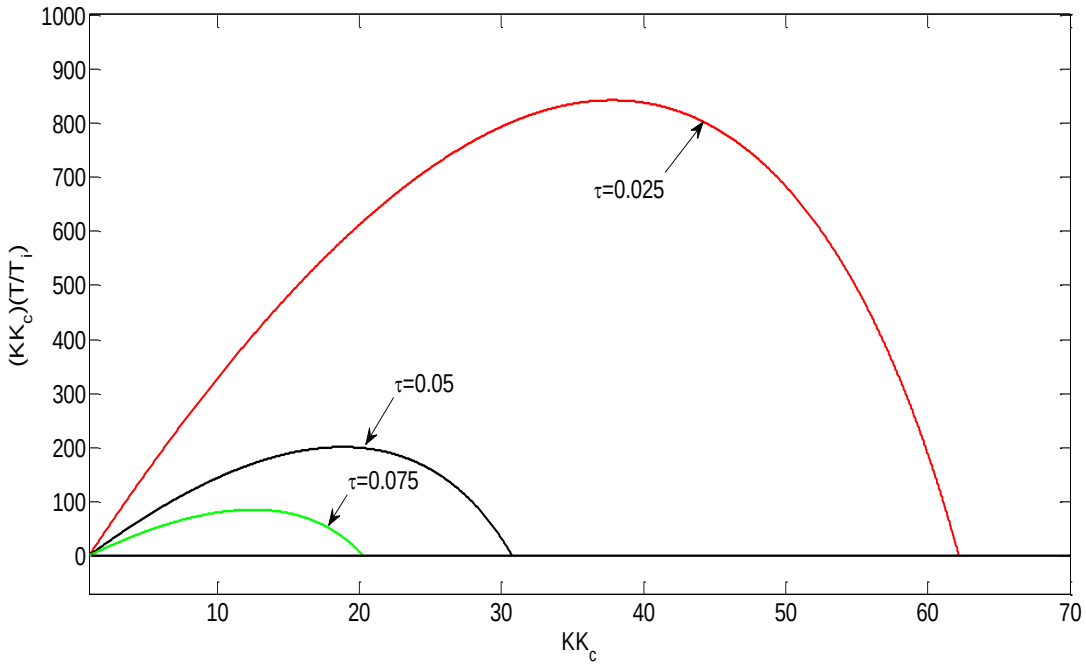
$$KK_c = \omega \sin(\omega\tau) + \cos(\omega\tau) \tag{3.28}$$

$$KK_c \frac{T}{T_i} = -\omega \sin(\omega\tau) + \omega^2 \cos(\omega\tau) \tag{3.29}$$

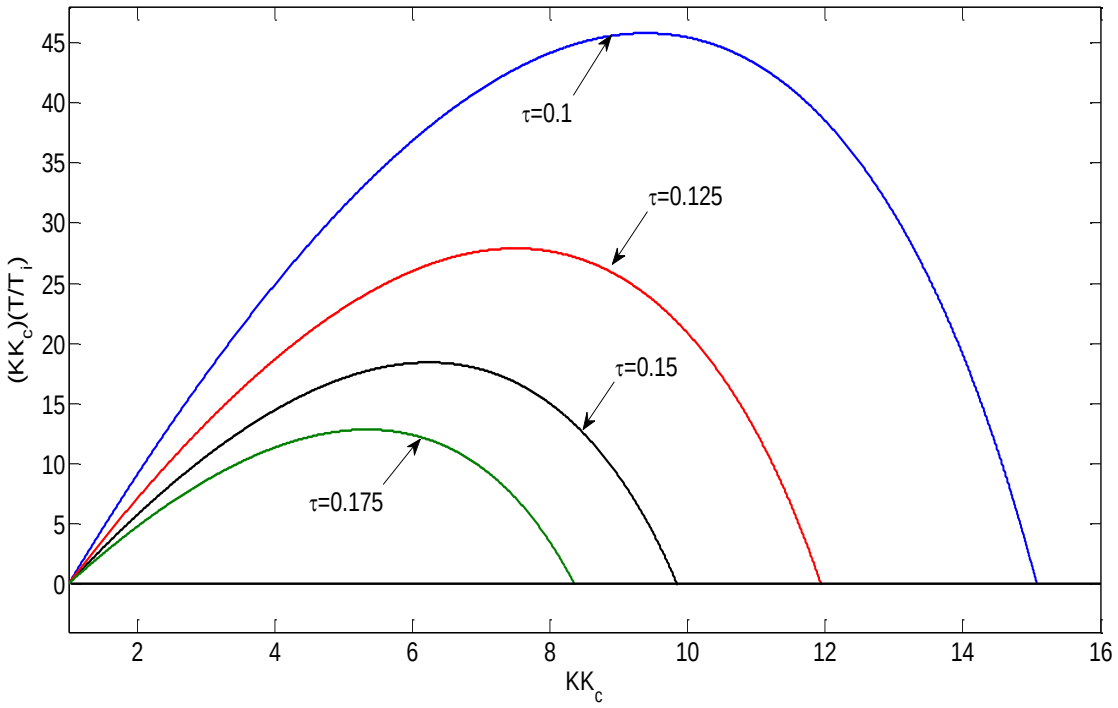
Denklem (3.28) ve (3.29) kullanılarak belirlenen NEZG değeri τ için $(KK_c, KK_c(T/T_i))$ düzleminde KSB oluşturulabilir. Bu iki denklemin sağladığı avantaj, daha önce açık çevrim kararlı süreç transfer fonksiyonları için de geçerli olduğu gibi, transfer fonksiyonunun değişmesi ile KSB'nin yeniden oluşturulması gerekliliğini ortadan kaldırmasıdır. Eğer gerçek süreç transfer fonksiyonu, UFOPDT model transfer fonksiyonu ile tam olarak eşleşirse Kaya ve Atherton (2001) tarafından önerilen tanımlama metodu kullanılarak elde edilecek UFOPDT modelin parametre değerleri hata içermeyecektir. Bu durumda, UFOPDT model kullanılarak oluşturulan KSB herhangi bir yaklaşıklık içermeyecektir. Fakat gerçek süreç transfer fonksiyonu yüksek mertebeden ise yüksek mertebeli süreç transfer fonksiyonunun UFOPDT modeli için oluşturulan KSB kritik frekans değeri olan ω_c civarında ihmal edilebilir yaklaşıklıklar içerecektir. Ancak sonraki örneklerde de gösterileceği üzere bu durum kararsız transfer

fonksiyonuna sahip süreçlerin denetiminde kapalı çevrim süreci kararlı yapacak tüm PI kontrolör parametre değerlerinin belirlenmesi için önemli bir soruna neden olmayacaktır.

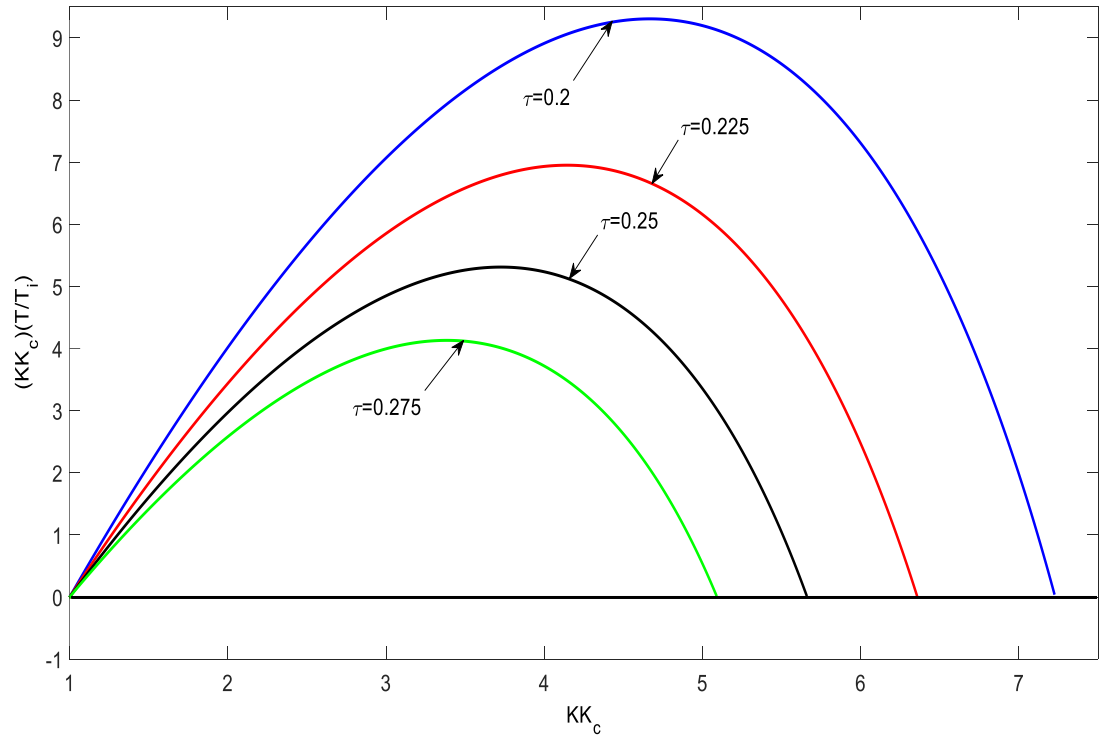
Kararsız süreçler için, NEZG değerinin $\tau \geq 1$ olması durumunda süreci kararlı hale getirecek kontrolör parametre değerleri bulunmayacağından, KSB'ler NEZG'nin $0 \prec \tau \prec 1$ aralığındaki değerleri için oluşturulabilir. Şekil 3.15., Şekil 3.16., Şekil 3.17., Şekil 3.18., Şekil 3.19., Şekil 3.20., Şekil 3.21., Şekil 3.22., Şekil 3.23. ve Şekil 3.24. NEZG'nin farklı değerleri için KSB'leri göstermektedir. Bu şekiller kararsız ve zaman gecikmeli süreçler için tüm PI kontrolör parametre değerlerinin hesaplanmasında kullanılabilir. Sonraki bölümlerde metodun kullanılışının gösterilmesi amacıyla örneklere yer verilmiştir.



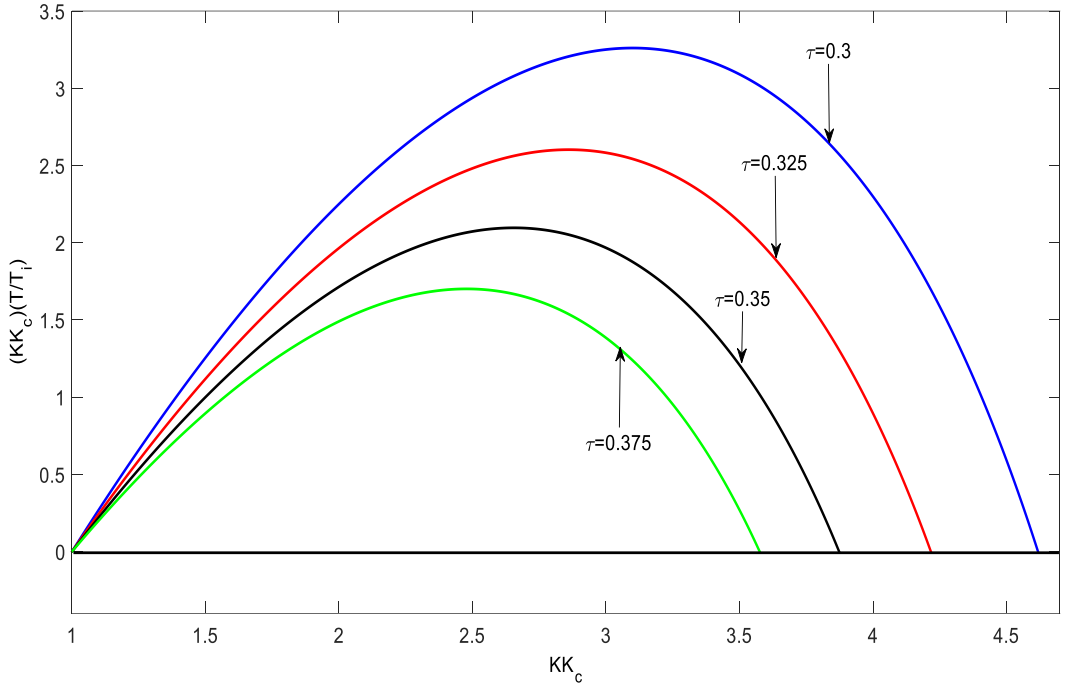
Şekil 3.15. NEZG'nin $0.025 \leq \tau \leq 0.075$ aralığındaki değerleri için KSB'ler



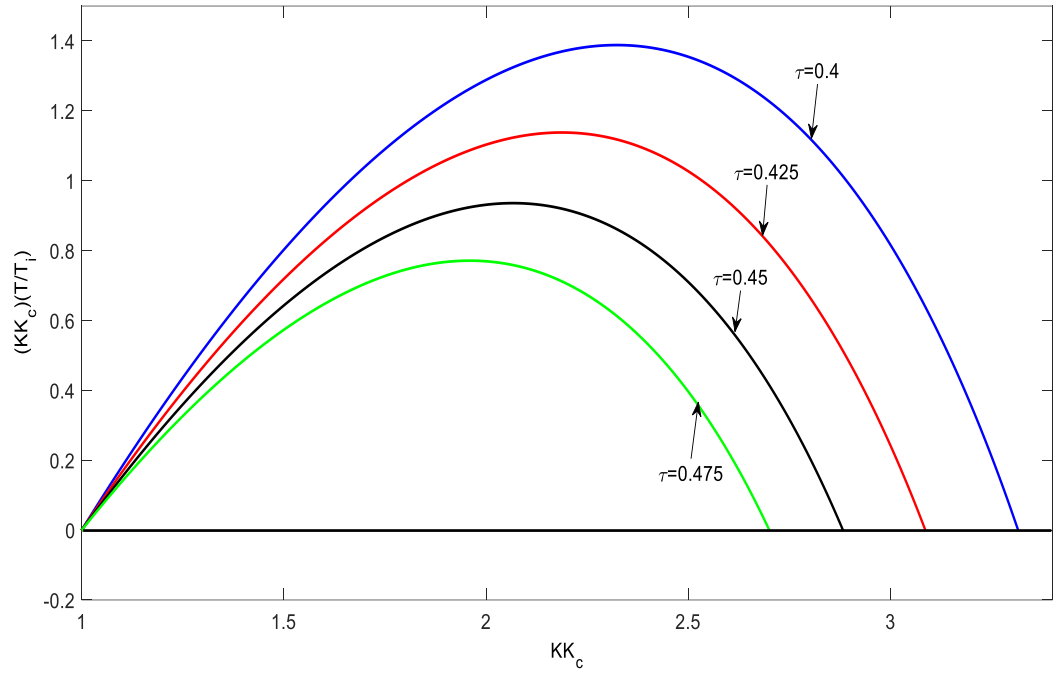
Şekil 3.16. NEZG'nin $0.1 \le \tau \le 0.175$ aralığındaki değerleri için KSB'ler



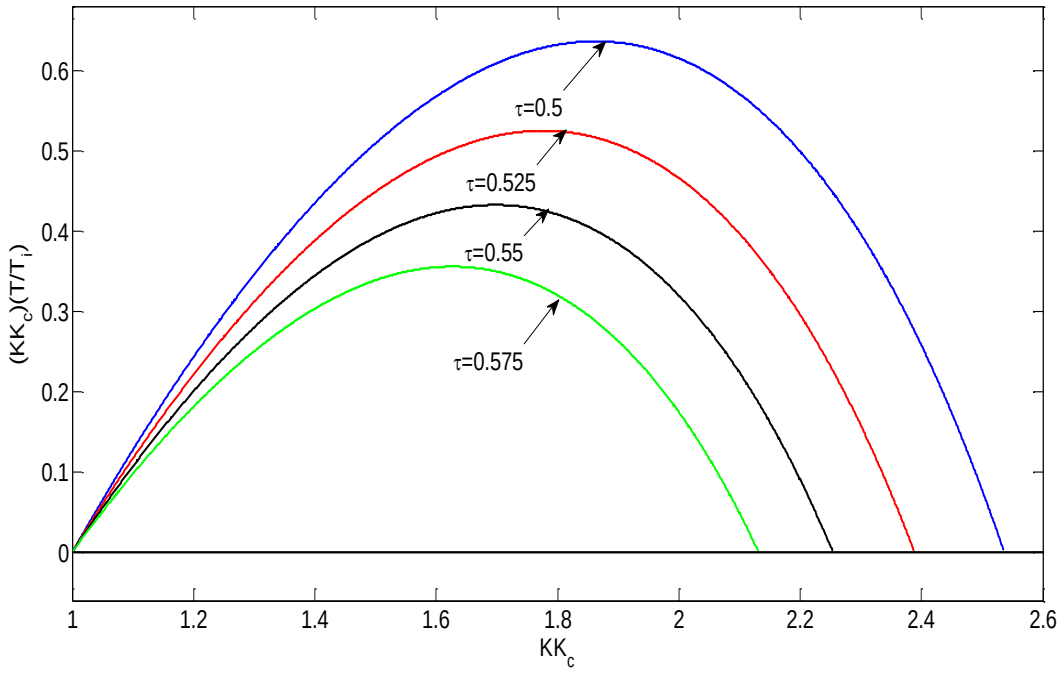
Şekil 3.17. NEZG'nin $0.2 \le \tau \le 0.275$ aralığındaki değerleri için KSB'ler



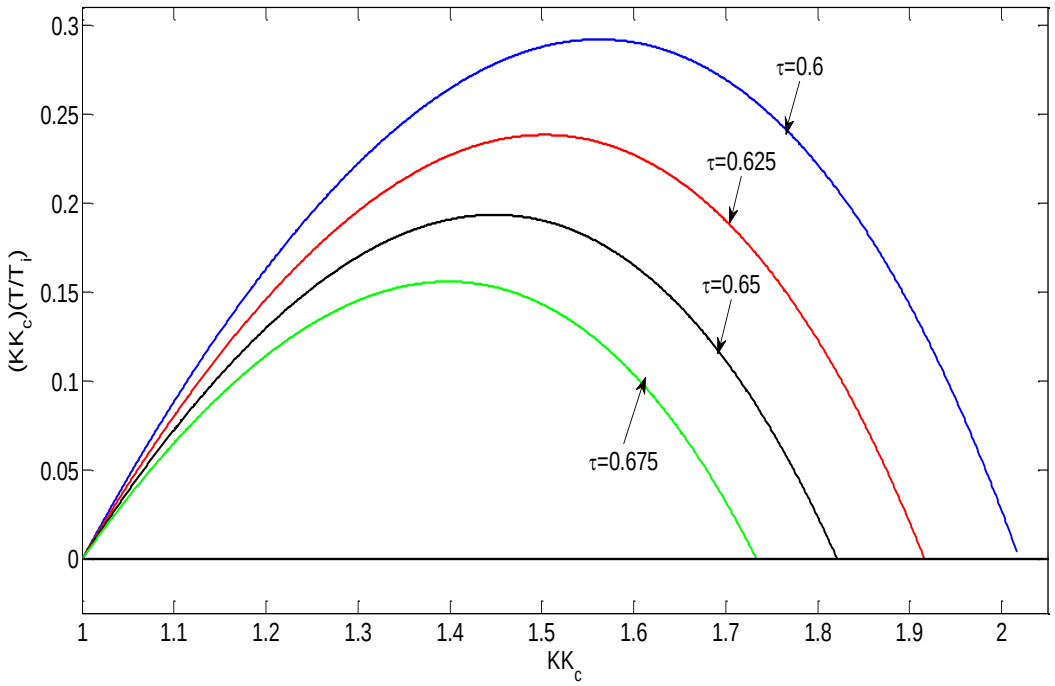
Şekil 3.18. NEZG'nin $0.3 \le \tau \le 0.375$ aralığındaki değerleri için KSB'ler



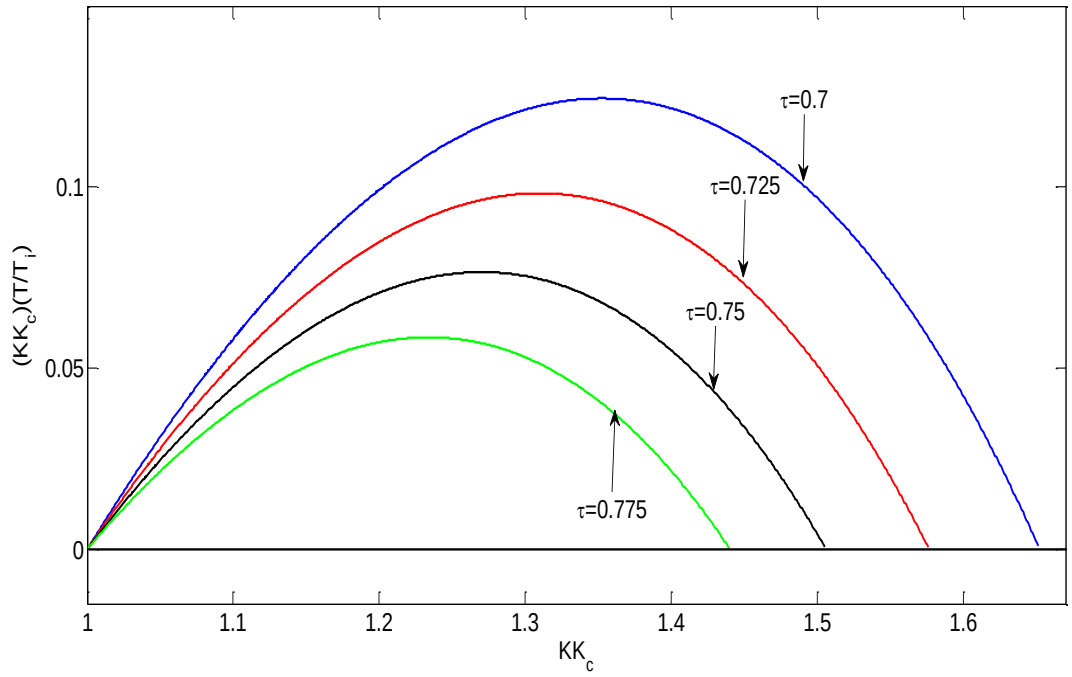
Şekil 3.19. NEZG'nin $0.4 \le \tau \le 0.475$ aralığındaki değerleri için KSB'ler



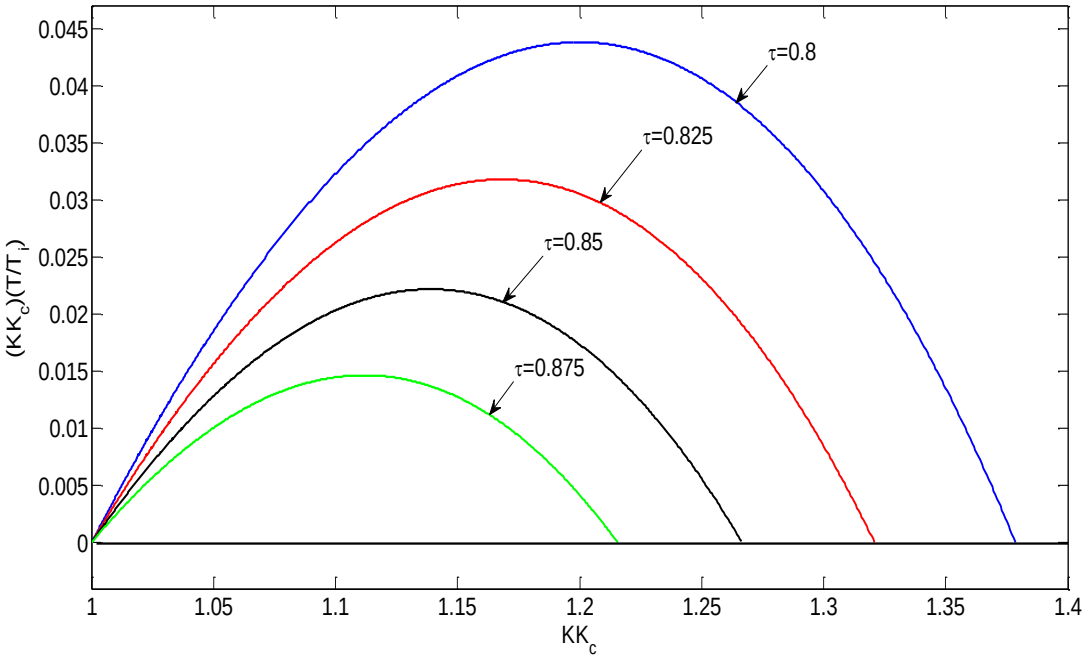
Şekil 3.20. NEZG'nin $0.5 \le \tau \le 0.575$ aralığındaki değerleri için KSB'ler



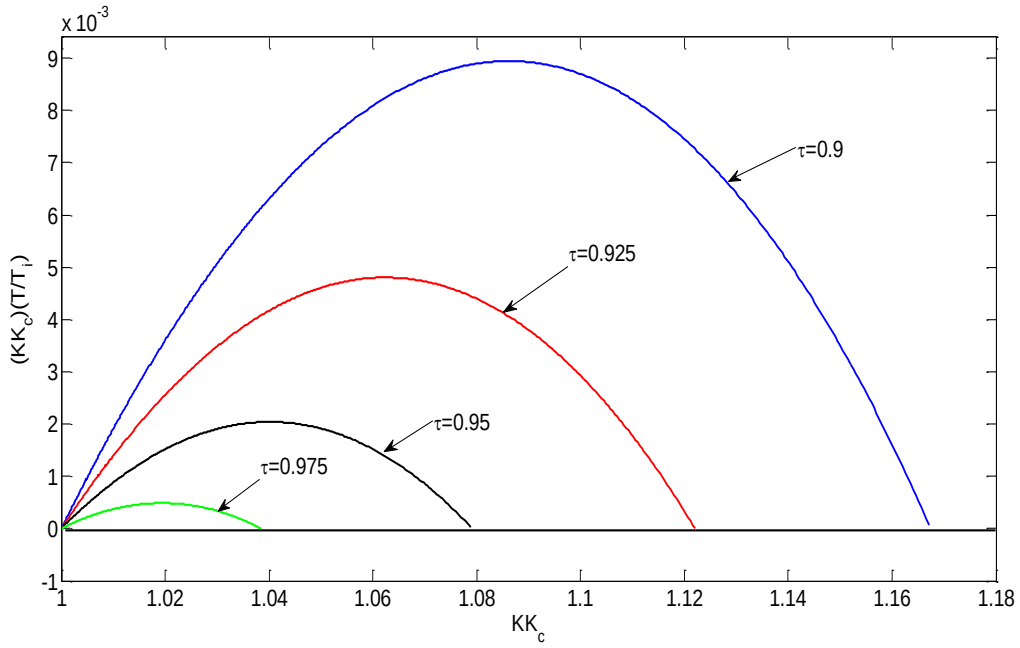
Şekil 3.21. NEZG'nin $0.6 \le \tau \le 0.675$ aralığındaki değerleri için KSB'ler



Şekil 3.22. NEZG'nin $0.7 \le \tau \le 0.775$ aralığındaki değerleri için KSB'ler



Şekil 3.23. NEZG'nin $0.8 \le \tau \le 0.875$ aralığındaki değerleri için KSB'ler



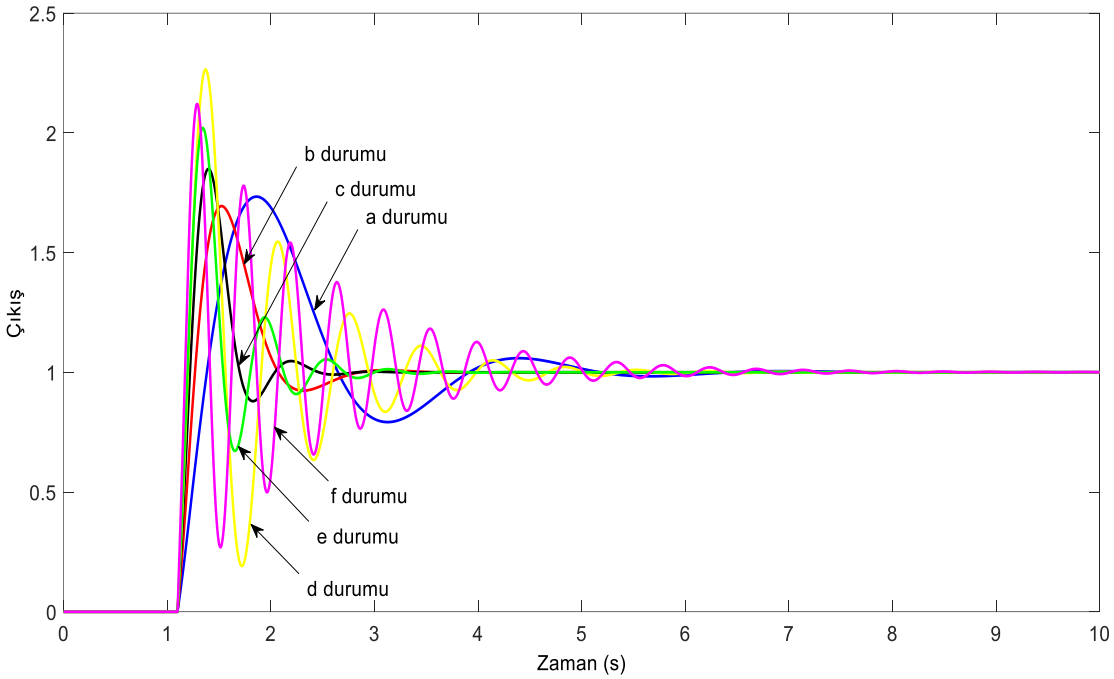
Şekil 3.24. NEZG'nin $0.9 \le \tau \le 0.975$ aralığındaki değerleri için KSB'ler

- **UFOPDT Model ile Eşleşen Transfer Fonksiyonuna Sahip Bir Süreç Örneği**

Transfer fonksiyonu $G(s) = e^{-0.1s} / (s-1)$ olan süreci göz önüne alalım. Bu süreç için NEZG değeri $\tau = 0.1$'dir. Gerçek süreç transfer fonksiyonu UFOPDT model transfer fonksiyonu ile tam olarak eşleştiği için, röle geri beslemeli tanımlama metodu (Kaya ve Atherton 2001) UFOPDT modelin parametre değerlerini tam olarak verecektir. Şekil 3.16.'daki KSB grafiğinde $\tau = 0.1$ ile verilen bölge sürecin kararlı yapan tüm PI kontrolör parametre değerlerinin hesaplanmasında kullanılabilir. Çizelge 3.5. KSB içerisinden seçilen noktalardan alınan değerleri ve karşılık gelen PI kontrolör parametre değerlerini göstermektedir. Tasarlanan PI kontrolör ile kapalı çevrim sürecin birim basamak girişe verdiği cevaplar Şekil 3.25.'te gösterilmiştir. Şekil.3.25.'te elde edilen kapalı çevrim cevaplar, Şekil 3.16.'daki KSB'nin süreci kararlı yapan tüm PI kontrolörleri tasarlamada kullanılabileceğini göstermektedir.

Çizelge 3.5. Kararlılık bölgesinden seçilen bazı noktalar için hesaplanan kontrolör parametre değerleri

Durum	**Seçilen noktalar**		**Kontrolör parametre değerleri**	
	KK_c	$(KK_c)(T/T_i)$	K_c	T_i
a	3	5	3	0.6
b	5	10	5	0.2
c	7	16	7	0.4375
d	8	32	8	0.25
e	9	20	9	0.45
f	13	8	13	1.625

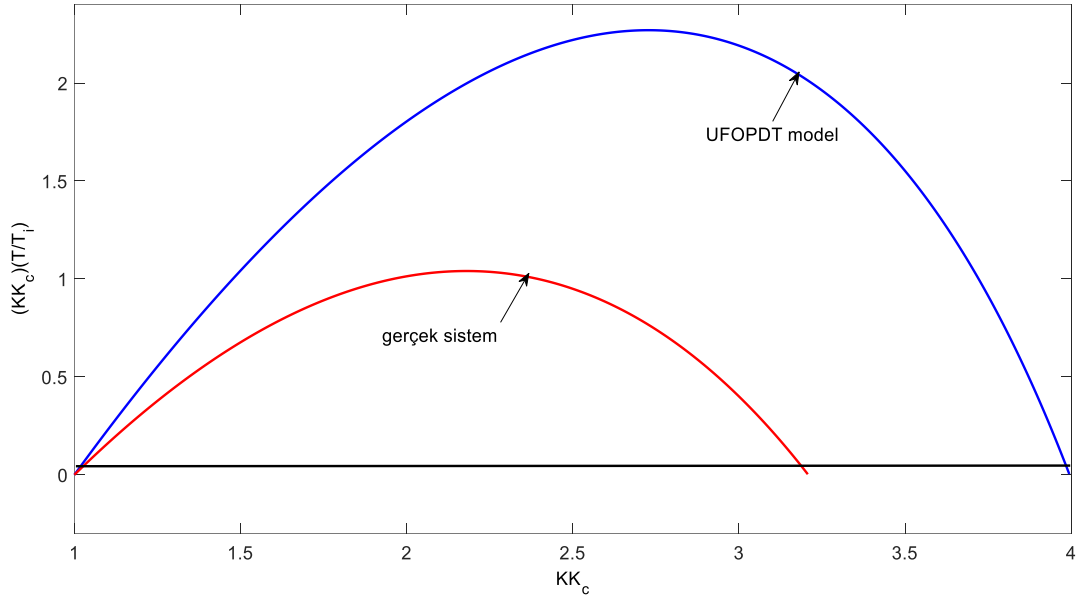


Şekil 3.25. Hesaplanan PI kontrolör parametre değerleri için kapalı çevrim cevapları

- **Yüksek Mertebeden Transfer Fonksiyonuna Sahip Bir Süreç Örneği**

Bu örnekte $G(s) = e^{-0.5s}/(2s-1)(0.5s+1)$ ile verilen ikinci derece bir süreç transfer fonksiyonu ele alınsın. Bu süreç transfer fonksiyonunun UFOPDT modeli Kaya ve Atherton (2001)'un röle geri beslemeli tanımlama metodu ile $G_m(s) = e^{-0.9184s}/(2.6956s-1)$ olarak elde edilir. UFOPDT model transfer fonksiyonunun NEZG değeri $\tau = 0.34$'tür. Süreci kararlı yapan tüm PI kontrolör

parametre değerlerinin belirlenmesinden önce, gerçek süreç transfer fonksiyonunun KSB'si ile elde edilen UFOPDT model transfer fonksiyonunun KSB'sinin uyuşma derecesinin gösterilmesi uygun olacaktır (Şekil 3.26).

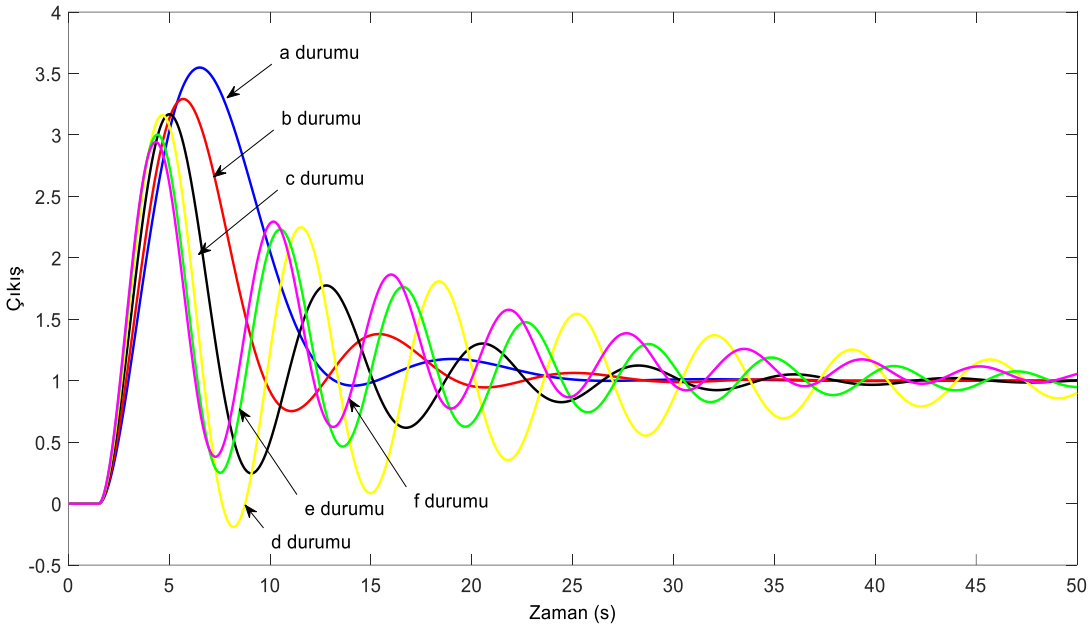


Şekil 3.26. Gerçek süreç ve UFOPDT model transfer fonksiyonlarının KSB'leri

Şekil 3.26. incelendiğinde düşük frekans değerlerinde yeterli bir eşleşme olduğu görülmektedir. Kritik frekans değeri civarındaki uyuşmada ise yetersizlik söz konusudur. Süreç transfer fonksiyonu yüksek mertebeden ise kontrolör parametreleri belirlenirken KSB'den nokta seçimine çok dikkat edilmelidir. Bu süreçler için tüm PI kontrolör parametre değerlerinin belirlenmesine yönelik iki öneri verilecektir: 1) Seçilen noktalar KSB'nin merkezine yakın olmalıdır. 2) Mevcut NEZG değeri yerine NEZG değerinin 0.1 fazlası alınarak, elde edilen değere en yakın değer için oluşturulmuş KSB kullanılmalıdır. Örneğin mevcut örnek için NEZG değeri $\tau = 0.34$'tür. Bu NEZG değerine ait KSB'den alınan noktalar sürecin kararsızlığına sebep olabilir. Bu sebeple, Şekil 3.19.'daki NEZG değerinin $\tau = 0.45$ olduğu KSB kontrolör parametre değerlerinin belirlenmesinde kullanılmalıdır. $\tau = 0.45$ için oluşturulan KSB'den seçilen PI kontrolör parametre değerleri Çizelge 3.6.'da verilmiştir. Şekil 3.27.'de ise belirlenen PI kontrolör parametreleri için kapalı çevrim birim basamak cevapları verilmiştir.

Çizelge 3.6. Kararlılık bölgesinden seçilen bazı noktalar için hesaplanan kontrolör parametre değerleri

Durum	Seçilen noktalar		Kontrolör parametre değerleri	
	KK_c	$(KK_c)(T/T_i)$	K_c	T_i
a	1.5	0.2	1.5	20.21835
b	1.7	0.3	1.7	15.2754
c	2	0.5	2	10.78273
d	2.25	0.7	2.25	8.66451
e	2.5	0.4	2.5	16.84863
f	2.6	0.25	2.6	28.03536



Şekil 3.27. Hesaplanan PI kontrolör parametre değerleri için kapalı çevrim cevapları

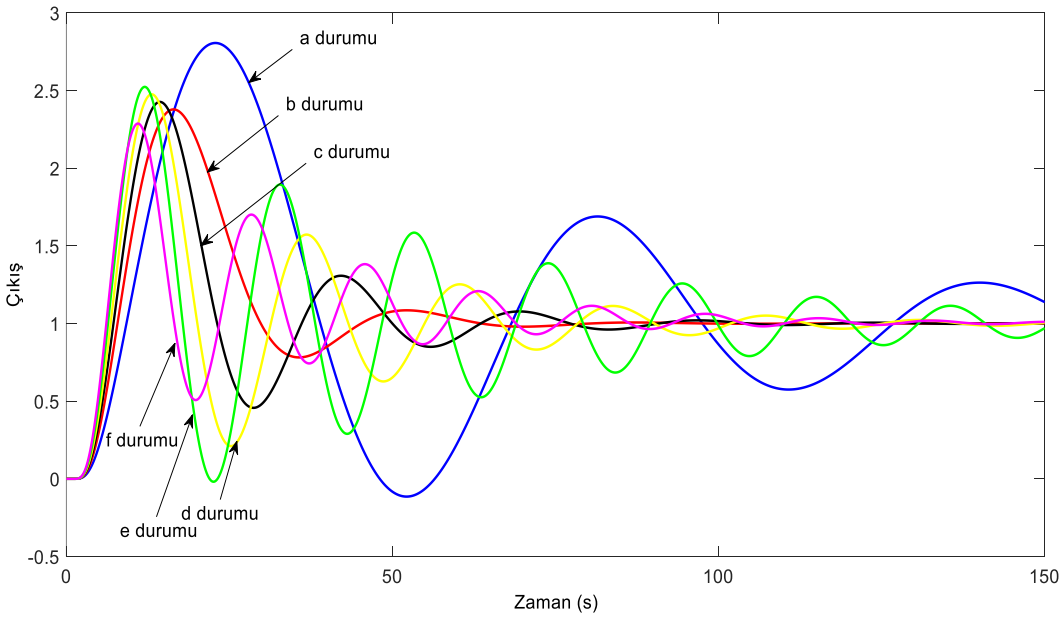
- **Yüksek Mertebeden Transfer Fonksiyonuna Sahip Bir Süreç Örneği**

Bu örnekte de yine yüksek mertebeden bir transfer fonksiyonu $G(s) = e^{-0.2s} / (10s-1)(s+1)^3$ ele alınmıştır. Süreç transfer fonksiyonunun UFOPDT modeli Kaya ve Atherton (2001)'un verilen röle geri beslemeli tanımlama metodu kullanılarak $G_m(s) = e^{-2.8376s} / (15.4099s-1)$ olarak elde edilir. UFOPDT model için NEZG değeri $\tau = 0.18414$'tür. Örnek 2'de önerilen ilkeler doğrultusunda geçerli NEZG değerinin 0.1 fazlası alınarak, elde edilen değere en yakın değer olan $\tau = 0.275$ (Şekil 3.17) için oluşturulan KSB PI kontrolör parametre değerlerinin belirlenmesinde

kullanılmıştır. $\tau = 0.275$ için oluşturulan KSB'den seçilen PI kontrolör parametre değerleri Çizelge 3.7.'de verilmiştir. Şekil 3.28.'de belirlenen PI kontrolör parametre değerleri kullanılarak elde edilen kapalı çevrim birim basamak cevapları gösterilmiştir.

Çizelge 3.7. Kararlılık bölgesinden seçilen bazı noktalar için hesaplanan kontrolör parametre değerleri

Durum	**Seçilen noktalar**		**Kontrolör parametre değerleri**	
	KK_c	$(KK_c)(T/T_i)$	K_c	T_i
a	1.5	1	1.5	23.116
b	2.2	1.3	2.2	26.0787
c	2.6	2.2	2.6	18.2123
d	3	3	3	15.4099
e	3.5	3.8	3.5	14.193
f	4.2	1.5	4.2	43.1477



Şekil3.28.. Hesaplanan PI kontrolör parametre değerleri için kapalı çevrim cevapları

3.2.2.2 PID Kontrolör Tasarımı

Bu bölümde açık çevrim kararsız artı zaman gecikmeli transfer fonksiyonuna sahip süreçler için GKSB metodu ile TGTÇ bir sürecin kapalı çevrim kararlılığı için tüm PID kontrolör parametre değerlerinin elde edilmesi açıklanmıştır.

Şekil 3.2.'de $C(s)$ ve $G(s)$, sırasıyla, PID kontrolör ve açık çevrim kararsız bir sürecin transfer fonksiyonlarını ifade etmektedir. İdeal PID kontrolör transfer fonksiyonunun yine (3.22) ile verildiği varsayılmıştır. Süreç transfer fonksiyonunun ise; UFOPDT model, denklem (3.27), ile verildiği kabul edilmiştir.

Bölüm 3.2.1.2.'de açıklanan prosedür takip edilirse, kararsız artı zaman gecikmeli süreçler için GKSB ile PID kontrolör tasarımı için aşağıda verilen eşitliklere ulaşılabilir.

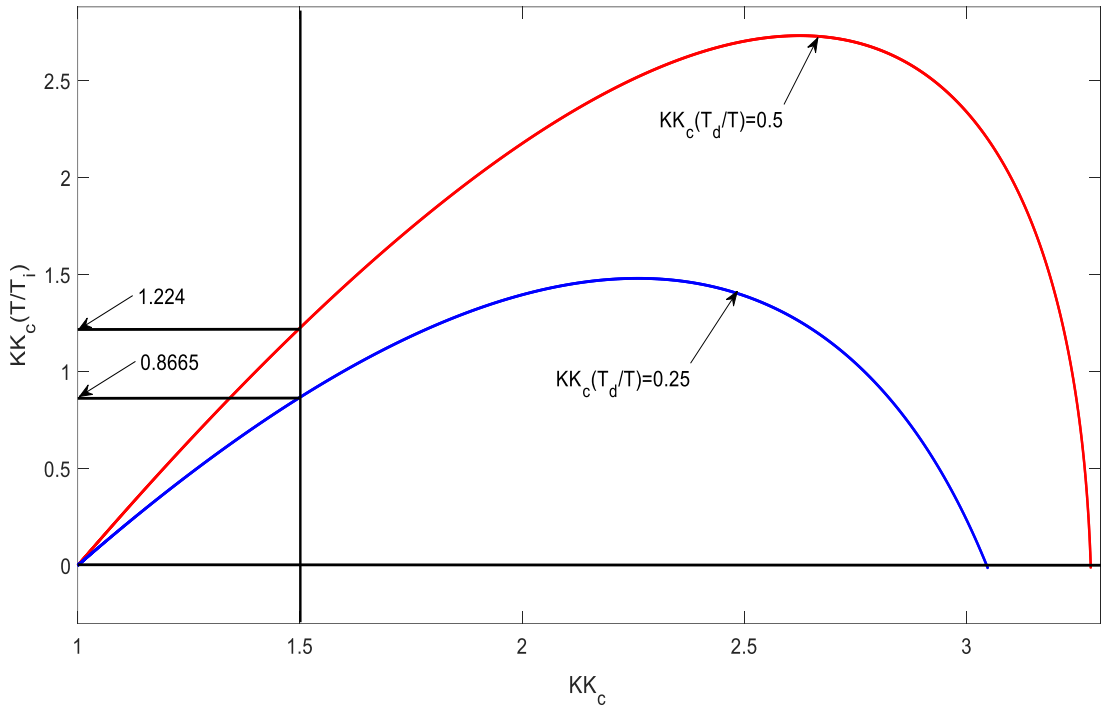
$$KK_c = \omega \sin(\omega\tau) + \cos(\omega\tau) \tag{3.30}$$

$$KK_c \frac{T}{T_i} = -\omega \sin(\omega\tau) + \omega^2 \cos(\omega\tau) + \omega^2 KK_c \frac{T_d}{T} \tag{3.31}$$

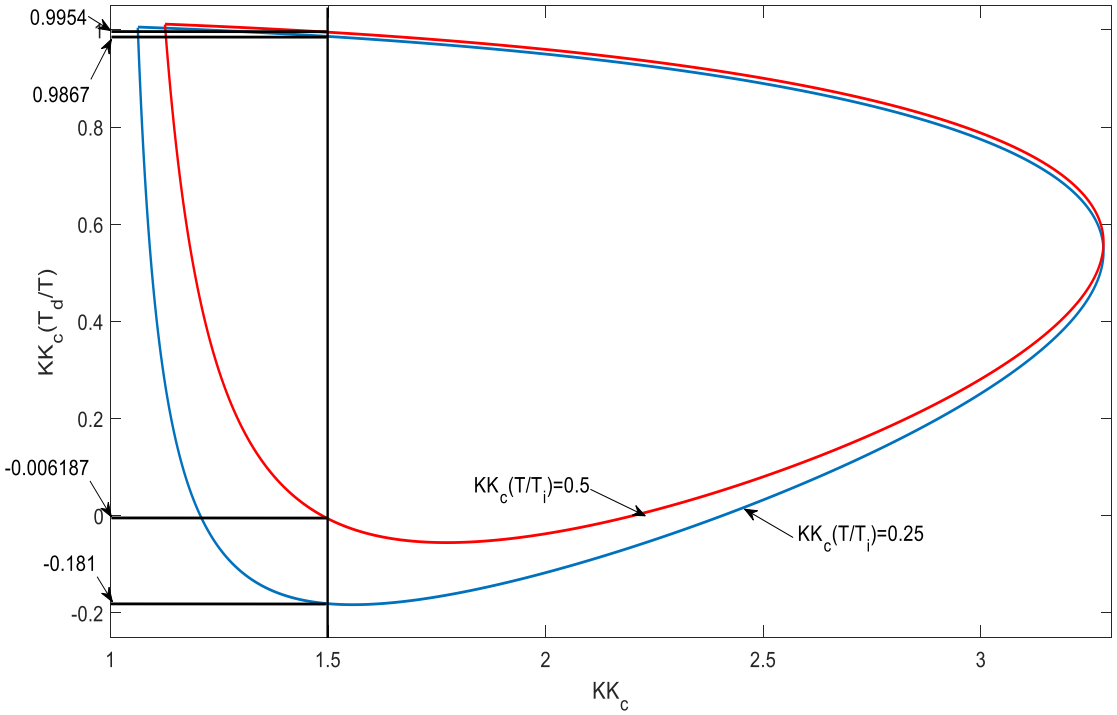
$$KK_c \frac{T_d}{T} = \omega^{-1} \sin(\omega\tau) - \cos(\omega\tau) + \omega^{-2} KK_c \frac{T}{T_i} \tag{3.32}$$

Şekil 3.29.'da $(KK_c, KK_c(T/T_i))$ düzleminde, (3.30) ve (3.31) ile verilen denklemler kullanılarak, $KK_c(T_d/T)$'nin 0.25 ve 0.5 değerleri için ve NEZG değerinin $\tau = 0.5$ olduğu duruma ait KSB'ler oluşturulmuştur. Şekil 3.30.'da $(KK_c, KK_c(T_d/T))$ düzleminde, (3.30) ve (3.32) ile verilen denklemler kullanılarak, $KK_c(T/T_i)$'nin 0.25 ve 0.5 değerleri için ve NEZG değerinin $\tau = 0.5$ olduğu duruma ait KSB'ler oluşturulmuştur.

Bu grafikler yardımıyla, Bölüm 3.2.1.2.'deki prosedür takip edilerek KK_c'nin 1.5 değerine karşılık düşen $KK_c(T/T_i)$ ve $KK_c(T_d/T)$ değerleri kullanılarak (3.33) ile verilen doğru denklemleri elde edilmiştir.



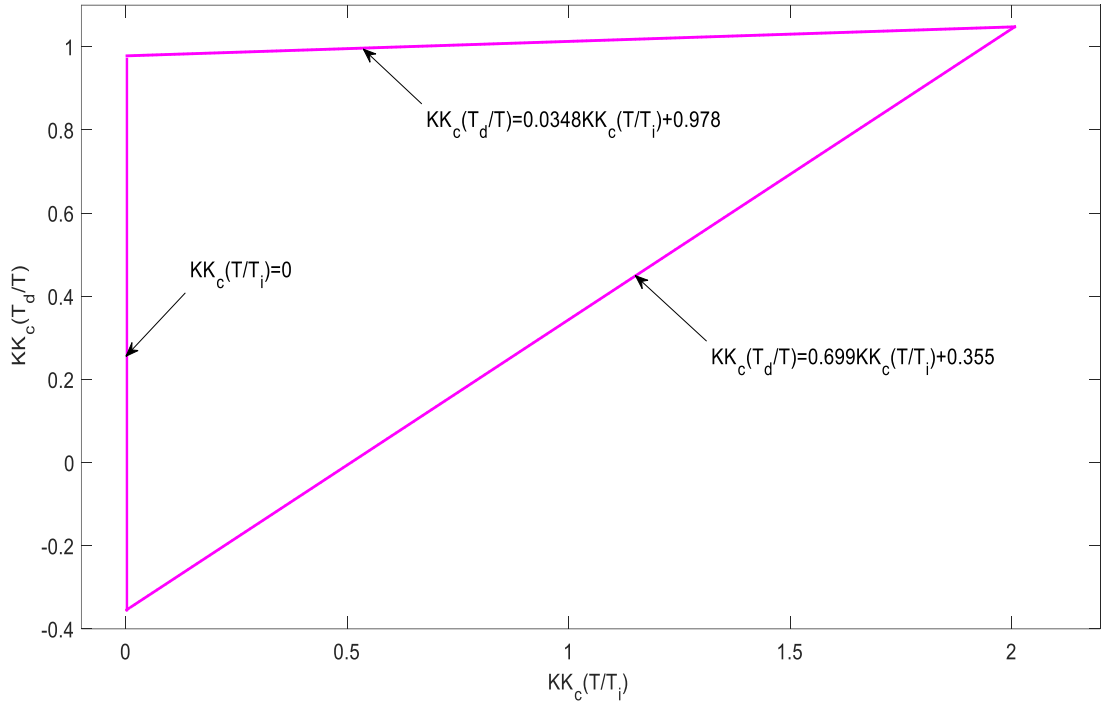
Şekil 3.29. Sabit $KK_c\left(T_d / T\right)$ değerleri için $\left(KK_c, KK_c\left(T / T_i\right)\right)$ düzleminde KSB'ler



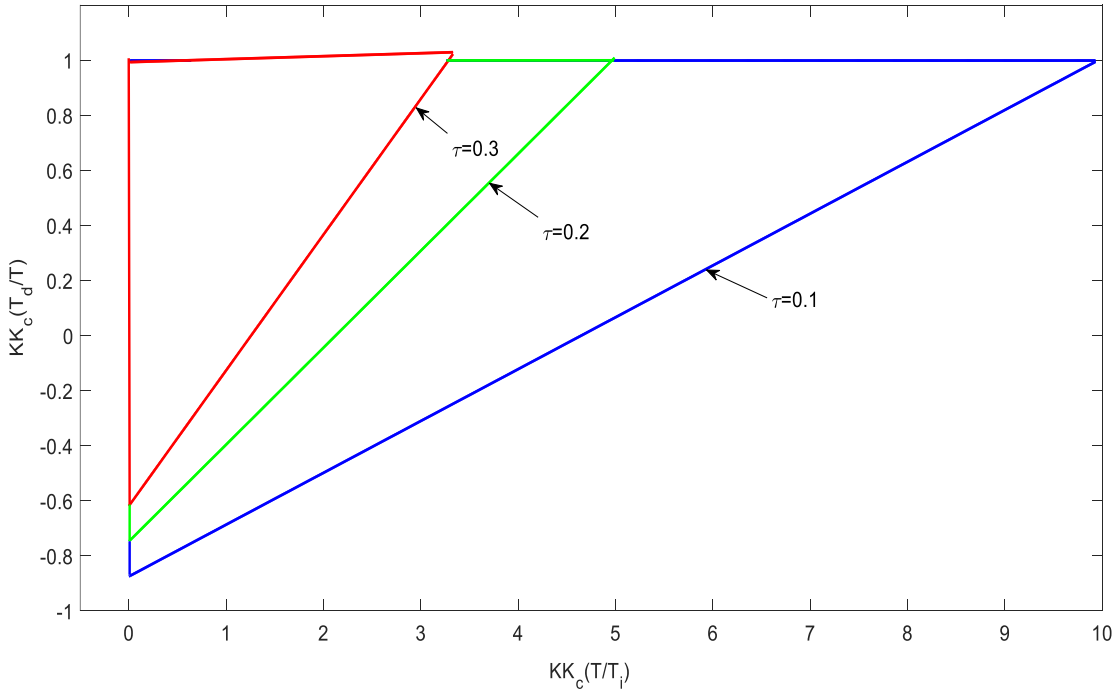
Şekil 3.30. Sabit $KK_c(T / T_i)$ değerleri için $\left(KK_c, KK_c\left(T_d / T\right)\right)$ düzleminde KSB'ler

$$
\begin{aligned}
l_1 &: \quad KK_c\left(T_d/T\right) = 0.0348\left(KK_c\left(T/T\right)_i\right) + 0.978 \\
l_2 &: \quad KK_c\left(T_d/T\right) = 0 \\
l_3 &: \quad KK_c\left(T_d/T\right) = 0.6992\left(KK_c\left(T/T\right)_i\right) - 0.3557 \\
l_4 &: \quad KK_c\left(T_d/T\right) = 0.6993\left(KK_c\left(T/T\right)_i\right) - 0.3559
\end{aligned} \tag{3.33}
$$

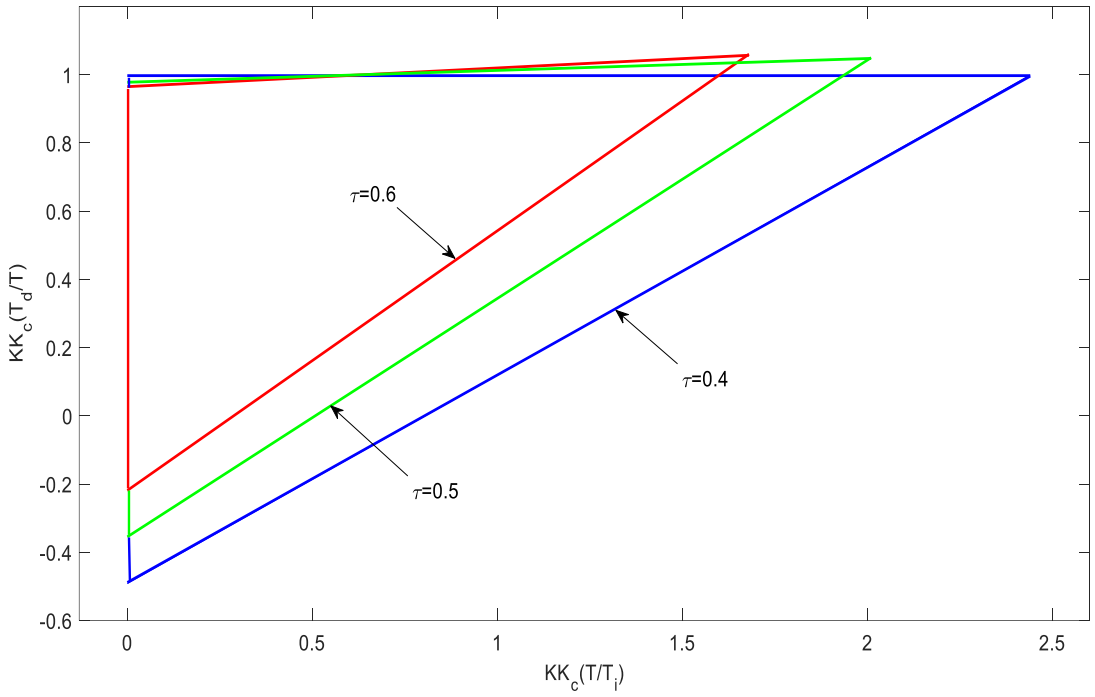
Elde edilen doğru denklemleri KK_c'nin 1.5 ve NEZG'nin 0.5 değeri için, $\left(KK_c\left(T/T_i\right), KK_c\left(T_d/T\right)\right)$ düzleminde KSB'nin oluşturulmasında kullanılabilir (Şekil 3.31.). Benzer şekilde, farklı NEZG değerlerine karşılık gelen KSB'ler Şekil 3.32., Şekil 3.33. ve Şekil 3.34.'te verilmiştir. Gerekli görüldüğü takdirde, farklı NEZG ve farklı KK_c değerleri için de KSB'ler çizilebilir. Böylelikle yaklaşım daha fazla genelleştirilebilir.



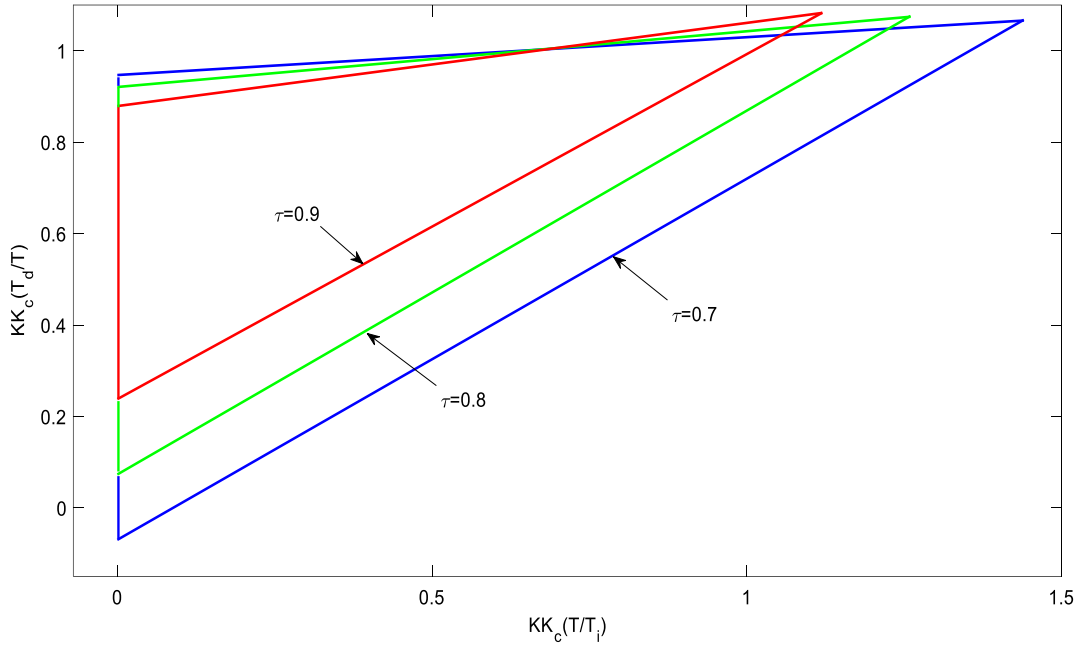
Şekil 3.31. $KK_c = 1.5$ ve $\tau = 0.5$ için $\left(KK_c\left(T/T_i\right), KK_c\left(T_d/T\right)\right)$ düzleminde KSB'ler



Şekil 3.32. Farklı NEZG değerleri ve $KK_c = 1.5$ için $\left(KK_c\left(T/T_i\right), KK_c\left(T_d/T\right)\right)$ düzleminde KSB'ler



Şekil 3.33. Farklı NEZG değerleri ve $KK_c = 1.5$ için $\left(KK_c\left(T/T_i\right), KK_c\left(T_d/T\right)\right)$ düzleminde KSB'ler



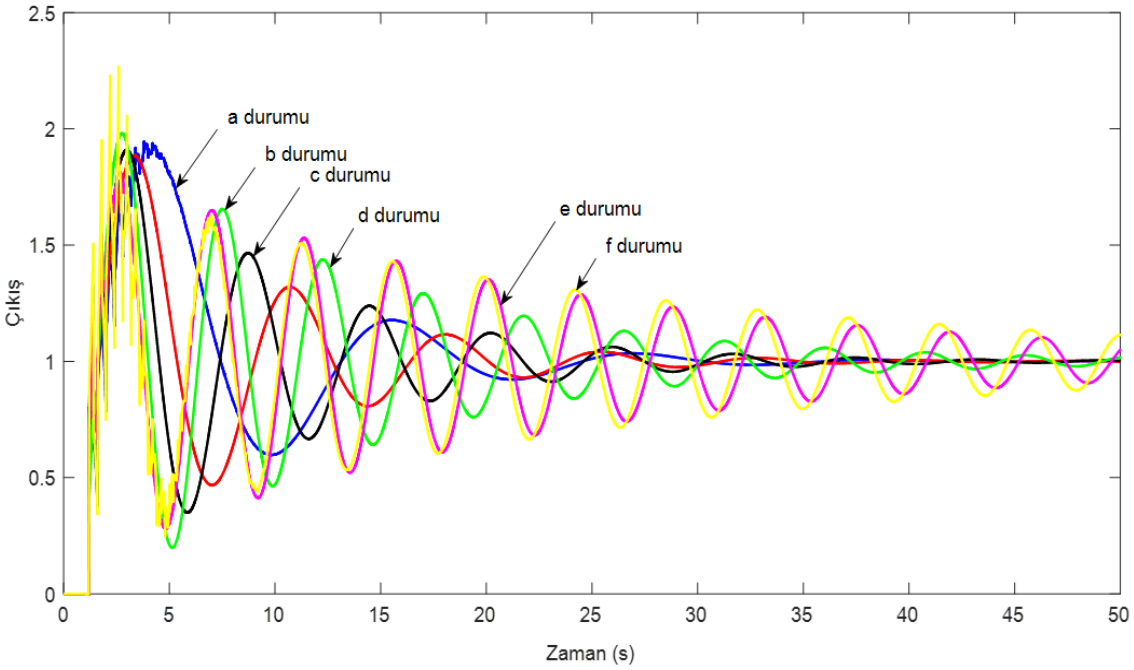
Şekil 3.34. Farklı NEZG değerleri ve $KK_c = 1.5$ için $\left(KK_c\left(T/T_i\right), KK_c\left(T_d/T\right)\right)$ düzleminde KSB'ler

- **UFOPDT Model ile Eşleşen Transfer Fonksiyona Sahip Bir Süreç Örneği**

Transfer fonksiyonu $G(s) = e^{-0.2s}/\left(s-1\right)$ olan süreci göz önüne alalım. Bu süreç için NEZG değeri $\tau = 0.2$'dir. Gerçek süreç transfer fonksiyonu, UFOPDT model transfer fonksiyonu ile tam olarak eşleştiği için Kaya ve Atherton (2001)'un röle geri beslemeli tanımlama metodu ile UFOPDT model transfer fonksiyonunun parametre değerleri tam olarak hesaplanacaktır. Şekil 3.32.'deki kararlılık sınırlı bölgesi grafiğinde $\tau = 0.2$ ile verilen bölge kapalı çevrim süreci kararlı yapan tüm PID kontrolör parametre değerlerinin hesaplanmasında kullanılabilir. Çizelge 3.8. KSB içerisinde seçilen noktalar ile hesaplanan PID kontrolör parametre değerlerini vermektedir. Bu örnek için; $K = 1$ ve $T = 1$ olduğundan kontrolör kazancı tüm durumlarda $K_c = 1.5$ olur. Bu sebeple K_c değeri çizelgede gösterilmemiştir. Hesaplanan PID kontrolör parametre değerleri ile kapalı çevrim sürecin birim basamak cevapları Şekil 3.35.'te gösterilmiştir. Elde edilen cevaplar, bölgenin gerçekten kararlılık bölgesini verdiğini göstermektedir.

Çizelge 3.8. Kararlılık bölgesinden seçilen bazı noktalar için hesaplanan kontrolör parametre değerleri

Durum	**Seçilen noktalar**		**Kontrolör parametre değerleri**	
	$KK_c\left(\frac{T}{T_i}\right)$	$KK_c\left(\frac{T_d}{T}\right)$	T_i	T_d
a	0.5	0.8	3	0.533
b	1	0.6	1.5	0.4
c	1.5	0.5	1	0.333
d	2	0.4	0.75	0.266
e	3	0.7	0.5	0.466
f	3.5	0.9	0.428	0.6

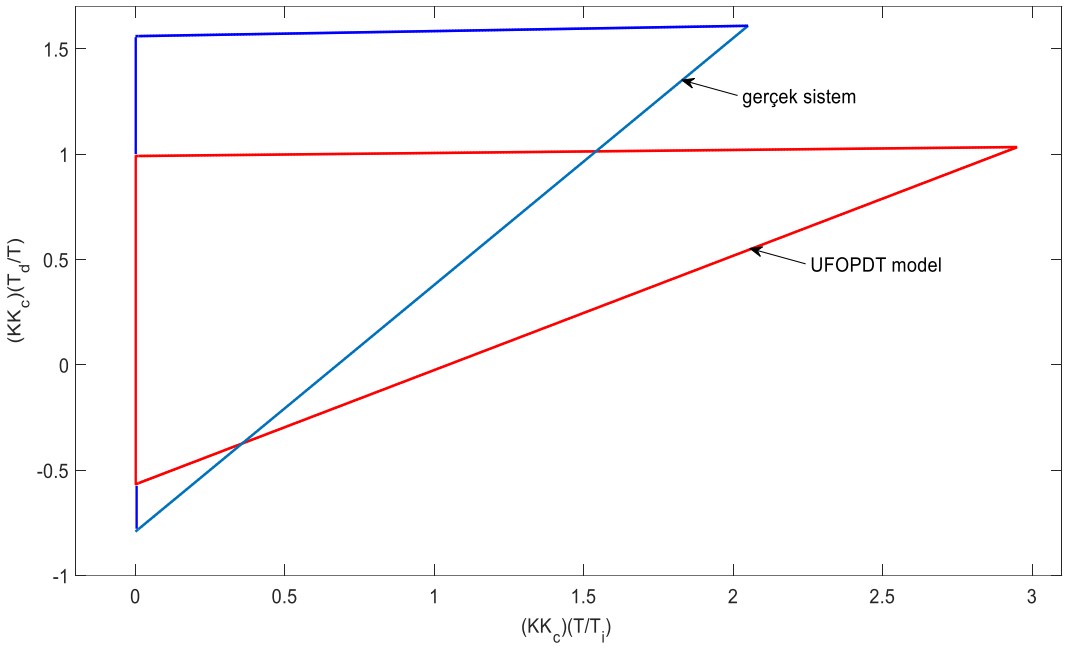


Şekil 3.35. Hesaplanan PID kontrolör parametre değerleri için kapalı çevrim cevapları

- **Yüksek Mertebeden Transfer Fonksiyonuna Sahip Bir Süreç Örneği**

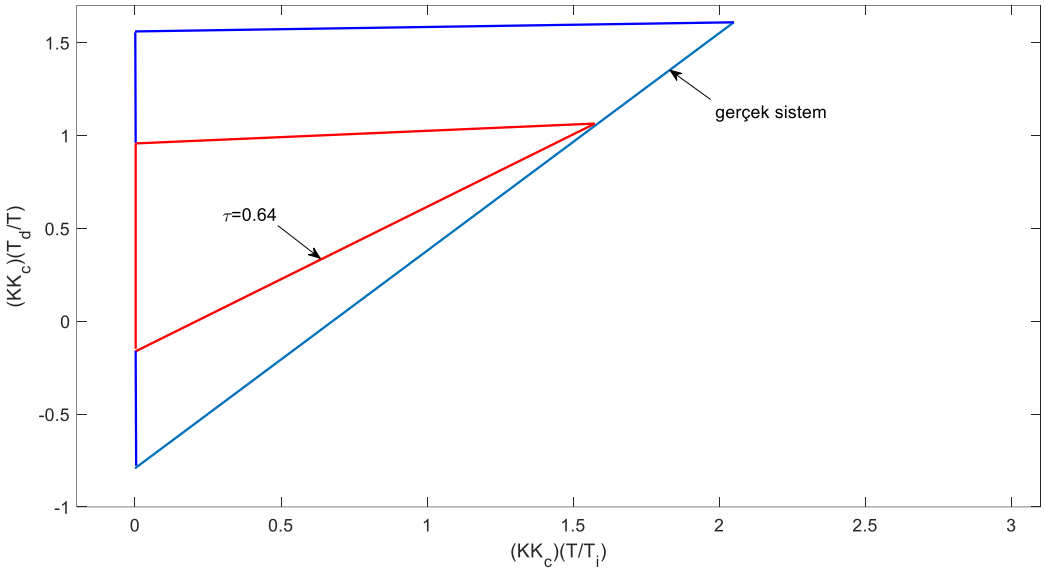
Bu örnekte $G(s)=e^{-0.5s}/(2s-1)(0.5s+1)$ ile verilen ikinci derece artı zaman gecikmeli bir süreç transfer fonksiyonu ele alınmıştır. Bu süreç transfer fonksiyonunun Kaya ve Atherton (2001)'un röle geri beslemeli tanımlama metodu kullanılarak UFOPDT modeli $G_m(s)=e^{-0.9184s}/(2.6956s-1)$ olarak elde edilir. UFOPDT model

transfer fonksiyonu için NEZG değeri $\tau = 0.34$'tür. Kapalı çevrim sürecin kararlılığı için tüm PID kontrolör parametrelerinin belirlenmesinden önce, gerçek süreç transfer fonksiyonunun KSB'si ile elde edilen UFOPDT model transfer fonksiyonunun KSB'sinin eşleşmesinin gösterilmesi uygun olacaktır (Şekil 3.36).



Şekil 3.36. Gerçek süreç ve UFOPDT model transfer fonksiyonlarının KSB'leri

Şekil 3.36.'da gerçek süreç transfer fonksiyonu için oluşturulan KSB ile UFOPDT model için oluşturulan KSB arasında farklılık olduğu görülmektedir. Bu durum, KSB içerisinden alınacak nokta ile belirlenecek PID ayar parametre değerlerinin sürecin kararsızlığına sebep olabileceğini göstermektedir. Bu sorunu gidermek için PID kontrolör parametrelerinin belirlenmesinde, geçerli UFOPDT modelin NEZG değeri için oluşturulmuş bölgeden daha dar bölge kullanılmalıdır. Bu amaçla, yapılan birçok uygulama sonucunda geçerli NEZG değerinin 0.3 fazlasıyla elde edilecek NEZG değeri ile oluşturulmuş bölgenin PID kontrolör parametrelerinin belirlenmesinde kullanılabileceği tespit edilmiştir. Şekil 3.37. geçerli NEGZ değerine 0.3 eklenmesiyle elde edilen NEZG değeri $\tau = 0.64$ için oluşturulan bölgenin PID kontrolör parametre değerlerinin belirlenmesinde kullanılabileceğini göstermektedir.

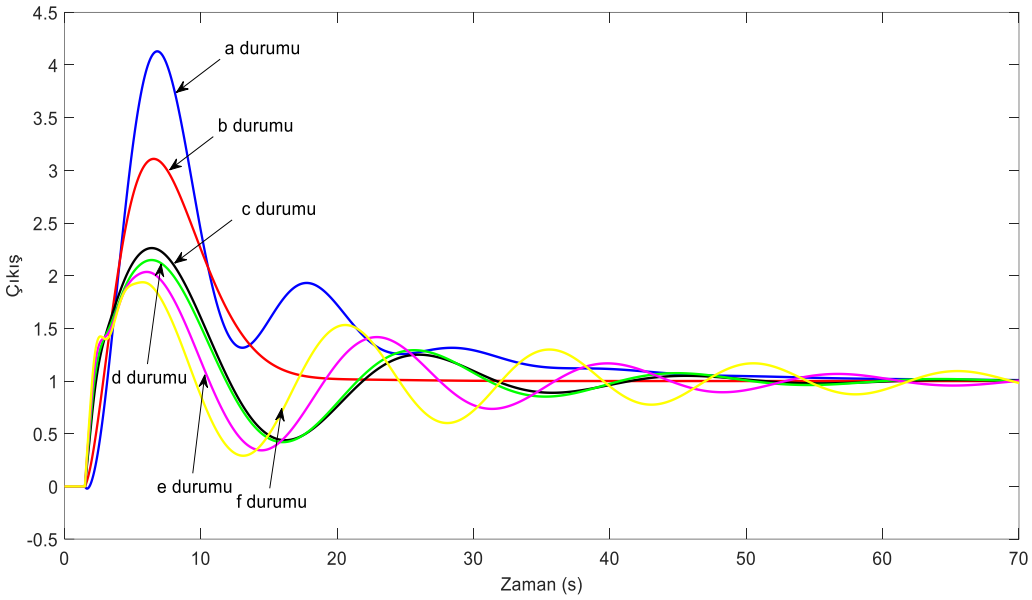


Şekil 3.37. Gerçek süreç ve NEZG değeri $\tau = 0.64$ için oluşturulan KSB'ler

Şekil 3.33.'teki GKSB grafiğinde geçerli NEZG değerinin 0.3 fazlasına en yakın değer olan NEZG değeri $\tau = 0.6$ için oluşturulmuş KSB, PID kontrolör parametrelerinin belirlenmesinde kullanılabilir. $\tau = 0.6$ için oluşturulan KSB kullanılarak elde edilen PID kontrolör parametre değerleri Çizelge 3.9.'da verilmiştir. Bu örnekte $K = 1$ ve $T = 2.6956$ olduğundan tüm durumlar için kontrolör kazancı $K_c = 1.5$ olur. Bu sebeple K_c değeri çizelgede gösterilmemiştir. Şekil 3.37.'de ise, hesaplanan PID kontrolör parametre değerleri ile kapalı çevrim birim basamak cevapları verilmiştir.

Çizelge 3.9. Kararlılık bölgesinden seçilen bazı noktalar için hesaplanan kontrolör parametre değerleri

Durum	**Seçilen noktalar**		**Kontrolör parametre değerleri**	
	$KK_c\left(\frac{T}{T_i}\right)$	$KK_c\left(\frac{T_d}{T}\right)$	T_i	T_d
A	0.1	-0.1	40.434	-0.179
B	0.2	0.1	20.217	0.179
C	0.6	0.5	6.739	0.898
D	0.7	0.6	5.776	1.078
E	1	0.7	4.043	1.257
F	1.4	0.8	2.888	1.437



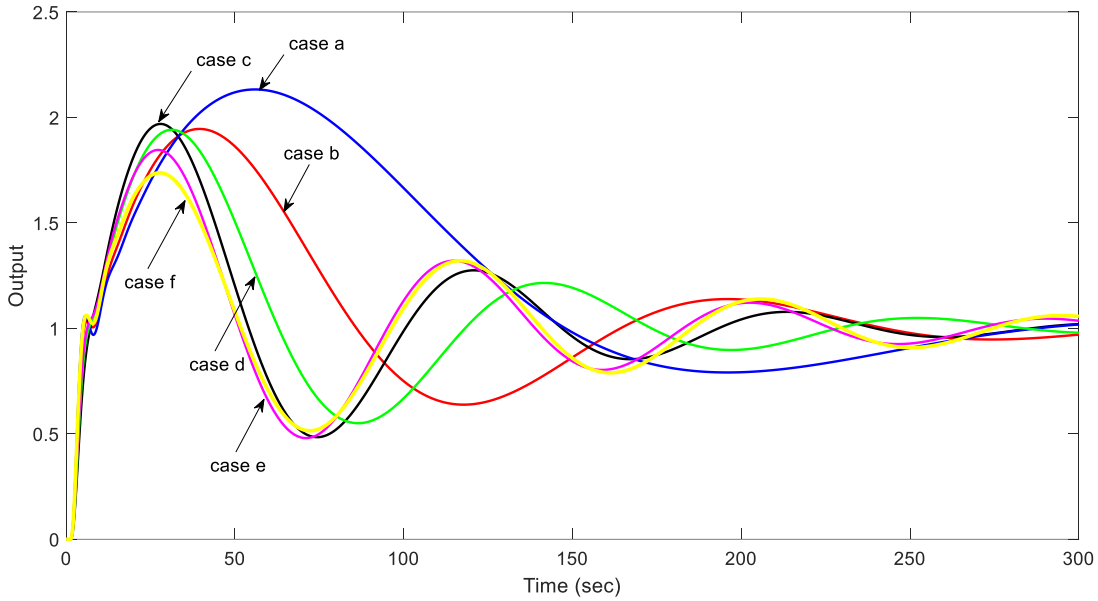
Şekil 3.38. Hesaplanan PID kontrolör parametre değerleri için kapalı çevrim cevapları

- **Yüksek Mertebeden Transfer Fonksiyonuna Sahip Bir Süreç Örneği**

Bu örnekte de yüksek mertebeden bir transfer fonksiyonu $G(s) = e^{-0.2s} / (10s-1)(s+1)^3$ verilmiştir. Süreç transfer fonksiyonunun UFOPDT modeli Kaya ve Atherton (2001)'un röle geri beslemeli tanımlama metodu kullanılarak $G_m(s) = e^{-2.8376s} / (15.4099s-1)$ olarak elde edilir. UFOPDT model transfer fonksiyonu için NEZG değeri $\tau = 0.1841$'tür. Örnek 2'de önerilenler doğrultusunda, geçerli NEZG değerinin 0.3 fazlasına en yakın değer olan $\tau = 0.5$ için oluşturulmuş KSB kullanılarak PID kontrolör parametre değerleri belirlenir. Bu bölge Şekil 3.33.'te gösterilmiştir. $\tau = 0.5$ için oluşturulan KSB'den seçilen PID kontrolör parametre değerleri Çizelge 3.10.'da verilmiştir. Şekil 3.38. ise hesaplanan PID kontrolör parametre değerleri ile kapalı çevrim birim basamak cevapları verilmiştir.

Çizelge 3.10. Kararlılık bölgesinden seçilen bazı noktalar için hesaplanan kontrolör parametre değerleri

Durum	**Seçilen noktalar**		**Kontrolör parametre değerleri**	
	$KK_c\left(\frac{T}{T_i}\right)$	$KK_c\left(\frac{T_d}{T}\right)$	T_i	T_d
a	0.2	0.9	115.57	9.245
b	0.5	0.8	46.228	8.218
c	1	0.5	23.114	5.136
d	0.8	0.6	28.89	6.163
e	1.3	0.65	17.78	6.677
f	1.5	0.85	15.4	8.732



Şekil 3.39. Hesaplanan PID kontrolör parametre değerleri için kapalı çevrim cevapları

3.2.3. İntegratör İçeren Zaman Gecikmeli Süreçler için PI ve PID Kontrolör Tasarımı

3.2.3.1 PI Kontrolör Tasarımı

Bu kısımda, açık çevrim integratör içeren artı zaman gecikmeli transfer fonksiyonuna sahip süreçler için GKSB ile TGTÇ kapalı çevrim bir süreci kararlı yapan tüm PI kontrolör parametre değerlerinin elde edilmesi açıklanmıştır.

Şekil 3.2.'deki TGTÇ kontrol sisteminde $C(s)$ ve $G(s)$ sırasıyla, PI kontrolör ve integratörlü süreç transfer fonksiyonlarını ifade etmektedir. İdeal PI kontrolör için transfer fonksiyonu (3.5) ile verilmektedir. Sürecin IFOPDT model ile verildiği kabul edilmiştir:

$$G(s) = \frac{Ke^{-\theta s}}{s(s+1)}. \tag{3.34}$$

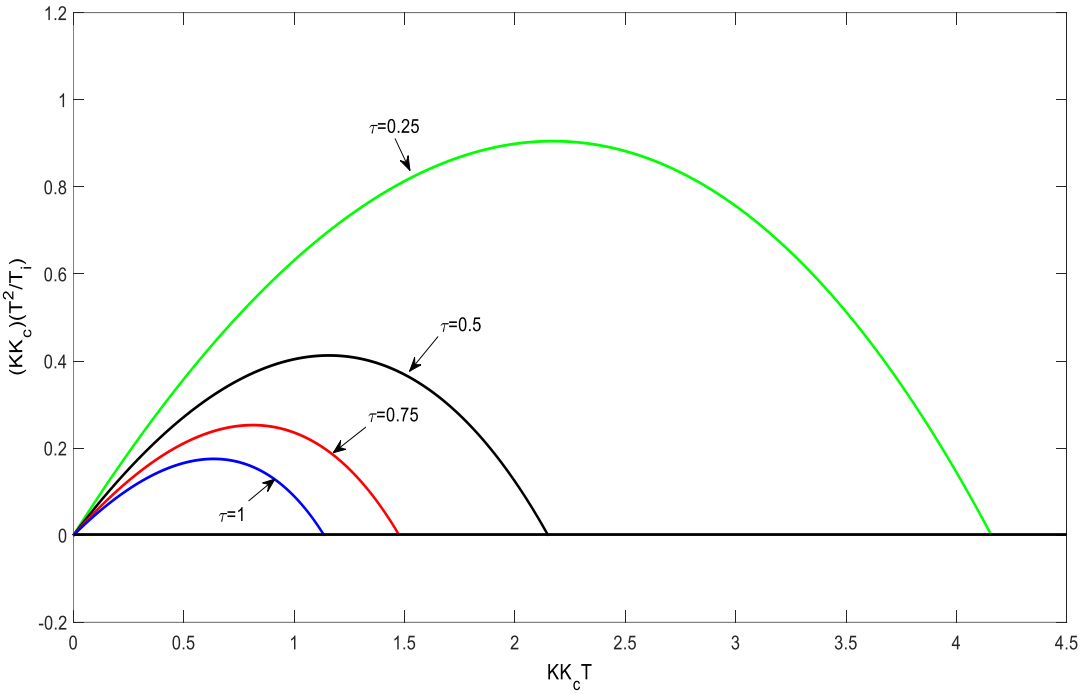
Bölüm 3.2.1.1.'de açıklanan prosedür takip edilerek integratör içeren süreçler için GKSB ile PI kontrolör tasarımı amacıyla aşağıda verilen denklemler elde edilebilir.

$$KK_c T = \omega \sin(\omega\tau) + \omega^2 \cos(\omega\tau) \tag{3.35}$$

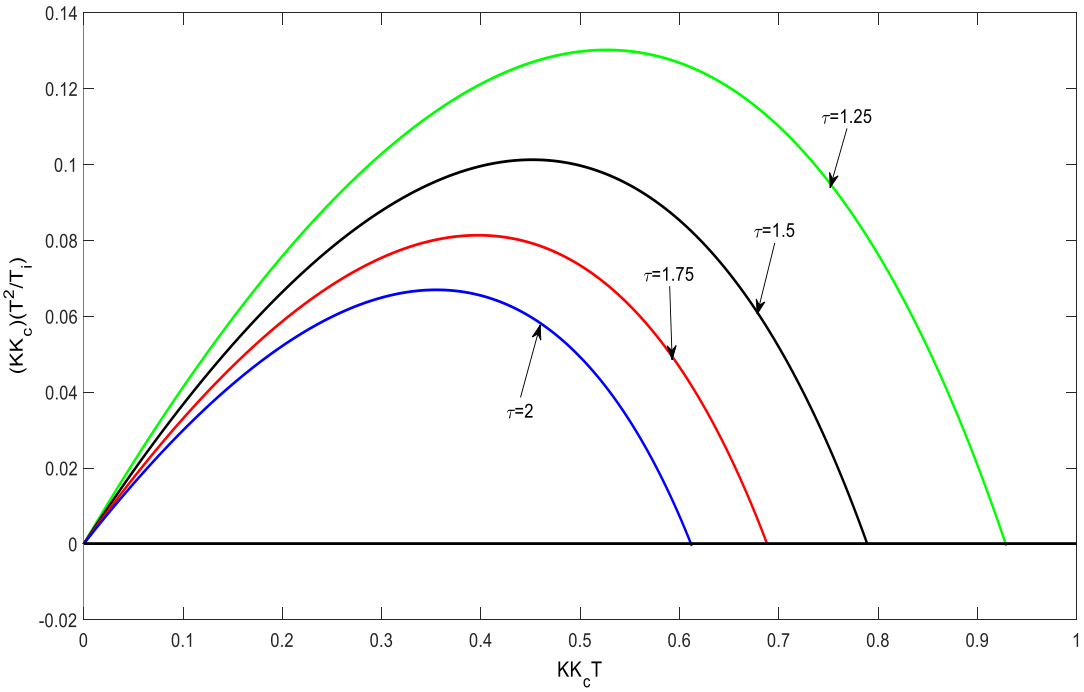
$$KK_c \frac{T^2}{T_i} = -\omega^3 \sin(\omega\tau) + \omega^2 \cos(\omega\tau) \tag{3.36}$$

(3.35) ve (3.36) eşitlikleri kullanılarak, belirlenen NEZG değeri, τ, için $\left(KK_c T, KK_c\left(T^2/T_i\right)\right)$ düzleminde kararlılık bölgesi oluşturulabilir. Bu iki denklemin sağladığı avantaj, daha önceki bölümlerde de açıklandığı gibi transfer fonksiyonunun değişmesiyle KSB'nin yeniden oluşturulması gerekliliğini ortadan kaldırmasıdır. IFOPDT model transfer fonksiyonu Kaya ve Atherton (2001)'un model tanımlama metodu ile elde edilmiştir.

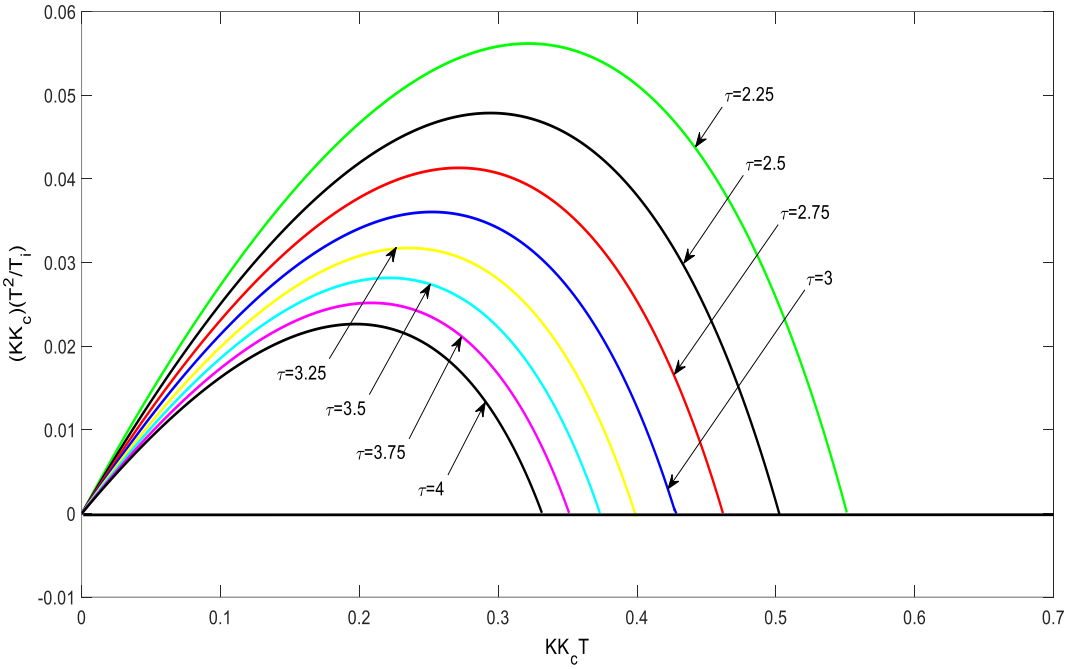
Süreç transfer fonksiyonunun IFOPDT modeli kullanılarak elde edilen genelleştirilmiş (3.35) ve (3.36) eşitlikleri ile PI kontrolör tasarımı için $\left(KK_c T, KK_c\left(T^2/T_i\right)\right)$ düzleminde GKSB'ler, Şekil 3.39., Şekil 3.40. ve Şekil 3.41.'te farklı NEZG değerleri için verilmiştir. Bu grafikler NEZG'nin daha geniş değerleri için de oluşturularak integratörlü süreçlerin kapalı çevrim kararlılığını sağlayan tüm PI kontrolör parametre değerlerinin belirlenmesinde kullanılabilir. Sonraki örnekler metodun kullanılışını göstermek içindir.



Şekil 3.40. NEZG'nin $0.25 \le \tau \le 1$ aralığındaki değerleri için KSB'ler



Şekil 3.41. NEZG'nin $1.25 \le \tau \le 2$ aralığındaki değerleri için KSB'ler



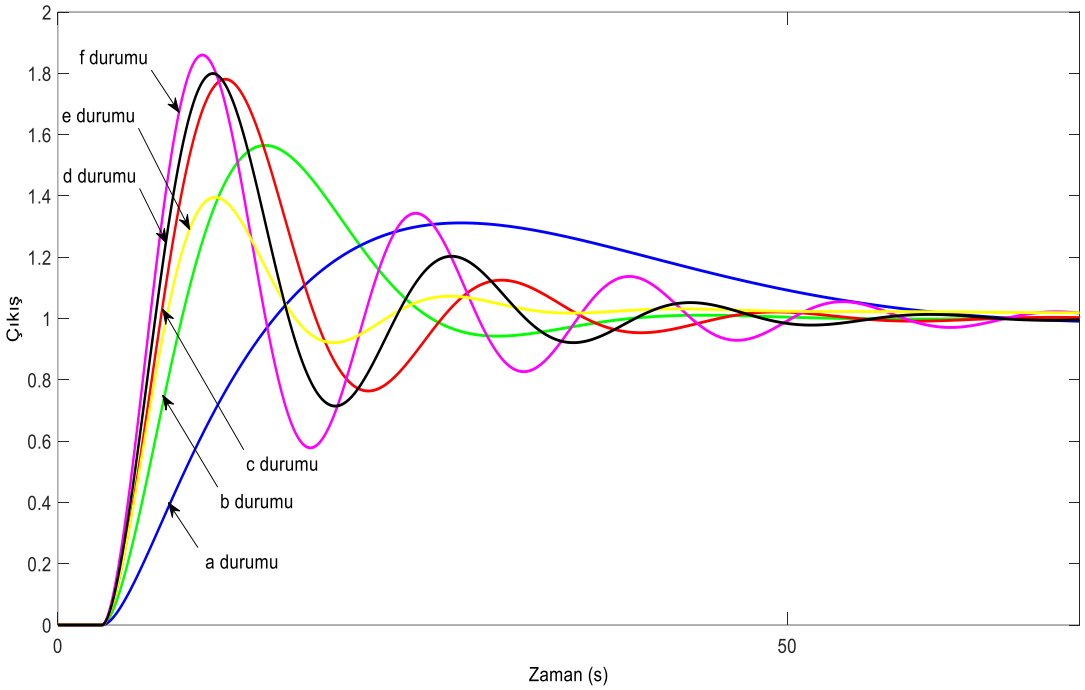
Şekil 3.42. NEZG'nin $2.25 \le \tau \le 4$ aralığındaki değerleri için KSB'ler

- **IFOPDT Model ile Eşleşen Transfer Fonksiyonuna Sahip Bir Süreç Örneği**

Transfer fonksiyonu $G(s) = G_m(s) = e^{-2s} / s(s+1)$ ile verilen bir süreç göz önüne alınmıştır. Bu süreç transfer fonksiyonunun NEZG değeri $\tau = 2$ ile verilmektedir. Burada, gerçek süreç transfer fonksiyonu, IFOPDT model transfer fonksiyonu ile tam olarak eşleştiği için Kaya ve Atherton (2001)'un röle geri beslemeli model tanımlama metodu, IFOPDT modelin parametre değerlerini tam olarak verecektir. Dolayısıyla, Şekil 3.40.'taki KSB grafiğinde $\tau = 2$ ile verilen bölge kapalı çevrim süreci kararlı yapacak olan tüm PI kontrolör ayar parametre değerlerinin hesaplanmasında kullanılabilir. Çizelge 3.11. $\tau = 2$ 'ye karşılık gelen KSB içerisinde seçilen noktalardan alınan değerler için PI kontrolör ayar parametre değerlerini özetlemektedir. Kapalı çevrim sürecin hesaplanan PI kontrolör ayar parametre değerleri ile birim basamak bir girişe verdiği cevaplar Şekil. 3.42'de gösterilmektedir. Daha önceki durumlarda olduğu gibi, kapalı çevrim sürecin basamak girişe verdiği cevaplar, KSB'nin gerçekten de kararlılık bölgesini verdiğini ispatlamaktadır.

Çizelge 3.11. Kararlılık bölgesinden seçilen bazı noktalar için hesaplanan kontrolör parametre değerleri

Durum	**Seçilen noktalar**		**Kontrolör parametre değerleri**	
	KK_cT	$(KK_c)(T^2/T_i)$	K_c	T_i
a	0.1	0.005	0.1	20
b	0.2	0.018	0.2	11.11111
c	0.29	0.028	0.29	10.35714
d	0.34	0.026	0.34	13.07692
e	0.4	0.024	0.4	16.66666
f	0.5	0.003	0.5	166.6666

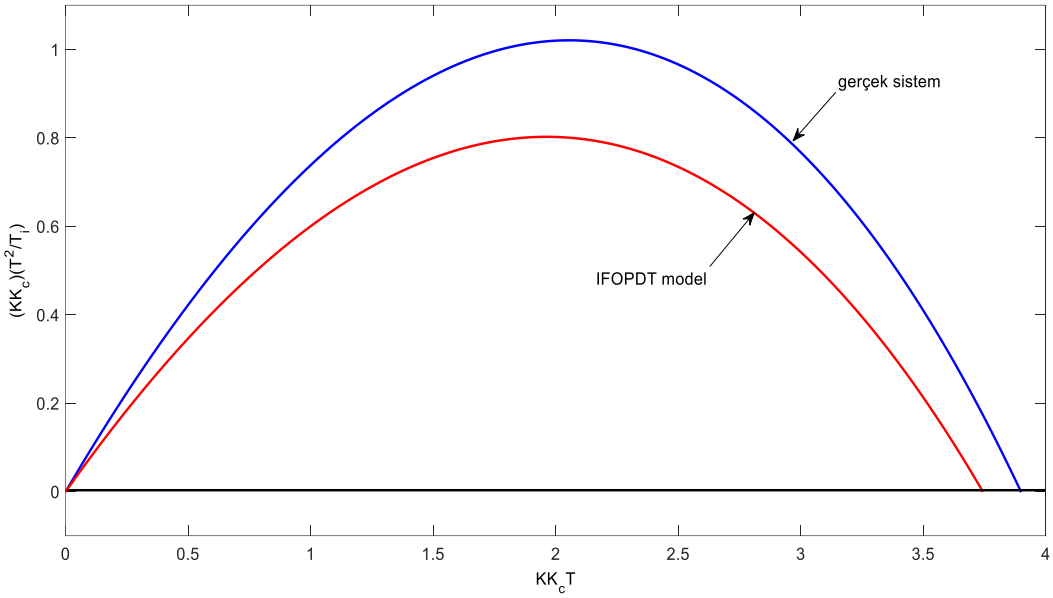


Şekil 3.43. Hesaplanan PI kontrolör parametre değerleri için kapalı çevrim cevapları

- **Yüksek Mertebeden Transfer Fonksiyonuna Sahip Bir Süreç Örneği**

Bu örnekte $G(s) = e^{-0.2s} / s(0.1s+1)(s+1.2)$ ile verilen yüksek mertebeli süreç transfer fonksiyonu ele alınmıştır. Bu süreç transfer fonksiyonunun, Kaya ve Atherton (2001)'un röle geri beslemeli model tanımlama metodu kullanılarak IFOPDT modeli $G_m(s) = 0.843e^{-0.299s} / s(1.072s+1)$ olarak elde edilir. IFOPDT model transfer

fonksiyonu için NEZG değeri $\tau = 0.2789$ ile verilir. Yine öncelikle, gerçek süreç transfer fonksiyonunun KSB'si ile elde edilen IFOPDT model transfer fonksiyonun KSB'sinin eşleşme derecesinin gösterilmesi uygun olacaktır. Şekil 3.43.'te bu benzerlik gösterilmiştir.



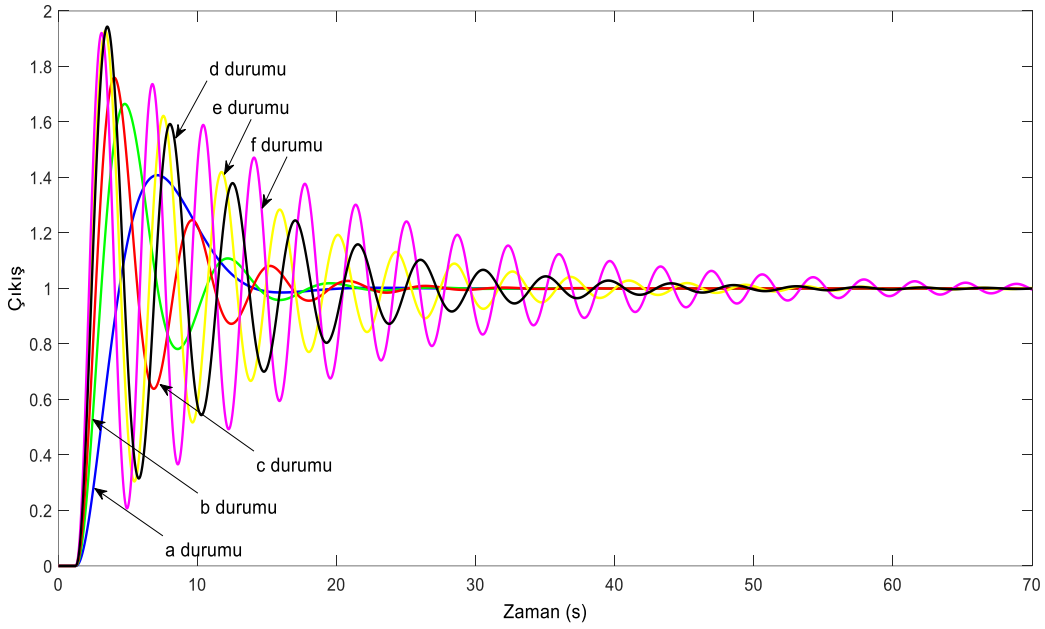
Şekil 3.44. Gerçek süreç ve IFOPDT model transfer fonksiyonlarının KSB'leri

Görüldüğü üzere IFOPDT model ile oluşturulan KSB, daha önceki iki durumun aksine, daima gerçek süreç transfer fonksiyonun kullanımı ile oluşturulan KSB'nin içinde kalmaktadır. Böylelikle, açık çevrim kararlı ve kararsız süreçlerin aksine, integratörlü süreçler için IFOPDT modelin kullanımı ile oluşturulan KSB ile ek bir düzenlemeye gerek kalmaksızın tüm PI kontrolör ayar parametre değerleri belirlenebilir.

IFOPDT model transfer fonksiyonunun NEZG değerine en yakın değer olan Şekil 3.39.'daki $\tau = 0.25$ için oluşturulmuş bölge PI kontrolör parametrelerin belirlenmesinde kullanılabilir (Aslında, daha küçük NEZG aralıkları için çizilecek olan kararlılık sınır bölgeleri ile $\tau = 0.2789$'a tam karşılık gelen bölge de kullanılabilir). $\tau = 0.25$ için oluşturulmuş KSB'den seçilen PI kontrolör parametre değerleri Çizelge 3.12.'de özetlenmiştir. Kapalı çevrim sürecin hesaplanan PI kontrolör ayar parametre değerleri ile birim basamak bir girişe verdiği cevaplar Şekil. 3.44'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.12. Kararlılık bölgesinden seçilen bazı noktalar için hesaplanan kontrolör parametre değerleri

Durum	**Seçilen noktalar**		**Kontrolör parametre değerleri**	
	KK_cT	$(KK_c)(T^2/T_i)$	K_c	T_i
a	0.5	0.1	0.553	5.36
b	1	0.3	1.107	3.573
c	1.5	0.4	1.660	4.040
d	2.2	0.6	2.434	3.931
e	2.5	0.5	2.766	5.360
f	3.2	0.2	3.541	17.152

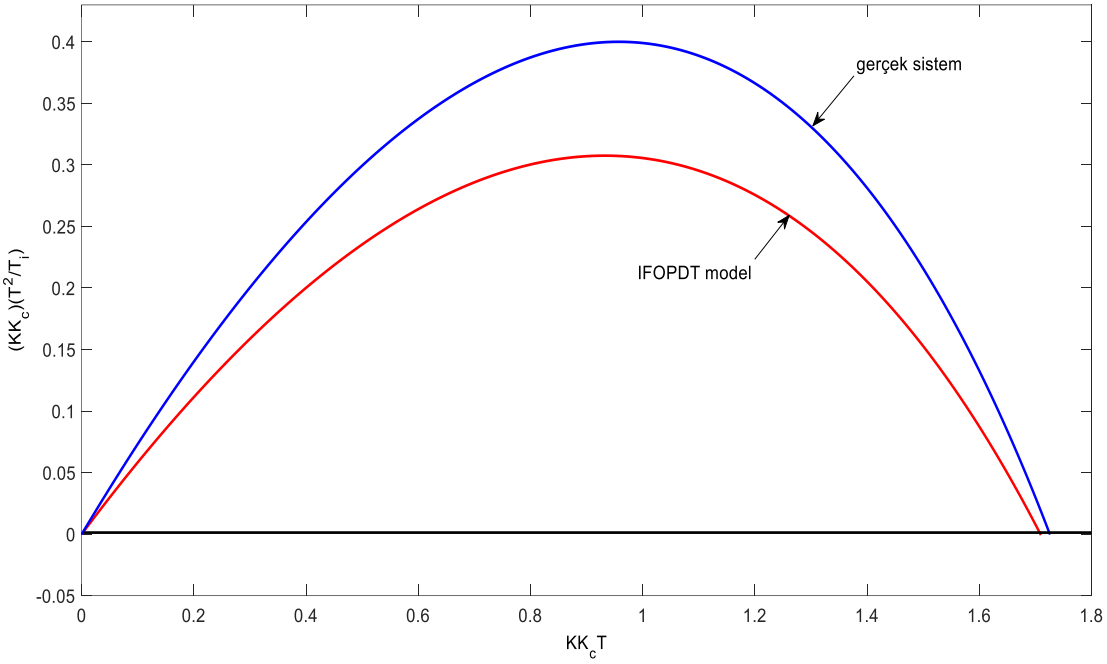


Şekil 3.45. Hesaplanan PI kontrolör parametre değerleri için kapalı çevrim cevapları

- **Yüksek Mertebeden Transfer Fonksiyonuna Sahip Bir Süreç Örneği**

Bu örnekte, bir başka yüksek mertebeden süreç transfer fonksiyonu $G(s) = e^{-0.5s} / s(s+1)(0.5s+1)(0.2s+1)(0.1s+1)$ ele alınmıştır. Süreç transfer fonksiyonunun IFOPDT modeli, Kaya ve Atherton (2001)'un röle geri beslemeli model tanımlama metodu kullanılarak $G_m(s) = e^{-1.123s} / s(1.756s+1)$ olarak elde edilir. IFOPDT model transfer fonksiyonu için NEZG değeri $\tau = 0.6395$ ile verilmektedir.

Gerçek süreç transfer fonksiyonunun KSB'si ile IFOPDT model transfer fonksiyonunun KSB'si arasındaki eşleşme derecesinin benzerliği Şekil 3.45.'te gösterilmiştir. Yine, IFOPDT model kullanılarak oluşturulan KSB'nin gerçek süreç transfer fonksiyonunun kullanılmasıyla oluşturulan KSB'nin daima içerisinde kaldığı görülmektedir.

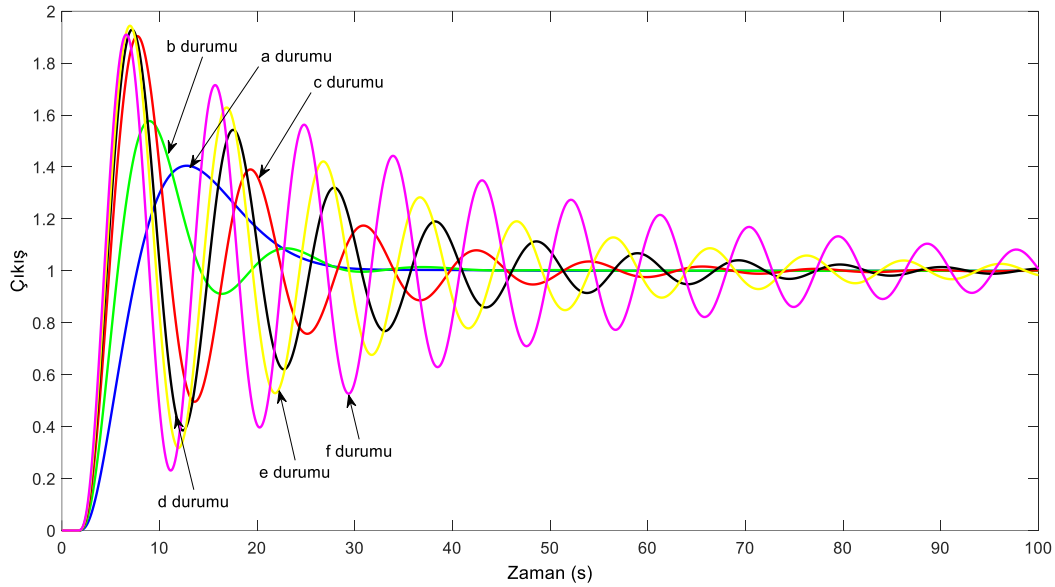


Şekil 3.46. Gerçek süreç ve IFOPDT model transfer fonksiyonlarının KSB'leri

Böylelikle, IFOPDT model transfer fonksiyonunun NEZG değerine en yakın değer olan Şekil 3.39.'daki $\tau = 0.5$ için oluşturulmuş bölge PI kontrolör ayar parametrelerin belirlenmesinde kullanılabilir. $\tau = 0.5$ için oluşturulmuş KSB kullanılarak elde edilen PI kontrolör parametre değerleri Çizelge 3.9.'da özetlenmiştir. Şekil 3.46.'da ise bulunan PI kontrolör ayar parametreleri ile kapalı çevrim sürecin birim basamak girişe verdiği cevapları gösterilmiştir.

Çizelge 3.13. Kararlılık bölgesinden seçilen bazı noktalar için hesaplanan kontrolör parametre değerleri

Durum	**Seçilen noktalar**		**Kontrolör parametre değerleri**	
	KK_cT	$(KK_c)(T^2/T_i)$	K_c	T_i
a	0.4	0.06	0.22779	11.70666
b	0.7	0.1	0.39863	12.292
c	1	0.2	0.56947	8.78
d	1.2	0.17	0.68337	12.39529
e	1.3	0.15	0.74031	15.21866
f	1.5	0.05	0.85421	52.68



Şekil 3.47. Hesaplanan PI kontrolör parametre değerleri için kapalı çevrim cevapları

3.1.2. PID Kontrolör Tasarımı

Şekil 3.2.'deki TGTÇ kontrol sisteminde $C(s)$ ve $G(s)$ sırasıyla bir PID kontrolörün ve integratörlü bir sürecin transfer fonksiyonlarını ifade etmektedir. İdeal PID kontrolörün transfer fonksiyonunun (3.22) ile süreç transfer fonksiyonunun ise (2.27) ile verilen IFOPDT model ile verildiği kabul edilmiştir.

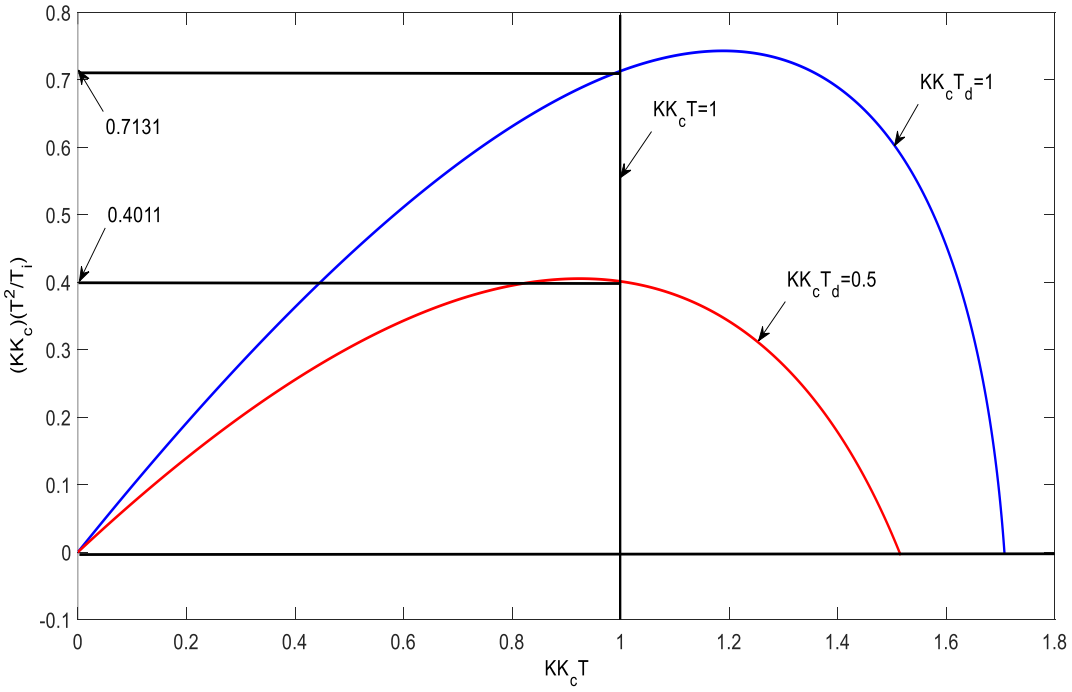
Bölüm 3.2.1.2.'de açıklanan prosedür takip edilerek integratör içeren zaman gecikmeli süreçler için GKSB ile PID kontrolör tasarımı amacıyla aşağıda verilen eşitlikler elde edilebilir.

$$KK_cT = \omega \sin(\omega\tau) + \omega^2 \cos(\omega\tau) \tag{3.37}$$

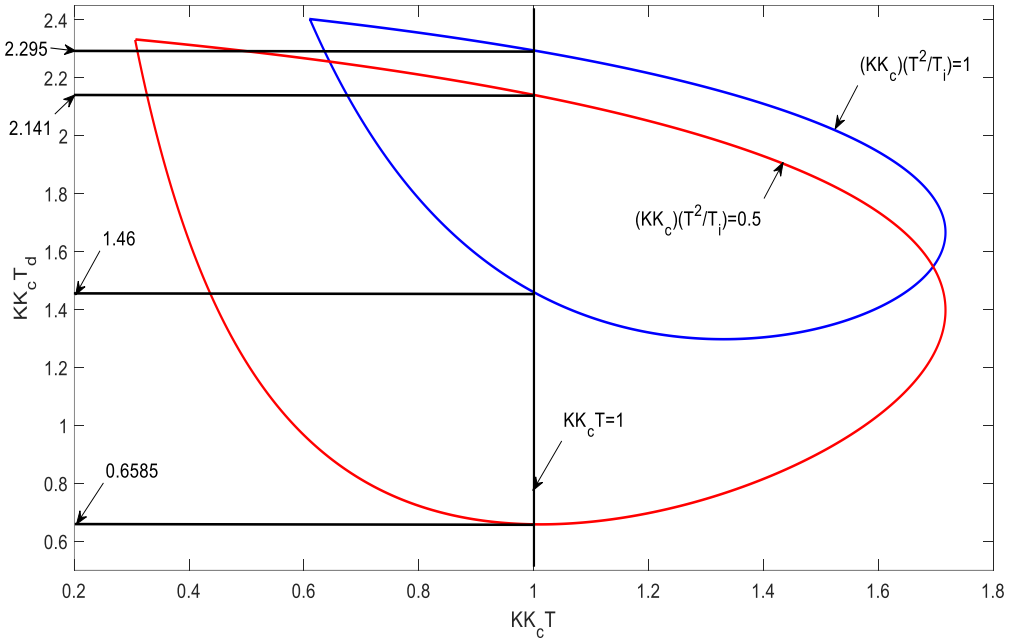
$$KK_c \frac{T^2}{T_i} = -\omega^3 \sin(\omega\tau) + \omega^2 \cos(\omega\tau) + \omega^2 KK_c T_d \tag{3.38}$$

$$KK_c T_d = \omega \sin(\omega\tau) - \cos(\omega\tau) + \omega^{-2} \frac{KK_c T^2}{T_i} \tag{3.39}$$

Şekil 3.47.'de $\left(KK_cT, KK_c\left(T^2/T_i\right)\right)$ düzleminde (3.37) ve (3.38) ile verilen denklemler kullanılarak belirli KK_cT_d değerleri için ve NEZG'nin $\tau = 1$ olduğu KSB'ler verilmiştir. Şekil 3.48.'de ise, $\left(KK_cT, KK_cT_d\right)$ düzleminde (3.37) ve (3.39) ile verilen denklemler kullanılarak belirli $KK_c(T^2/T_i)$ değerleri için ve NEZG'nin $\tau = 1$ olduğu KSB'ler çizilmiştir.



Şekil 3.48. Sabit KK_cT_d değerleri için $\left(KK_cT, KK_c\left(T^2/T_i\right)\right)$ düzleminde KSB'ler



Şekil 3.49. Sabit $KK_c\left(T^2/T_i\right)$ değerleri için $\left(KK_cT, KK_cT_d\right)$ düzleminde KSB'ler

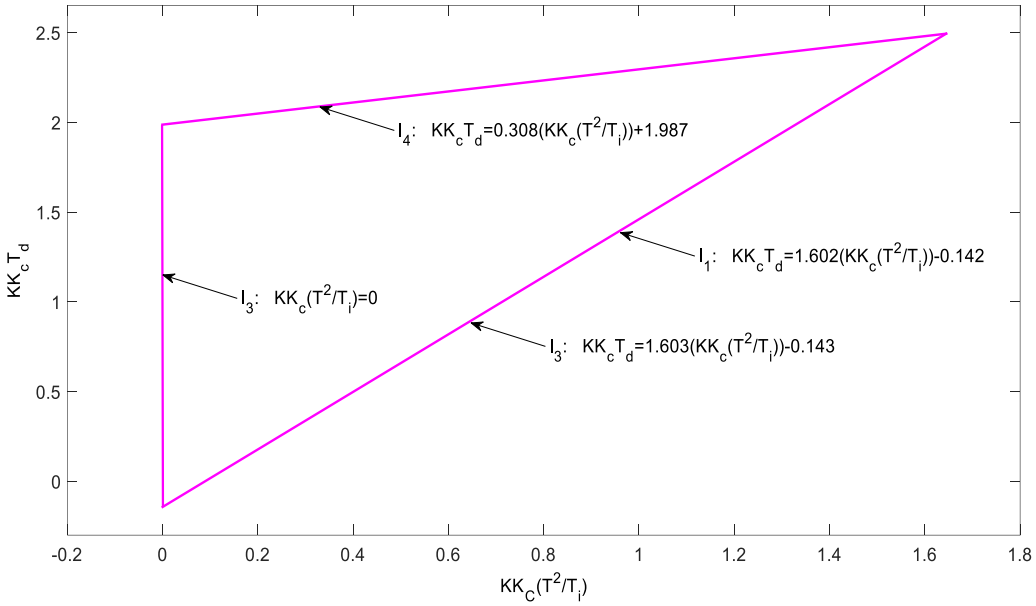
Bölüm 3.2.1.2.'deki prosedür takip edilerek, Şekil 3.47. ve Şekil 3.48.'in kullanımı ile KK_cT'nin 1 olduğu değere karşılık düşen $KK_c\left(T^2/T_i\right)$ ve KK_cT_d değerleri ile aşağıda ile verilen doğru denklemleri elde edilmiştir.

$$\begin{aligned} l_1:&\quad KK_cT_d = 1.602\left(KK_c\left(T^2/T\right)_i\right) - 0.142 \\ l_2:&\quad KK_c\left(T^2/T\right)_i = 0 \\ l_3:&\quad KK_cT_d = 1.603\left(KK_c\left(T^2/T\right)_i\right) - 0.143 \\ l_4:&\quad KK_cT_d = 0.308\left(KK_c\left(T^2/T_i\right)\right) + 1.987 \end{aligned} \tag{3.40}$$

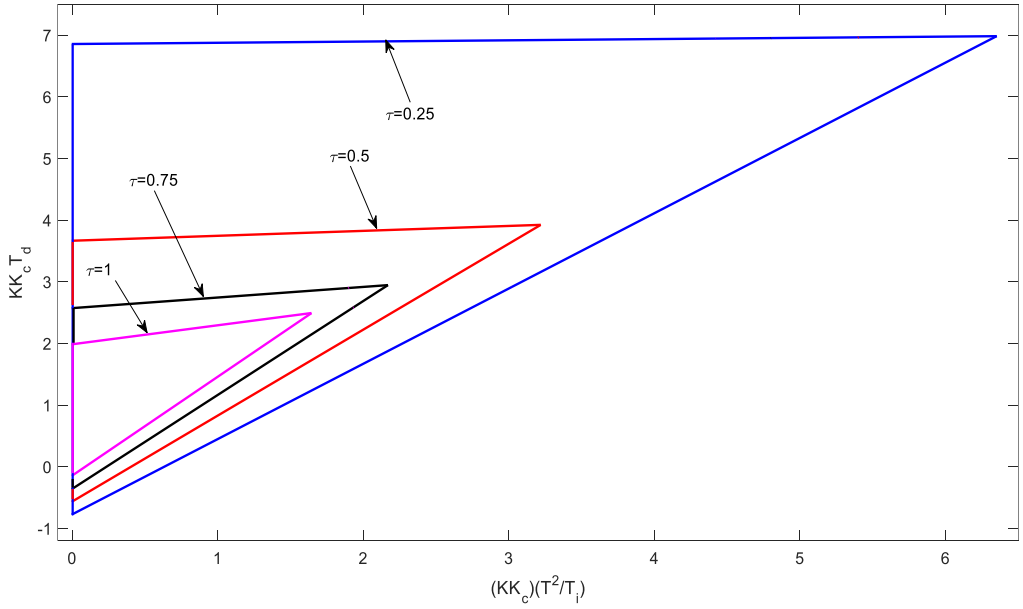
Elde edilen bu doğru denklemleri, $KK_cT = 1$ değeri ve NEZG'nin $\tau = 1$ değeri için, $\left(KK_c\left(T^2/T_i\right), KK_cT_d\right)$ düzleminde KSB'nin oluşturulmasında kullanılmıştır (Şekil 3.49.).

Daha önce de ifade edildiği gibi, PID kontrolör ayar parametre değerlerinin belirlenmesinde, ilk olarak bir kontrolör kazancı belirlenir. Sonra PID kontrolörlerin diğer iki ayar parametresi olan T_i ve T_d hesaplanır. Dolayısıyla, PID kontrolör tasarımı amacıyla $\left(KK_c\left(T^2/T_i\right), KK_cT_d\right)$ düzleminde farklı NEZG değerleri için KSB'lerin elde edilmesi gereklidir. Bu amaçla, Şekil 3.50.'de NEZG'nin $\tau = 0.75$, $\tau = 0.5$ ve $\tau = 0.25$

değerleri için KSB'ler verilmiştir. Gerekirse, farklı NEZG ve KK_cT değerleri için de KSB'ler çizilerek, yaklaşım daha fazla genel hale getirilebilir.



Şekil 3.50. $KK_cT=1$ ve $\tau=1$ için $\left(KK_c\left(T^2/T_i\right),KK_cT_d\right)$ düzleminde KSB'ler



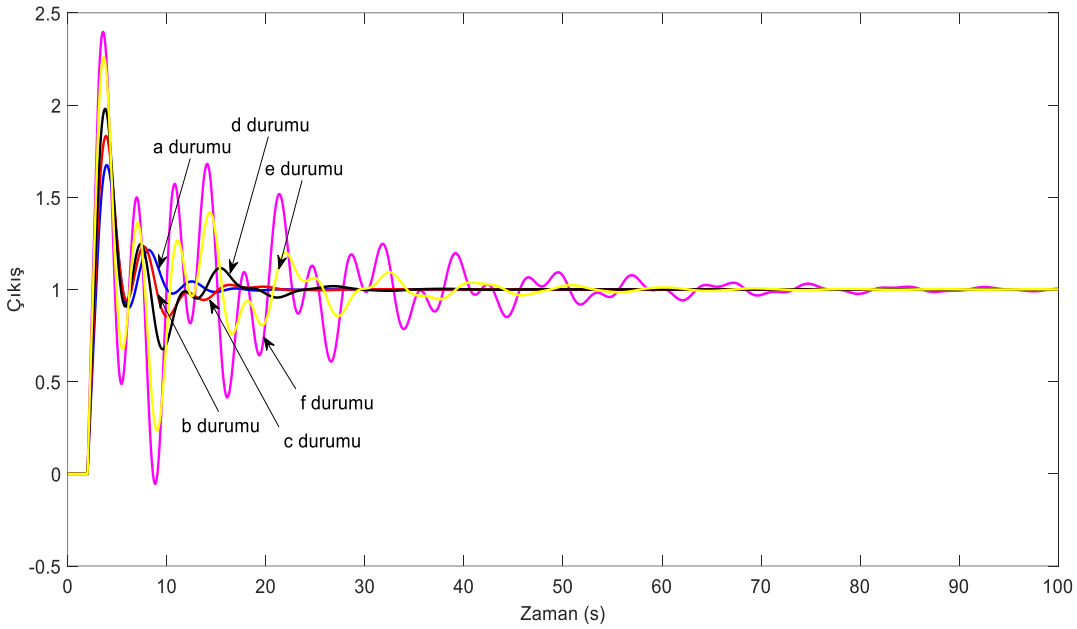
Şekil 3.51. NEZG'nin farklı değerleri ve $KK_cT=1$ için $\left(KK_c\left(T^2/T_i\right),KK_cT_d\right)$ düzleminde KSB'ler

- **IFOPDT Model ile Eşleşen Transfer Fonksiyonuna Sahip Bir Süreç Örneği**

Bu örnekte, transfer fonksiyonu $G(s) = e^{-s} / s(s+1)$ olan süreç ele alınmıştır. Bu süreç için NEZG değeri $\tau = 1$'dir. Gerçek süreç transfer fonksiyonu, IFOPDT model transfer fonksiyonu ile tam olarak eşleştiği için Kaya ve Atherton (2001)'un röle geri beslemeli model tanımlama metodu IFOPDT modelin parametre değerlerini tam olarak vereceğinden, Şekil 3.50.'deki KSB grafiğinde $\tau = 1$ için oluşturulan bölge kapalı çevrim süreci kararlı yapan tüm PID kontrolör ayar parametre değerlerinin belirlenmesinde kullanılabilir. Çizelge 3.14. $\tau = 1$'e karşılık gelen KSB içerisinde seçilen bazı noktalardan alınan değerler için PID kontrolör ayar parametre değerlerini vermektedir. Bu örnek için, $K = 1$ ve $T = 1$ olduğundan ve kontrolör kazancı tüm durumlarda $K_c = 1$ olacağından, K_c değeri çizelgede gösterilmemiştir. Hesaplanan PID kontrolör ayar parametre değerleri ile kapalı çevrim sürecin birim basamak girişe verdiği cevaplar Şekil 3.51.'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.14. Kararlılık bölgesinden seçilen bazı noktalar için hesaplanan kontrolör parametre değerleri

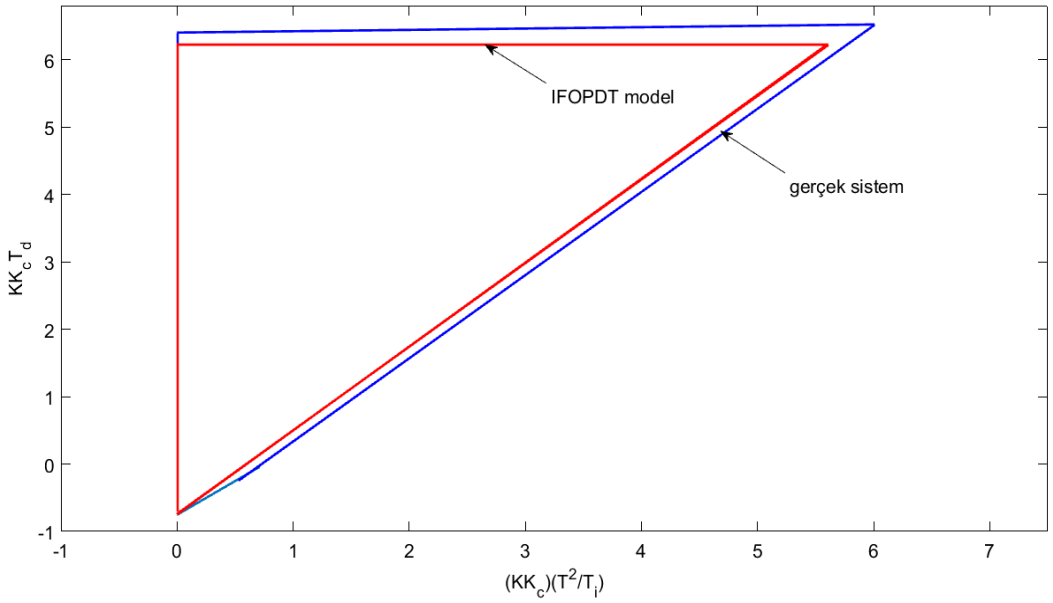
Durum	**Seçilen noktalar**		**Kontrolör parametre değerleri**	
	$KK_c\left(T^2 / T_i\right)$	KK_cT_d	T_i	T_d
a	0.2	1.2	5	1.2
b	0.4	1.4	2.5	1.4
c	0.6	1.6	1.66	1.6
d	0.8	1.8	1.25	1.8
e	1	2	1	2
f	1.2	2.2	0.83	2.2



Şekil 3.52. Hesaplanan PID kontrolör parametre değerleri için kapalı çevrim cevapları

- **Yüksek Mertebeden Transfer Fonksiyonuna Sahip Bir Süreç Örneği**

Bu örnekte $G(s) = e^{-0.2s} / s(0.1s+1)(s+1.2)$ ile verilen yüksek mertebeden bir süreç transfer fonksiyonu çalışılmıştır. Kaya ve Atherton (2001) tarafından verilen röle geri beslemeli model tanımlama metodu kullanılarak süreç transfer fonksiyonunun IFOPDT modeli $G_m(s) = 0.843e^{-0.299s} / s(1.072s+1)$ olarak elde edilir. IFOPDT model transfer fonksiyonuna ait NEZG değeri $\tau = 0.2789$ ile verilmektedir. Daha önceki durumlara benzer şekilde, öncelikle gerçek süreç transfer fonksiyonunun KSB'si ile elde edilen IFOPDT model transfer fonksiyonun KSB'sinin eşleşme derecesinin gösterilmesi uygun olacaktır (Şekil 3.52.).



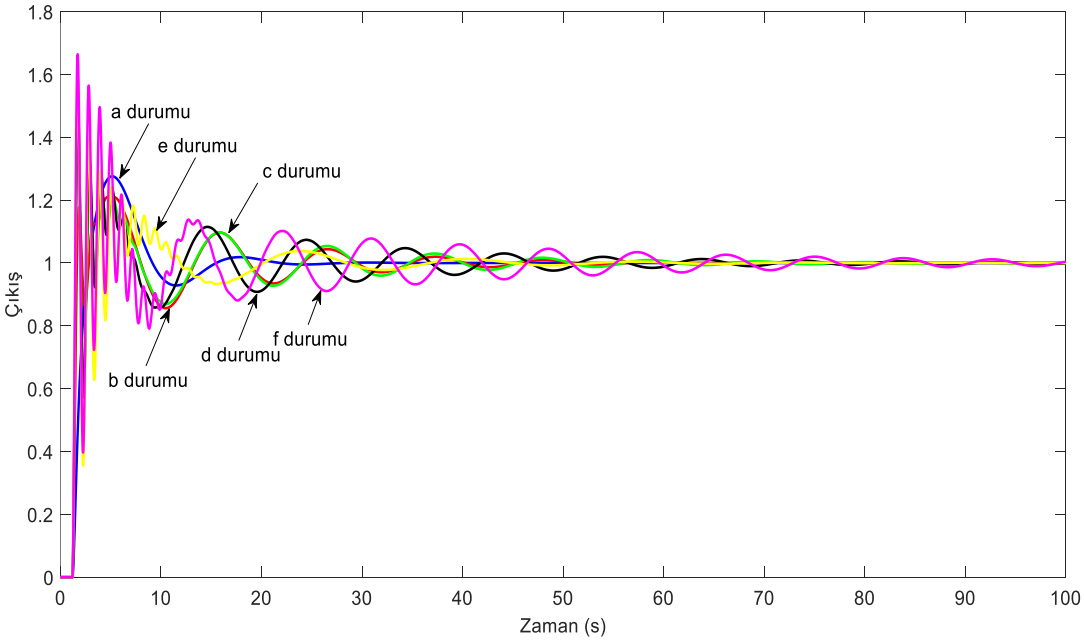
Şekil 3.53. Gerçek süreç ve IFOPDT model transfer fonksiyonlarının KSB'leri

Görüldüğü üzere gerçek süreç transfer fonksiyonu ile elde KSB, daima IFOPDT model transfer fonksiyonu ile elde edilen KSB'yi kapsamaktadır. Bu sonuç; KSB içerisinde alınacak her nokta için belirlenecek PID kontrolör ayar parametre değerlerinin, kapalı çevrim süreci kararlı yapacağı anlamını taşımaktadır.

Sonuç olarak, IFOPDT model transfer fonksiyonunun NEZG değerine en yakın değer olan Şekil 3.50.'deki $\tau = 0.25$ için oluşturulmuş bölge, PID kontrolör ayar parametrelerini belirlemek için kullanılabilir. Kararlılık bölgesi içerisinden seçilen bazı noktalar için belirlenen PID kontrolör ayar parametre değerleri Çizelge 3.15.'te verilmiştir. Bu örnekte $K = 0.843$ ve $T = 1.072$ olduğundan tüm durumlar için kontrolör kazancı $K_c = 1.106$ ile verileceğinden, K_c değeri çizelgede gösterilmemiştir. Hesaplanan PID kontrolör ayar parametre değerleri ile kapalı çevrim sürecin birim basamak girişe verdiği cevaplar Şekil 3.53.'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.15. Kararlılık bölgesinden seçilen bazı noktalar için hesaplanan kontrolör parametre değerleri

Durum	**Seçilen noktalar**		**Kontrolör parametre değerleri**	
	$KK_c\left(T^2/T_i\right)$	KK_cT_d	T_i	T_d
a	0.5	1	2.144	1.072
b	1.5	3	0.714	3.216
c	2	4.2	0.536	4.502
d	2.5	4.5	0.428	4.824
e	1	5	1.072	5.36
f	3.5	5.2	0.306	5.574



Şekil 3.54. Hesaplanan PID kontrolör parametre değerleri için kapalı çevrim cevapları

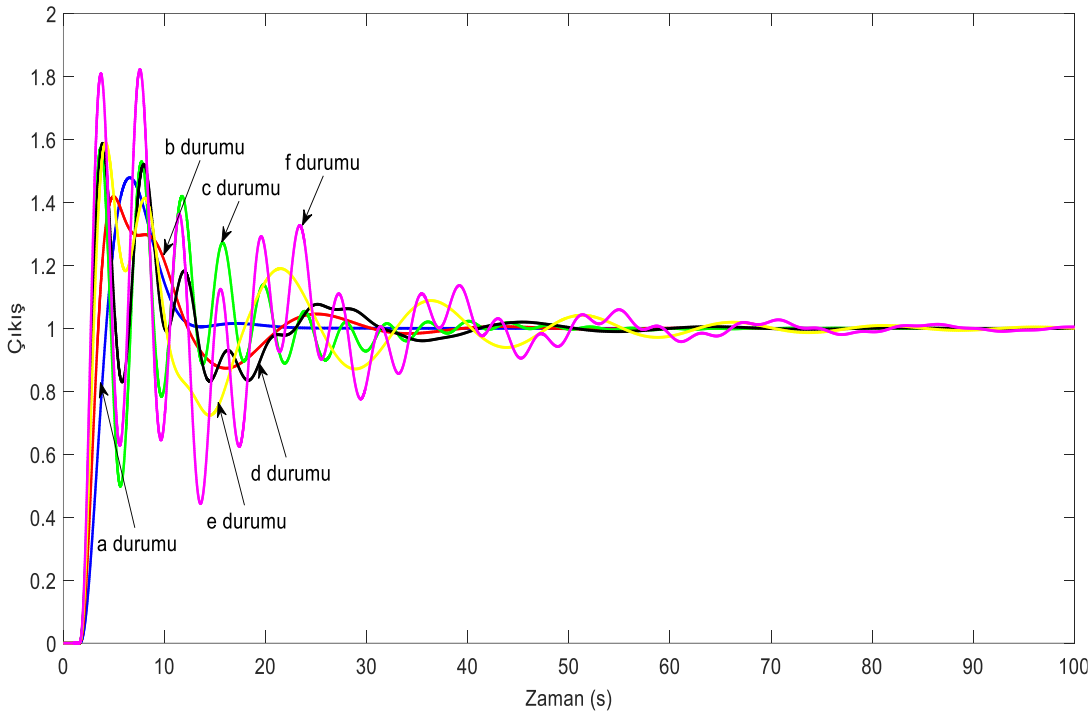
- **Yüksek Mertebeden Transfer Fonksiyonuna Sahip Bir Süreç Örneği**

Bu örnekte bir başka yüksek mertebeden bir transfer fonksiyonu $G(s)=e^{-0.5s}/s(s+1)(0.5s+1)(0.2s+1(0.1s+1)$ çalışılmıştır. Kaya ve Atherton (2001)'un röle geri beslemeli model tanımlama metodu kullanılarak IFOPDT model $G_m(s)=e^{-1.123s}/s(1.756s+1)$ olarak elde edilir. IFOPDT model transfer fonksiyonu için NEZG değeri $\tau=0.6395$'tür. IFOPDT model transfer fonksiyonunun NEZG

değerine en yakın değer olan Şekil 3.50.'deki $\tau = 0.75$ için oluşturulmuş bölge, PID kontrolör ayar parametrelerini belirlemek için kullanılabilir. Daha önce de ifade edildiği gibi, daha sık NEZG değerleri için KSB'ler elde edilebilir. Bu, hem önerilen yaklaşımı daha genel hale getirir, hem de kapalı çevrim süreci kararlı yapacak tüm PID ayar parametrelerinin daha doğru hesaplanmasına olanak verir. KSB'den seçilen bazı noktalar için belirlenen PID kontrolör parametre değerleri Çizelge 3.16.'da verilmiştir. Bu örnekte $K = 1$ ve $T = 1.756$ olduğundan tüm durumlar için kontrolör kazancı $K_c = 0.569$ olacaktır. Şekil 3.54.'de, belirlenen PID kontrolör ayar parametre değerleri ile kapalı çevrim sürecin birim basamak girişe verdiği cevapları gösterilmiştir.

Çizelge 3.16. Kararlılık bölgesinden seçilen bazı noktalar için hesaplanan kontrolör parametre değerleri

Durum	**Seçilen noktalar**		**Kontrolör parametre değerleri**	
	$KK_c\left(T^2/T_i\right)$	KK_cT_d	T_i	T_d
a	0.25	0.5	7.024	0.878
b	0.6	1.1	2.926	1.931
c	0.4	2.2	4.39	3.863
d	0.9	2	1.951	3.512
e	1.2	1.7	1.463	2.985
f	1.5	2.5	1.17	4.39



Şekil 3.55. Hesaplanan PID kontrolör parametre değerleri için kapalı çevrim cevapları

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, zaman gecikmeli açık çevrim kararlı, kararsız ve integratör içeren süreçleri kapalı çevrim kararlı yapacak tüm PI ve PID kontrolör parametrelerinin belirlenmesi için sunulan kontrolör tasarım metodunun açıklanışında ve örnekler ile kullanılışının gösterilmesinde elde edilen bulgulara yer verilmiştir.

Kararlı transfer fonksiyonuna sahip süreçler için GKSB ile PI kontrolör tasarımı amacıyla NEZG'nin belirli değerleri için KSB'ler oluşturulmuştur. Oluşturulan KSB'lerin verildiği Şekil 3.3., Şekil 3.4. ve Şekil 3.5. incelendiğinde NEZG değerinin artması ile KSB'nin küçüldüğü görülmektedir. Bu bölümde verilen örneklere ait sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Birinci örnekte gerçek süreç transfer fonksiyonu ile FOPDT model transfer fonksiyonu tam olarak eşleştiği için kullanılan model tanımlama metodu, FOPDT model parametrelerini tam olarak verir. Böylelikle KSB'den alınan noktalar ile kapalı çevrim sürecin kararlılığı için tüm PI kontrolör parametre değerleri belirlenebilir. Bu örnek için KSB içerisinde altı farklı noktadan alınan parametre değerleri için kapalı çevrim sürecin birim basamak cevaplarının verildiği Şekil 3.6. incelendiğinde özellikle b durumunda alınan nokta ile belirlenen PI kontrolör parametre değerlerinin daha iyi bir performans oluşturduğu görülmektedir. Bu sonuç, karalılık sınırı bölgesinden alınan noktanın, bölgenin merkezine yakın olması ile sürecin daha iyi bir kapalı çevrim performansı sergileyeceğini ortaya koymaktadır.

İkinci örnek incelendiğinde, verilen transfer fonksiyonun yüksek mertebeden olduğu görülmektedir. Dolayısıyla KSB ile PI kontrolör parametre değerlerinin belirlenebilmesi için FOPDT model transfer fonksiyonunun elde edilmesi gerekmektedir. FOPDT model ile gerçek süreç transfer fonksiyonunun KSB'lerinin benzerliğinin gösterilmesi için verilen Şekil 3.7. incelendiğinde, düşük frekans bölgelerinde oldukça yeterli bir eşleşme olmasına karşın kritik frekans değeri olan ω_C civarında yanlış eşleşme olduğu görülmektedir. Bu sebeple geçerli NEZG değeri yerine bir sonraki daha büyük NEZG değeri için oluşturulmuş bölge, tüm PI kontrolör parametrelerinin belirlenmesinde kullanılmıştır.

İkinci örnekte verilen süreci kararlı yapacak tüm PI kontrolör parametre değerlerinin belirlenmesi amacıyla kullanılacak KSB'den alınan altı nokta ile belirlenen

PI kontrolör parametre değerleri ile kapalı çevrim sürecin birim basamak cevaplarının verildiği Şekil 3.8. incelendiğinde; b ve c durumlarında alınan noktalar ile belirlenen PI kontrolör parametre değerlerinin daha iyi performans oluşturdukları görülmektedir. Bu sonuç, karalılık sınırı bölgesinden alınan noktanın, bölgenin merkezine yakın olması ile belirlenecek PI kontrolör parametreleri ile sürecin daha iyi bir kapalı çevrim performansı sergileyeceğini ortaya koymaktadır.

Üçüncü örnekte de yine yüksek mertebeden bir süreç transfer fonksiyonu verilmiştir. Bu süreci kararlı yapacak tüm PI kontrolör parametre değerlerinin belirlenmesi için kullanılan KSB'den alınan altı nokta için belirlenen kontrolör parametre değerleri ile kapalı çevrim sürecin birim basamak cevaplarının verildiği Şekil 3.9. incelendiğinde, b ve c durumlarında alınan noktalar ile belirlenen kontrolör parametre değerlerinin en iyi performansları oluşturduğu görülmektedir. Bu sonuç da, karalılık sınırı bölgesinden alınan noktanın, bölgenin merkezine yakın olması ile belirlenecek PI kontrolör parametreleri ile sürecin daha iyi kapalı çevrim performansı sergileyeceğini göstermektedir.

Kararlı transfer fonksiyonuna sahip süreçler için GKSB ile PID kontrolör tasarımı amacıyla belirli bir KK_c değeri için farklı NEZG değerleri kullanılarak KSB'ler oluşturulmuştur. Oluşturulan KSB'lerin verildiği Şekil 3.13. incelendiğinde NEZG değerinin büyümesi ile KSB'nin küçüldüğü görülmektedir. Bu bölümde verilen örneğe ait sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Örnekte yüksek mertebeden transfer fonksiyonuna sahip bir süreç verilmiştir. Verilen süreç için elde edilen FOPDT model ile tüm PID kontrolör parametre değerlerinin belirlenmesi sağlanmıştır. Bu örnekte de KSB'den alınan altı nokta için belirlenen PID kontrolör parametre değerleri ile kapalı çevrim sürecin birim basamak cevaplarının verildiği Şekil 3.14. incelendiğinde, KSB'nin merkezine yakın seçilen b,c ve d durumlarında alınan noktalar ile belirlenen kontrolör parametre değerlerinin en iyi performansları oluşturduğu görülmektedir. Bu örnekte de yine KSB'nin merkezine yakın noktalar kullanılarak belirlenecek kontrolör parametre değerlerinin daha iyi bir kapalı çevrim performansı sergileyeceği sonucu ortaya çıkmaktadır.

Kararsız transfer fonksiyonuna sahip süreçler için GKSB ile PI kontrolör tasarımı amacıyla NEZG'nin geniş aralığı için KSB'ler oluşturulmuştur. NEZG

değerinin artması ile KSB'nin küçüldüğü ayrıca NEZG'nin $\tau \geq 1$ olduğu durumlarda da KSB'nin oluşmadığı görülmektedir. Dolayısıyla NEZG değeri $\tau \prec 1$ için GKSB'ler oluşturulmuştur. Bu bölümde verilen örneklere ait sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Birinci örnekte gerçek süreç transfer fonksiyonu ile UFOPDT model transfer fonksiyonu tam olarak eşleştiği için kullanılan model tanımlama metodu, UFOPDT model parametrelerini tam olarak verir. Böylelikle KSB'den alınan noktalar ile kapalı çevrim süreci kararlı yapan tüm PI kontrolör parametre değerleri belirlenebilir. Bu örnek için KSB içerisinde altı farklı noktadan alınan parametre değerleri için kapalı çevrim sürecin birim basamak cevaplarının verildiği Şekil 3.6. incelendiğinde b ve c durumlarında alınan noktalar ile belirlenen parametre değerlerinin daha iyi performanslar oluşturduğu görülmektedir. Bu sonuç, karalılık sınırı bölgesinden alınan noktanın, bölgenin merkezine yakın olması ile sürecin daha iyi bir kapalı çevrim performansı sergileyeceğini ortaya koymaktadır. Aynı bölümdeki yüksek mertebeden transfer fonksiyonuna sahip süreçlerin verildiği ikinci ve üçüncü örnekte de KSB'lerden alınan noktalar ile belirlenen kontrolör parametre değerlerinin oluşturduğu kapalı çevrim birim basamak cevaplarının incelenmesi ile aynı sonuçların ortaya çıktığı görülmektedir.

Kararsız transfer fonksiyonuna sahip süreçler için GKSB ile PID kontrolör tasarımı amacıyla belirli bir KK_c değeri için geniş aralıktaki NEZG değerleri kullanılarak KSB'ler oluşturulmuştur. Oluşturulan KSB'lerin verildiği Şekil 3.32., Şekil 3.33. ve Şekil 3.34. incelendiğinde NEZG değerinin büyümesi ile KSB'nin küçüldüğü ve NEZG'nin $\tau \geq 1$ olduğu durumlarda da KSB'nin oluşmadığı görülmektedir. Bu bölümde verilen örneklerde KSB'lerden alınan noktalar ile belirlenen PID kontrolör parametre değerlerinin oluşturduğu kapalı çevrim birim basamak cevapları incelendiğinde, KSB'nin merkezinden alınacak noktalar ile belirlenecek PID kontrolör parametre değerleri ile sürecin daha iyi bir kapalı çevrim performansı ortaya koyacağı sonucuna varılır.

İntegratör içeren transfer fonksiyonuna sahip süreçler için GKSB ile PI kontrolör tasarımı amacıyla NEZG'nin belirli değerleri için KSB'ler oluşturulmuştur. Oluşturulan KSB'lerin verildiği Şekil 3.39., Şekil 3.40. ve Şekil 3.41. incelendiğinde NEZG değerinin artması ile KSB'nin küçüldüğü görülmektedir. Bu bölümde verilen birinci

örnekte IFOPDT model ile eşleşen transfer fonksiyonuna sahip bir süreç verildiği için önceki bölümlerdeki benzer bulgulara bu bölümde de rastlanır. İkinci ve üçüncü örneklerde ise yüksek mertebeden transfer fonksiyonuna sahip süreçler verilmiştir. Bu örneklerde gerçek süreç ve IFOPDT model transfer fonksiyonları için oluşturulmuş KSB'lerin benzerliğinin gösterildiği Şekil 3.43. ve Şekil 3.45. incelendiğinde, gerçek süreç transfer fonksiyonu ile oluşturulan KSB'nin IFOPDT model ile oluşturulan KSB'yi kapsadığı görülmektedir. Dolayısıyla IFOPDT model ile oluşturulan KSB ile tüm PI kontrolör parametre değerleri belirlenebilir. Ayrıca önceki bölümlerde verilen örneklerde rastlanan bulgulara bu bölümde verilen örneklerde de rastlanmaktadır.

İntegratör içeren transfer fonksiyonuna sahip süreçler için GKSB ile PID kontrolör tasarımı bölümünde de elde edilen verilerin incelenmesiyle benzer bulgulara rastlanmaktadır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, açık çevrim kararlı, kararsız ve integratör içeren transfer fonksiyonuna sahip süreçleri kapalı çevrim kararlı yapacak tüm PI ve PID kontrolör parametrelerinin belirlenmesi amacıyla genelleştirilmiş bir yaklaşım sunulmuştur.

Bu yaklaşımda, kontrolör tasarımı yapılacak olan süreç transfer fonksiyonu birinci mertebeden ise GKSB'ler ile sürecin kapalı çevrim kararlılığı için tüm PI ve PID kontrolör parametreleri belirlenebilir. Eğer kontrolör tasarımı yapılacak süreç transfer fonksiyonu yüksek mertebeden ise bu tür süreçler için transfer fonksiyonlarının modellenmesi gerekir. Bu amaçla kararlı transfer fonksiyonuna sahip süreçler için FOPDT, kararsız transfer fonksiyonuna sahip süreçler için UFOPDT ve integratör içeren transfer fonksiyonuna sahip süreçler için de IFOPDT model transfer fonksiyonları kullanılmalıdır. Kontrolör tasarımı yapılacak olan süreç transfer fonksiyonu yüksek mertebeden bir transfer fonksiyonu ise KSB'de seçilen noktalara dikkat etmek gerekir. Bu amaçla aşağıda verilen kurallar dikkate alınmalıdır.

Açık çevrim kararlı transfer fonksiyonuna sahip süreçler için elde edilen FOPDT modelin geçerli NEZG değeri yerine, bu değerin bir sonraki, daha büyük değeri için oluşturulmuş bölge, PI ve PID kontrolör parametrelerinin belirlenmesinde kullanılmalıdır.

Açık çevrim kararsız transfer fonksiyonuna sahip süreçler için PI ve PID kontrolör tasarımında elde edilen UFOPDT modelin geçerli NEZG değerine; PI kontrolör tasarımı için 0.1 ve PID kontrolör tasarımı için 0.3 eklenmesiyle elde edilecek NEZG değerine en yakın değer için oluşturulan bölge kontrolör parametre değerlerinin belirlenmesinde kullanılmalıdır.

Açık çevrim integratörlü transfer fonksiyonuna sahip süreçler için ise gerçek süreç transfer fonksiyonu KSB'si, IFOPDT model transfer fonksiyonu KSB'sini daima kapsadığından IFOPDT model transfer fonksiyonunun NEZG değeri ile oluşturulan bölge kapalı çevrim süreci kararlı yapacak tüm PI ve PID kontrolör parametrelerinin belirlenmesinde kullanılır. Böylelikle PI ve PID kontrolör parametrelerinin belirlenmesinde oluşabilecek hataların önüne geçilmiş olur.

Sunulan yaklaşım, süreç transfer fonksiyonunun değişmesiyle KSB'nin yeniden oluşturulma gerekliliğini ortadan kaldırmıştır. Elde edilen GKSB'ler ile açık çevrim kararlı, kararsız ve integratör içeren transfer fonksiyonuna sahip süreçleri kapalı çevrim

kararlı yapacak tüm PI ve PID kontrolör parametre değerleri belirlenebilir. Böylelikle bu yaklaşım PI ve PID kontrolör tasarımı konusunda yapılmış çalışmalara göre avantaj sunar.

Sonraki çalışmalarda KSB içerisinde, en iyi kapalı çevrim performansı verecek parametre değerlerinin elde edileceği nokta araştırılabilir.

6. KAYNAKLAR

Åström, K. J., Hägglund, T. 1984. Automatic tuning of simple regulators with specifications on phase and amplitude margins. Automatica, 20: 645-651.

Åström, K. J., Hagglund, T. 2001. The future of PID control. Control Engineering Practice, 9: 1163-1175.

Cohen, G.H., Coon, G.A. 1953. Theoretical considerations of retarded control. Transactions of ASME, 75: 827–834.

Deniz, F.N., Tan, N. Hamamcı S.E., Kaya İ. 2015. Stability region analysis in Smith predictor configurations using a PI controller. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 37(5): 606–614.

Huang. Y. J., Wang Y.J. 2000. Robust PID tuning strategy for uncertain plants based on the Kharitonov theorem. ISA Transactions, 39: 419-431.

Ho, M.T., Datta A., Bhattacharyya S.P. 1996. A new approach to feedback stabilization. Proceedings of the 35th CDC, 4: 4643–4648.

Ho, M.T., Datta A., Bhattacharyya S.P. 1997a. A linear programming characterization of all stabilizing PID controllers. Proceedings of American Control Conference, 6: 3922–3928.

Ho, M.T., Datta A., Bhattacharyya S.P. 1997b. A new approach to feedback design Part I: Generalized interlacing and proportional control. Department of Electrical Engineering, Texas A&M University, College Station, TX, Tech. Report TAMU-ECE97-001-A.

Ho, M.T., Datta A., Bhattacharyya S.P. 1997c. A new approach to feedback design Part II: PI and PID controllers. Dept. of Electrical Eng., Texas A& M Univ., College Station, TX, Tech. Report TAMU-ECE97-001-B.

Kaya, I., Atherton, D.P. 2001. Parameter estimation from relay autotuning with asymmetric limit cycle data. Journal of Process Control, 11: 429–439.

Kuo B.C. 2016. Otomatik kontrol sistemleri. John Wiley & Sons, 933, Illinois.

Morari, M., Zafiriou, E. 1989. Robust process control. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 479, New Jersey.

Munro, N., Söylemez, M.T. 2000. Fast calculation of stabilizing PID controllers for uncertain parameter systems. Proceedings of Symposium on Robust Control, Prague.

Sandeep, D.H., Yogesh, V.H. 2014. Design of PID controller for inverted pendulum using stability boundary locus. Annual IEEE India Conference (INDICON).

Shafiei, Z., Shenton, A.T. 1997. Frequency domain design of PID controllers for stable and unstable systems with time delay. Automatica, 33: 2223- 2232.

Smith, C. A., Corripio, A.B. 1997. Principles and practice of automatic process control. John Wiley & Sons, 768, New York.

Söylemez, M.T., Munro, N., Baki, H. 2003. Fast calculation of stabilizing PID controllers. Automatica, 39: 121- 126.

Tan, N., Kaya, I., Atherton, D. P. 2003. Computation of stabilizing Pl and PID controllers. Proceedings of the IEEE International Conference on the Control Applications (CCA2003), Istanbul, Turkey.

Tan, N. 2005. Computation of stabilizing PI and PID controllers for processes with time delay. ISA Transactions, 44: 213-223.

Zàvackà, J., Bakošovà, M. Matejičkovà, K. 2013. Robust PI controller design for a continuous stirred tank reactor with multiple steady-states. International Conference on Process Control (PC), 468-473.

Zhong, Q.C. 2006. Robust control of time-delay systems. Brownlow Hill, 231, Liverpool.

Zhuang, M. Atherton, D. P. 1993. Automatic tuning of optimum PID controllers. IEE Proceedings-D: Control Theory Applications, 140: 216-224.

Ziegler, J.G. Nichols, N. B. 1942. Optimum settings for automatic controllers. Transactions of the ASME, 64: 759–768.

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı: Serdal ATİÇ

Doğum Yeri: MARDİN

Doğum Tarihi: 04.04.1988

Medeni Hali: Bekâr

Yabancı Dili: İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl):

Lise: Batman Fatih Lisesi / Batman, 2005

Lisans: Fırat Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği / ELAZIĞ, 2010

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl:

Bitlis Eren Üniversitesi: Öğretim Görevlisi (2014-2015), Bitlis

Batman Üniversitesi: Öğretim Görevlisi (2015-Halen), Batman

T.C.
DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI İNTİHAL RAPORU FORMU

ÖĞRENCİ BİLGİLERİ	
ADI VE SOYADI	Serdal ATİÇ
ÖĞRENCİ NO	14805005
EĞİTİM – ÖĞRETİM YILI	2017 – 2018
YARIYIL	☐ Güz ☒ Bahar
ANABİLİM DALI	Elektrik Elektronik Mühendisliği
PROGRAM	Yüksek Lisans
TEZ KONUSU	PI ve PID Kontrolör Tasarımı için Genelleştirilmiş Kararlılık Bölgelerinin Oluşturulması
İNTİHAL RAPORU BİLGİLERİ	
RAPOR TÜRÜ	Tez Savunma Sınavı Sonrası
SAYFA SAYISI	86
BENZERLİK ORANI	% 22
RAPORLAMA TARİHİ	29/06/2018

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın kapak sayfası, giriş, ana bölümler, sonuç ve tartışma kısımlarından oluşan toplam 86 sayfalık kısmına ilişkin, 29/06/2018 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından *turnitin* adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan intihal raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 22 'dir.

Uygulanan filtrelemeler:

- ☐ Kabul/Onay sayfaları hariç,
- ☐ Kaynakça hariç
- ☐ Alıntılar hariç/dâhil
- ☐ Diğer

Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Programlarda Tez Çalışması İntihal Raporu Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edilmesi durumunda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

Serdal ATİÇ

29/06/2018 Prof. Dr. İbrahim KAYA **Tez Danışmanı**	29/06/2018 Prof. Dr. İbrahim KAYA **Anabilim Dalı Başkanı**