

**KARAKTERİSTİK ORAN ATAMA YÖNTEMİ İLE
KASKAD KONTROLÖR TASARIMI**



YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ahmet Can ERDEM

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Anabilim Dalı

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Programı

OCAK 2021

**KARAKTERİSTİK ORAN ATAMA YÖNTEMİ İLE
KASKAD KONTROLÖR TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ahmet Can ERDEM
(504171129)**

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Anabilim Dalı

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Müjde GÜZELKAYA

OCAK 2021

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 504171129 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Ahmet Can ERDEM, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “KARAKTERİSTİK ORAN ATAMA YÖNTEMİ İLE KASKAD KONTROLÖR TASARIMI” başlıklı tezini aşağıdaki imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Müjde GÜZELKAYA**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Gülay Öke GÜNEL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Cenk ULU
Yıldız Teknik Üniversitesi

.....

Teslim Tarihi : **14 Ocak 2021**
Savunma Tarihi : **16 Şubat 2021**





Aileme,



ÖNSÖZ

Yüksek lisans bitirme ve tasarım projesi altında yaptığım çalışmalarımı beni bu alana yönlendiren tez danışmanım, İstanbul Teknik Üniversitesi'nin değerli profesörlerinden Prof. Dr. Müjde GÜZELKAYA'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Prof. Dr. Müjde GÜZELKAYA'yla birlikte yardımlarını hiç eksik etmeyen Prof. Dr. İbrahim EKSİN, Araş. Gör. Erhan YUMUK ve Yük. Müh. Osman ÇAKIROĞLU'na da teşekkürü borç bilirim.

Maddi ve manevi her türlü desteğini esirgemeyen babam Recep ERDEM'e, annem Şengül ERDEM'e, ablam Tuğçe ERDEM DURSUN'a, eniştem Hakan DURSUN'a ve ailemize yeni katılan biricik yeğenim Burak DURSUN'a destekleri için minnettarım. Hem lisans hem de yüksek lisans tez çalışmalarımı bana verdiği fikirlerle desteğini eksik etmeyen Araş. Gör. Mehmet CANEVİ'ne de teşekkürlerimi sunarım. Benim bu günlere gelmemi sağlayan değerli hocalarıma; öğrenim hayatım boyunca kazandığım bütün arkadaşlarıma; iş hayatım boyunca kazandığım eski ve yeni çalışma arkadaşlarıma; özellikle projemin geliştirme safhasında yaşadığım olumlu olumsuz her anda yanımda bulunarak moral ve motivasyonumu arttıran arkadaşlarım Araş. Gör. Berk DUMAN, Gülşah KESGİN ve Yunus AYDIN'a teşekkür eder ve şükranlarımı sunmayı borç bilirim.

Ocak 2021

Ahmet Can ERDEM
(Elektrik ve Kontrol Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR.....	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı.....	1
1.2 Literatür Araştırması	2
1.3 Tez Organizasyonu	3
2. KASKAD KONTROL	5
2.1 Seri Kaskad Kontrol Yapısı (SKKY).....	5
2.2 Paralel Kaskad Kontrol Yapısı (PKKY)	6
3. KARAKTERİSTİK ORAN ATAMA YÖNTEMİ İLE KASKAD KONTROLÖR TASARIMI	9
3.1 Karakteristik Oran Atama Yöntemi.....	10
3.1.1 Karakteristik oran ve sönüm oranı ilişkisi.....	11
3.1.2 Yükselme zamanının ayarlanması	13
3.1.3 Genelleştirilmiş zaman sabiti yöntemi ile sistem hızının ayarlanması...	16
3.1.4 Zaman ölçeklendirme yöntemi ile sistem hızının ayarlanması	18
3.1.5 Sistem aşım değerinin ayarlanması	20
3.2 Referans İşaret İzleme Kontrolör Yapısı	23
3.3 Karakteristik Oran Atama Yöntemiyle Yüksek Mertebeden Kontrolör Tasarımı	25
3.3.1 Sıfırı bulunmayan sistemler için karakteristik oran atama yöntemiyle kontrolör tasarımı	26
3.3.2 Sol-yarı düzlemde sıfırı olan sistemler için karakteristik oran atama yöntemiyle kontrolör tasarımı	30
3.3.3 Sağ-yarı düzlemde sıfırı olan sistemler için karakteristik oran atama yöntemiyle kontrolör tasarımı	33
3.4 Karakteristik Oran Atama Yöntemiyle Kaskad Kontrolör Tasarımı	36
4. MODEL AYRIŞTIRMA TEMELLİ KASKAD KONTROLÖR TASARIMI	45
4.1 İç ve Dış Kontrol Yapıları.....	45
4.1.1 İç çevrim kontrol yapısı.....	46
4.1.2 Dış çevrim kontrol yapısı	48

4.1.2.1 Dış çevrimdeki sistemin birinci mertebeden integratör etkili ölü zamanlı sistem olması durumu	48
4.1.2.2 Dış çevrimdeki sistemin birinci mertebeden ölü zamanlı sistem olması durumu	50
4.1.2.3 Dış çevrimdeki sistemin ikinci mertebeden ölü zamanlı sistem olması durumu	50
4.2 Ölü Zamanlı Sistemler İçin Model Ayırıştırma Temelli Kontrolör Tasarımına İlişkin Benzetim Çalışmaları	53
4.2.1 Sıfırı olamayan sistemler için model ayırıştırma temelli kontrolör tasarımı	53
4.2.2 Sol-yarı düzlemde sıfırı olan sistemler için model ayırıştırma temelli kontrolör tasarımı	56
4.2.3 Sağ-yarı düzlemde sıfırı olan sistemler için model ayırıştırma temelli kontrolör tasarımı	59
5. KASKAD KONTROL YAPILARININ KARŞILAŞTIRILMASINA İLİŞKİN BENZETİM ÇALIŞMALARI	63
5.1 “Kaskad Model 1” için Kaskad Kontrolör Tasarımı.....	64
5.1.1 Model ayırıştırma temelli kaskad kontrolör tasarımı	64
5.1.1.1 İç ve dış çevrimde ölü zamanlı birinci mertebeden modellerin kullanılması.....	64
5.1.1.2 İç çevrimde ölü zamanlı birinci mertebeden modelin dış çevrimde ölü zamanlı ikinci mertebeden modelin kullanılması	71
5.1.2 Kaskad model 1 için karakteristik oran atama yöntemiyle kaskad kontrolör tasarımı	78
5.2 “Kaskad Model 2” için Kaskad Kontrolör Tasarımı.....	86
5.2.1 Model ayırıştırma temelli kaskad kontrolör tasarımı	86
5.2.1.1 İç ve dış çevrimde ölü zamanlı birinci mertebeden modellerin kullanılması.....	86
5.2.1.2 İç çevrimde ölü zamanlı birinci mertebeden modelin dış çevrimde ölü zamanlı ikinci mertebeden modelin kullanılması	92
5.2.2 Kaskad model 2 için karakteristik oran atama yöntemiyle kaskad kontrolör tasarımı	98
5.3 “Kaskad Model 3” için Kaskad Kontrolör Tasarımı.....	107
5.3.1 Model ayırıştırma temelli kaskad kontrolör tasarımı	107
5.3.1.1 İç ve dış çevrimde ölü zamanlı birinci mertebeden modellerin kullanılması.....	107
5.3.2 Kaskad model 3 için karakteristik oran atama yöntemiyle kaskad kontrolör tasarımı	114
5.4 “Kaskad Model 4” için Kaskad Kontrolör Tasarımı.....	124
5.4.1 Model ayırıştırma temelli kaskad kontrolör tasarımı	124
5.4.1.1 İç ve dış çevrimde ölü zamanlı birinci mertebeden modellerin kullanılması.....	124
5.4.2 Kaskad model 4 için karakteristik oran atama yöntemiyle kaskad kontrolör tasarımı	131
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	141
KAYNAKLAR.....	145

KISALTMALAR

BMÖZ	: Birinci Mertebeden Ölü Zamanlı
CDM	: Coefficient Diagram Method
CRA	: Characteristic Ratio Assignment
ITAE	: Integral Time Absolute Error
ITSE	: Integral Time Square Error
KOA	: Karakteristik Oran Atama
MAT	: Model Ayrıştırma Temelli
MATLAB	: MATrix LABoratory
MSCC	: Model Separation-based Cascade Controller
P	: Proportional
PI	: Proportional - Integral
PID	: Proportional - Integral - Derivative
PKKY	: Paralel Kaskad Kontrol Yapısı
Rİİ	: Referans İşaret İzleme
RST	: Referans Signal Tracking
SKKY	: Seri Kaskad Kontrol Yapısı



SEMBOLLER

α	: Karakteristik oranlar
α_1	: Temel karakteristik oran
Π	: Çarpım sembolü
b_i	: Ters karakteristik oranlar
c_i	: Ters karakteristik oranların birbirine oranı
d_1	: Giriş bozucusu
d_2	: Çıkış bozucusu
K_{1m}	: İç çevrimdeki sürecin kazancı
K_{2m}	: Dış çevrimdeki sürecin kazancı
K_{c1}	: İç çevrim kontrolörünün kazancı
K_{c2}	: Dış çevrim kontrolörünün kazancı
$L\{\}$	: Laplace dönüşümü
L_{1m}	: İç çevrimdeki sürecin zaman gecikmesi
L_{2m}	: Dış çevrimdeki sürecin zaman gecikmesi
r_1	: Birincil sistemin referans girişi
r_2	: İkincil sistemin referans girişi
s_p	: Kontrolör parametreleri sayısı
T	: Doğal frekansın tersi
T_{1m}	: İç çevrimdeki sürecin zaman sabiti
T_{2m}	: Dış çevrimdeki sürecin zaman sabiti
T_i	: İntegral kontrolörlerinin zaman sabitleri
t_r	: Yükselme zamanı
t_s	: Yerleşme zamanı
t_{say}	: Terim sayısı
u_2	: İkincil sistemin kontrol işareti
w_n	: Doğal frekans
γ_1	: İç çevrim kontrolörünün tasarım parametresi
γ_2	: İç çevrim kontrolörü için diğer tasarım parametresi
γ_3	: Dış çevrim kontrolörünün tasarım parametresi
ζ	: Sönüm oranı
θ	: Ölü zaman
π	: Pi sayısı
τ	: Genelleştirilmiş zaman sabiti



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1: Farklı α_1 değerleri için $\tau=1$ olması durumundaki n. mertebeden sistemlerin KOA yöntemine göre aşım değerleri.....	27
Çizelge 3.2: Farklı α_1 ve τ değerleri için yükselme zamanı ve ters aşım değerleri	35
Çizelge 5.1: İç ve dış çevrim sistem modelleri.....	63
Çizelge 5.2: Kaskad Model 1 için zaman bölgesi karakteristiklerinin karşılaştırılması.....	86
Çizelge 5.3: Kaskad Model 1 için bozucu bastırma başarımları	86
Çizelge 5.4: Kaskad Model 2 için zaman bölgesi karakteristiklerinin karşılaştırılması	107
Çizelge 5.5: Kaskad Model 2 için bozucu bastırma başarımları	107
Çizelge 5.6: Kaskad Model 3 için zaman bölgesi karakteristiklerinin karşılaştırılması	123
Çizelge 5.7: Kaskad Model 3 için bozucu bastırma başarımları	123
Çizelge 5.8: Kaskad Model 4 için zaman bölgesi karakteristiklerinin karşılaştırılması.....	140
Çizelge 5.9: Kaskad Model 4 için bozucu bastırma başarımları	140



ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 : Geleneksel seri kaskad kontrol yapısı.	6
Şekil 2.2 : Paralel kaskad kontrol yapısı.	7
Şekil 3.1 : Kessler'in çok çevrimli yapısının blok diyagramı.	11
Şekil 3.2 : Kessler'in 2 çevrimli kaskad sistemi.	12
Şekil 3.3 : Farklı genelleştirilmiş zaman sabitine sahip sistemlerin birim basamak cevabı.	15
Şekil 3.4 : $G_1(s)$ sisteminin birim basamak cevabı.	17
Şekil 3.5 : $G_1(s)$, $G_2(s)$ ve $G_3(s)$ sistemlerinin birim basamak cevapları.	18
Şekil 3.6 : $G_1(s)$, $G_2(s)$ ve $G_3(s)$ sistemlerinin kutup sıfır dağılımı.	18
Şekil 3.7 : $G_1(s)$ sisteminin birim basamak.	19
Şekil 3.8 : $G_1(s)$, $G_2(s)$ ve $G_3(s)$ sistemlerinin birim basamak cevapları.	20
Şekil 3.9 : $G_1(s)$, $G_2(s)$ ve $G_3(s)$ sistemlerinin birim basamak cevapları.	22
Şekil 3.10 : $G_1(s)$, $G_2(s)$ ve $G_3(s)$ sistemlerinin kutup sıfır dağılımı.	22
Şekil 3.11 : Rİİ kontrolör yapısı.	23
Şekil 3.12 : Modifiye edilmiş Rİİ kontrolör yapısı.	23
Şekil 3.13 : Rİİ kontrolör yapısı.	25
Şekil 3.14 : İndirgenmiş Rİİ kontrolör yapısı.	25
Şekil 3.15 : $G(s)$ sisteminin birim basamak cevabı.	28
Şekil 3.16 : $\tau = 3$ ve $\alpha_1 = 2.5$ durumunda kapalı çevrim birim basamak cevabı.	29
Şekil 3.17 : $\tau = 2.68$ ve $\alpha_1 = 2.5$ durumunda kapalı çevrim birim basamak cevabı.	29
Şekil 3.18 : $G(s)$ sisteminin birim basamak.	31
Şekil 3.19 : $\tau = 4$ ve $\alpha_1 = 2.5$ durumunda kapalı çevrim birim basamak cevabı.	32
Şekil 3.20 : $\tau = 4.30$ ve $\alpha_1 = 2.5$ durumunda kapalı çevrim birim basamak cevabı.	32
Şekil 3.21 : $G(s)$ sisteminin birim basamak.	34
Şekil 3.22 : $G(s)$ sisteminin birim basamak cevabı.	35
Şekil 3.23 : Kaskad sistem için kaskad indirgenmiş Rİİ kontrolör yapısına ait blok diyagramı.	37
Şekil 3.24 : $G_{iç}(s)$ sisteminin birim basamak.	37
Şekil 3.25 : $\tau = 1$ ve $\alpha_1 = 3$ durumunda kapalı çevrim birim basamak cevabı. ..	38
Şekil 3.26 : $G_{cl-iç}(s)$ sisteminin kutup-sıfır dağılımı.	39
Şekil 3.27 : İndirgenmiş kaskad blok diyagramı.	39
Şekil 3.28 : $G_{ileri}(s)$ sisteminin birim basamak.	40
Şekil 3.29 : $\tau = 3$ ve $\alpha_1 = 2.5$ durumunda kapalı çevrim birim basamak cevabı.	41
Şekil 3.30 : $G_{cl-dış}(s)$ sisteminin kutup-sıfır dağılımı.	42
Şekil 3.31 : İç çevrime ait kontrol işareti.	43

Şekil 3.32	: Dış çevrime ait kontrol işareti.....	43
Şekil 3.33	: Kaskad sisteme ait bozuculu birim basamak cevabı.....	43
Şekil 4.1	: Smith Öngörücüsü.	45
Şekil 4.2	: Önerilen kaskad kontrol yapısı.	46
Şekil 4.3	: İç çevrim için kontrol blok diyagramı.	47
Şekil 4.4	: Dış çevrim için indirgenmiş blok diyagramı.	49
Şekil 4.5	: İkinci mertebeden sistem ölü zamanlı sistemler için önerilen kaskad kontrol yapısı.	51
Şekil 4.6	: İç çevrim kontrol edildikten sonra indirgenmiş blok diyagramı.....	51
Şekil 4.7	: İndirgenmiş kaskad blok diyagramı.	52
Şekil 4.8	: $G(s)$ sisteminin birim basamak cevabı.....	54
Şekil 4.9	: Kapalı çevrim sistemin birim basamak cevabı.	55
Şekil 4.10	: $G(s)$ sisteminin birim basamak cevabı.....	57
Şekil 4.11	: Kapalı çevrim sistemin birim basamak cevabı.	58
Şekil 4.12	: $G(s)$ sisteminin birim basamak cevabı.....	60
Şekil 4.13	: Kapalı çevrim sistemin birim basamak cevabı.	61
Şekil 5.1	: Kaskad Model 1 için MAT kaskad kontrol blok diyagramı.	64
Şekil 5.2	: $G_{iç-ölü}(s)$ sisteminin birim basamak cevabı.....	65
Şekil 5.3	: İç çevrime ait kapalı çevrim sistemin birim basamak cevabı.	66
Şekil 5.4	: Dış çevrim için indirgenmiş blok diyagramı.	67
Şekil 5.5	: $G_{ileri}(s)$ sisteminin birim basamak cevabı.	67
Şekil 5.6	: Dış çevrime ait kapalı çevrim sistemin birim basamak cevabı.....	69
Şekil 5.7	: Kaskad Model 1 için oluşturulan kaskad kontrol yapısı.....	69
Şekil 5.8	: Kaskad sisteme ait birim basamak cevabı.	69
Şekil 5.9	: İç çevrime ait kontrol işareti.	70
Şekil 5.10	: Dış çevrime ait kontrol işareti.....	70
Şekil 5.11	: Kaskad Model 1 için bozuculu birim basamak cevabı.	71
Şekil 5.12	: Kaskad Model 1 için MAT kaskad blok diyagramı.....	72
Şekil 5.13	: İç çevrime ait kapalı çevrim sistemin birim basamak cevabı.	73
Şekil 5.14	: Dış çevrim için indirgenmiş blok diyagramı.	73
Şekil 5.15	: $G_{ileri}(s)$ sisteminin birim basamak cevabı.	74
Şekil 5.16	: Dış çevrime ait kapalı çevrim sistemin birim basamak cevabı.....	75
Şekil 5.17	: Kaskad Model 1 için oluşturulan ikinci kaskad kontrol yapısı.	75
Şekil 5.18	: Kaskad sisteme ait birim basamak cevabı.	76
Şekil 5.19	: İç çevrime ait kontrol işareti.	76
Şekil 5.20	: $G_{c2}(s)$ kontrolörüne ait kontrol işareti.	76
Şekil 5.21	: $G_{c3}(s)$ kontrolörüne ait kontrol işareti.	77
Şekil 5.22	: Kaskad Model 1'e ait bozuculu birim basamak cevabı.	77
Şekil 5.23	: Kaskad Model 1 için kaskad indirgenmiş Rİİ kontrolör yapısına ait blok diyagramı.	78
Şekil 5.24	: $G_{iç}(s)$ sisteminin birim basamak cevabı.	78
Şekil 5.25	: $\tau=1$ ve $\alpha_1 = 2.9$ durumunda kapalı çevrim birim basamak cevabı. ..	79
Şekil 5.26	: $G_{cl-iç}(s)$ sisteminin kutup-sıfır dağılımı.....	80
Şekil 5.27	: İndirgenmiş kaskad blok diyagramı.	81
Şekil 5.28	: $G_{ileri}(s)$ sisteminin birim basamak cevabı.	81
Şekil 5.29	: $\tau=5$ ve $\alpha_1 = 2.5$ durumunda kapalı çevrim birim basamak cevabı. ..	82

Şekil 5.30	: $G_{cl-dış}(s)$ sisteminin kutup-sıfır dağılımı.	83
Şekil 5.31	: İç çevrime ait kontrol işareti.	84
Şekil 5.32	: Dış çevrime ait kontrol işareti.	84
Şekil 5.33	: Kaskad Model 1'e ait bozuculu birim basamak cevabı.	85
Şekil 5.34	: Kaskad Model 1'e ait birim basamak cevapları.	85
Şekil 5.35	: Kaskad Model 2 için MAT kaskad kontrol blok diyagramı.	87
Şekil 5.36	: Dış çevrim için indirgenmiş blok diyagramı.	87
Şekil 5.37	: $G_{ileri}(s)$ sisteminin birim basamak cevabı.	88
Şekil 5.38	: Dış çevrime ait kapalı çevrim sistemin birim basamak cevabı.	89
Şekil 5.39	: Kaskad Model 2 için oluşturulan kaskad kontrol yapısı.	90
Şekil 5.40	: Kaskad sisteme ait birim basamak cevabı.	90
Şekil 5.41	: İç çevrime ait kontrol işareti.	90
Şekil 5.42	: Dış çevrime ait kontrol işareti.	91
Şekil 5.43	: Kaskad Model 2 için bozuculu birim basamak cevabı.	91
Şekil 5.44	: Kaskad Model 2 için MAT kaskad blok diyagramı.	92
Şekil 5.45	: İç çevrime ait kapalı çevrim sistemin birim basamak cevabı.	93
Şekil 5.46	: Dış çevrim için indirgenmiş blok diyagramı.	94
Şekil 5.47	: $G_{ileri}(s)$ sisteminin birim basamak cevabı.	94
Şekil 5.48	: Dış çevrime ait kapalı çevrim sistemin birim basamak cevabı.	96
Şekil 5.49	: Kaskad Model 2 için oluşturulan ikinci kaskad kontrol yapısı.	96
Şekil 5.50	: Kaskad sisteme ait birim basamak cevabı.	96
Şekil 5.51	: İç çevrime ait kontrol işareti.	97
Şekil 5.52	: $G_{c2}(s)$ kontrolörüne ait kontrol işareti.	97
Şekil 5.53	: $G_{c3}(s)$ kontrolörüne ait kontrol işareti.	97
Şekil 5.54	: Kaskad Model 2'e ait bozuculu birim basamak cevabı.	98
Şekil 5.55	: Kaskad Model 2 için kaskad indirgenmiş Rİİ kontrolör yapısına ait blok diyagramı.	98
Şekil 5.56	: $G_{iç}(s)$ sisteminin birim basamak cevabı.	99
Şekil 5.57	: $\tau=1$ ve $\alpha_1 = 2.9$ durumunda kapalı çevrim birim basamak cevabı. ..	100
Şekil 5.58	: $G_{cl-iç}(s)$ sisteminin kutup-sıfır dağılımı.	101
Şekil 5.59	: İndirgenmiş kaskad blok diyagramı.	101
Şekil 5.60	: $G_{ileri}(s)$ sisteminin birim basamak cevabı.	102
Şekil 5.61	: $\tau=2$ ve $\alpha_1 = 2.5$ durumunda kapalı çevrim birim basamak cevabı. ..	103
Şekil 5.62	: $G_{cl-dış}(s)$ sisteminin kutup-sıfır dağılımı.	104
Şekil 5.63	: İç çevrime ait kontrol işareti.	105
Şekil 5.64	: Dış çevrime ait kontrol işareti.	105
Şekil 5.65	: Kaskad Model 2'e ait bozuculu birim basamak cevabı.	106
Şekil 5.66	: Kaskad Model 2'e ait birim basamak cevapları.	106
Şekil 5.67	: Kaskad Model 3 için MAT kaskad blok diyagramı.	108
Şekil 5.68	: $G_{iç-ölü}(s)$ sisteminin birim basamak cevabı.	108
Şekil 5.69	: İç çevrime ait kapalı çevrim sistemin birim basamak cevabı.	110
Şekil 5.70	: Dış çevrim için indirgenmiş blok diyagramı.	110
Şekil 5.71	: $G_{ileri}(s)$ sisteminin birim basamak cevabı.	111
Şekil 5.72	: Dış çevrime ait kapalı çevrim sistemin birim basamak cevabı.	112
Şekil 5.73	: Yüksek mertebeden sistemler için oluşturulan yapı.	113
Şekil 5.74	: Kaskad sisteme ait birim basamak cevabı.	113

Şekil 5.75	: İç çevrime ait kontrol işareti.....	113
Şekil 5.76	: Dış çevrime ait kontrol işareti.....	114
Şekil 5.77	: Kaskad Model 3'e ait bozuculu birim basamak cevabı.	114
Şekil 5.78	: Kaskad Model 3 için kaskad indirgenmiş Rİİ kontrolör yapısına ait blok diyagramı.	115
Şekil 5.79	: $G_{iç}(s)$ sisteminin birim basamak cevabı.	115
Şekil 5.80	: $\tau=1$ ve $\alpha_1 = 3$ durumunda kapalı çevrim birim basamak cevabı.	116
Şekil 5.81	: $G_{cl-iç}(s)$ sisteminin kutup-sıfır dağılımı.....	117
Şekil 5.82	: İndirgenmiş kaskad blok diyagramı.	118
Şekil 5.83	: $G_{ileri}(s)$ sisteminin birim basamak cevabı.	118
Şekil 5.84	: $\tau=4$ ve $\alpha_1 = 2.5$ durumunda kapalı çevrim birim basamak cevabı. ..	119
Şekil 5.85	: $G_{cl-dış}(s)$ sisteminin kutup-sıfır dağılımı.	120
Şekil 5.86	: İç çevrime ait kontrol işareti.....	121
Şekil 5.87	: Dış çevrime ait kontrol işareti.....	121
Şekil 5.88	: Kaskad Model 3 için bozuculu birim basamak cevabı.	122
Şekil 5.89	: 3. kaskad sisteme ait birim basamak cevapları.....	122
Şekil 5.90	: Kaskad Sistem 4 için MAT kaskad blok diyagramı.	124
Şekil 5.91	: $G_{iç-ölü}(s)$ sisteminin birim basamak cevabı.....	125
Şekil 5.92	: İç çevrime ait kapalı çevrim sistemin birim basamak cevabı.	126
Şekil 5.93	: Dış çevrim için indirgenmiş blok diyagramı.	127
Şekil 5.94	: $G_{ileri}(s)$ sisteminin birim basamak cevabı.	127
Şekil 5.95	: Dış çevrime ait kapalı çevrim sistemin birim basamak cevabı.....	129
Şekil 5.96	: Yüksek mertebeden sistemler için oluşturulan SKKY.	129
Şekil 5.97	: Kaskad sisteme ait birim basamak cevabı.	129
Şekil 5.98	: İç çevrime ait kontrol işareti.....	130
Şekil 5.99	: Dış çevrime ait kontrol işareti.....	130
Şekil 5.100	: Kaskad Model 4 için bozuculu birim basamak cevabı.	131
Şekil 5.101	: 4.kaskad sistem için kaskad indirgenmiş Rİİ kontrolör yapısına ait blok diyagramı.	131
Şekil 5.102	: $G_{iç}(s)$ sisteminin birim basamak cevabı.	132
Şekil 5.103	: $\tau=2$ ve $\alpha_1 = 2.5$ durumunda kapalı çevrim birim basamak cevabı. ..	133
Şekil 5.104	: $G_{cl-iç}(s)$ sisteminin kutup-sıfır dağılımı.....	134
Şekil 5.105	: İndirgenmiş kaskad blok diyagramı.	134
Şekil 5.106	: $G_{ileri}(s)$ sisteminin birim basamak cevabı.	135
Şekil 5.107	: $\tau=6$ ve $\alpha_1 = 2.5$ durumunda kapalı çevrim birim basamak cevabı. ..	136
Şekil 5.108	: $G_{cl-dış}(s)$ sisteminin kutup-sıfır dağılımı.	137
Şekil 5.109	: İç çevrime ait kontrol işareti.....	138
Şekil 5.110	: Dış çevrime ait kontrol işareti.....	138
Şekil 5.111	: Kaskad Model 4 için bozuculu birim basamak cevabı.	139
Şekil 5.112	: Kaskad Model 4 için birim basamak cevapları.....	139

KARAKTERİSTİK ORAN ATAMA YÖNTEMİ İLE KASKAD KONTROLÖR TASARIMI

ÖZET

Teknolojide yaşanan gelişmelerle birlikte tasarlanan kontrol sistemleri için otomasyon kaçınılmaz bir ihtiyaç olmuştur. Otomasyonun en çok tercih edildiği kontrol dallarından biri de süreç kontrolüdür. Süreç kontrolündeki ana amaç, süreç hakkında bilgi veren değişkenlerin gözlenerek bu değişkenlere etki etmekte olan ayar değişkenlerinin en etkin bir biçimde kontrolünü sağlamaktır. Modern mühendislikle süreç kontrolü uygulamalarına örnek olarak kimyasal süreçler (sıcaklık kontrolü, derişim kontrolü vb.), otomotiv (motor kontrolü, şanzıman kontrolü vb.), uçuş kontrolü (insansız hava ve kara araçları vb.), robot ve haberleşme (kablosuz haberleşme için güç kontrolü) verilebilir.

Belirli bir amacı gerçekleştirmeye çalışan bileşenlerin meydana getirmiş olduğu kontrol sistemleri literatürde iki guruba ayrılmaktadır. Bunlar sırasıyla açık çevrim ve kapalı çevrim sistemlerdir. Açık çevrim sistemlerde çıkış işaretinden geri besleme alınmazken, kapalı çevrim sistemlerde giriş ve çıkış arasındaki hatayı azaltmak adına çıkış işaretinden geri besleme alınmaktadır. Sistemlerin bozucular gibi çevresel değişikliklere karşı dayanıklılığını arttırmak adına kontrolör tasarımı da geri besleme önemli yer arz etmektedir. Birçok sistemde tek çevrimli kapalı çevrim istenilen başarıyı elde edilmesi mümkün olsa da hareket kontrolü gibi sistemlerde istenilen başarı kriterinin elde edilmesi mümkün olmayabilir. İstenilen başarı kriterleri sağlanamadığı durumlarda sistemin başarımını iyileştirmek adına kaskad kontrolör yapısı kullanılır.

Kaskad kontrol yapıları seri kaskad ve paralel kaskad olmak üzere ikiye ayrılabilir. Seri kaskad kontrol yapısı iç ve dış olarak adlandırılan iç içe geçmiş kontrol çevrimlerinden oluşmaktadır. Paralel kaskad yapısında seri kaskad kontrol yapısından farklı olarak seri kaskad kontrolde iç çevrimdeki kontrolör sadece iç çevrimdeki sistemi kontrol ederken, paralel kaskad yapısında iç çevrimdeki kontrolör hem iç hem dış çevrimdeki sistemleri beraber kontrol etmektedir.

Seri kaskad kontrol yapısında kontrol edilen sistemler için kullanılan sistem modelleri yüksek mertebeden olmayan sistemler ya da yüksek mertebeden sistemler olabilir. Yüksek mertebeden olmayan birinci ya ikinci mertebeden kaskad sistemler için geleneksel kontrolör tasarım yöntemleri iyi sonuçlar vermesine rağmen, sistemin mertebesinin artmasıyla kaskad sistem daha karmaşık hale gelmekte ve istenilen sonuçların elde edilmesi zorlaşmaktadır. Yüksek mertebeden kaskad sistemler için bu sistemleri yaklaşık olarak ifade eden birinci mertebeden ölü zamanlı modeller kullanılarak kontrolör tasarımı yapılabilir veya bu sistemler için yüksek mertebeli kontrolörler tasarlanabilir.

Bu çalışmada öncelikle yüksek mertebeden sistemler için “Karakteristik Oran Atama” yöntemiyle nasıl kontrolör tasarlanacağı anlatılmış ve farklı sistemler ele alınarak kontrolör tasarımları yapılmıştır. Bu yöntem daha sonra, iç çevrimde yükselme zamanını azaltmak ve dış çevrimde ise aşırı bir sistem cevabı etmek üzere kaskad kontrolör tasarımında kullanılmıştır.

Karakteristik Oran Atama ile yapılan kaskad kontrolör tasarımı, literatürde yer alan “Model Ayrıştırma Temelli Kaskad Kontrolör” yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Tasarlanan kontrolörler için karşılaştırma kriterleri olarak bozucu bastırma süreleri ve referans takip başarımı seçilmiştir. Referans takip başarımı ITSE (Integral Time Square Error) kriterine göre belirlenmiştir.



CASCADE CONTROLLER DESIGN USING CHARACTERISTIC RATIO ASSIGNMENT METHOD

SUMMARY

The recent technological developments resulted in a necessity of automation for control systems. One of the most preferred branches of control in terms of automation is process control. The main purpose of process control is to observe the variables that provide information about the process and to control the manipulated variables that affect these variables most effectively. Chemical processes (such as temperature control and concentration control), automotive (such as motor control and transmission control), flight control (such as unmanned aerial and land vehicles), robotics (voice recognition, digital dictation), and communication (such as power control for wireless communication) can be given as examples for process control applications in modern engineering.

In the literature, the systems that consist of components with a specific purpose are divided into two different categories: open-loop and closed-loop systems. Open-loop systems do not have any feedback from the output signal, while closed-loop systems use feedback to minimize the error between the input and output signals. The feedback has a significant role in increasing the endurance of the system in case of environmental changes such as disturbances. Even if a single closed-loop control can achieve the desired performance in many systems, it may not be enough to meet the performance criteria in systems such as motion control. In case of performance criteria cannot be met, the cascade controller structure is used to improve the system performance. The dynamic performance of the system which consists of nested loops is increased by rejection of any disturbing effects that occur in the inner loop used in cascade control without affecting the system output. These nested loops are called secondary (inner) and primary (outer) loops, or in other words slave and master loops. Although it is possible to create an infinite number of loops, generally two loops are used as inner (secondary) and outer (primary) loops.

Cascade control structures can be divided into two categories. The first cascade control structure is named as serial cascade and the second one is named as parallel cascade, respectively. The serial cascade control structure consists of an inner and an outer nested control loop. For the serial cascade control structure, the inner loop controller controls only the inner loop system. On the other hand, the inner loop controller controls both the inner loop system and the outer loop system at the same time for the parallel cascade control structure which is found as an alternative to the serial cascade control structure.

The model of the system to be controlled can be both high order systems or non-high order systems for serial cascade control structure. Although the conventional controller design methods show good results for the cascade systems with the first or second

order, it is hard to have good results in higher-order systems as the cascade system becomes more complex. First-order dead-time model approximations can be used for controller design or high-order controllers can be designed for the high order cascade systems. In systems where cascade control is preferred, such as chemical processes, overshoot that may occur in the system response may cause irreversible effects on the system, the overshoot in the system response is an undesirable time-domain characteristic. On the other hand, the presence of zeros of the controller designed in the inner loop in cascade control can lead to overshoot in the inner loop step response. Furthermore, the purpose of the controller in the outer loop is to tolerate the inner loop overshoot by ensuring that the closed-loop response is a non-overshooting response.

Overshoot in the closed-loop system response is not a desired time-domain characteristic in cascade control systems, it is aimed to increase the disturbance rejection performance of the inner loop compared to the outer loop as a rule of thumb. The PI-PD controller structure can be provided as a good example for the aforementioned cascade control structure. The PD controller, which is placed in the feedback in the inner loop, is selected so that the inner loop step response has fast dynamics even though there may be an overshoot. In the outer loop, the PI controller is chosen to obtain a non-overshooting closed-loop response regardless of the speed of the outer loop dynamics. In this study, the controller design criteria is to increase the speed of the inner loop system response and to prevent overshoot of the system response in the outer loop, respectively.

In this study, instead of using low order system models and low order controllers for serial cascade control of high order systems, the high order system models are directly used with a high-order controller design method based on “Characteristic Ratio Assignment (CRA)”. This controller design method is based on the relationship between the “coefficients of the characteristic polynomial ” of the systems which is proposed by Naslin [1]. In this method, time-domain characteristics, namely, the rise time, the overshoot, or the undershoot of the system can be adjusted using the characteristic ratio assignment by the selection of the time constant “ τ ” and principal characteristic ratio “ α_1 ”.

In order to explain the effect of characteristic ratio values on system response, firstly, the overshoot values are examined for different α_1 values for the all-pole systems from second to eighth order in case of $\tau=1$ for unit step inputs. Then, appropriate α_1 values to obtain non-overshooting response are determined for different orders of closed-loop characteristic polynomials. If the order of the closed-loop characteristic polynomial is fourth-order or higher, it is possible by selecting an appropriate α_1 value. If the closed-loop characteristic polynomial is second-order or third-order, non-overshooting system response can be obtained for the all-pole systems with the selection of α_1 as 4 and 3, respectively. Since overshoot can be observed in systems that have system zeros, the all-pole systems, the α_1 value of which are determined for non-overshoot, are examined by adding zero to their structure. It is observed that a non-overshooting response can be obtained by choosing α_1 or τ values slightly higher than their values determined for all pole cases. The rise time is found to be generally in the range of $[\tau-1 \ \tau+1]$ seconds with respect to the chosen τ time constant. Although it is theoretically possible to obtain very fast system responses with the Characteristic Ratio Assignment method, via choosing the value of τ smaller, the design will not be realistic that much since the amplitude of the control signals needs to be very high to provide

these high-speed system responses and it may also not be possible to apply such high control signals due to nonlinearities or constraints which are not accounted for.

In order to apply Characteristic Ratio Assignment based high order controller design methods to serial cascade control systems, various inner and outer high order system models with different features are considered. The first setup in this work is chosen as high order all-pole systems for the inner and outer loop in the control structure. Secondly, the inner loop system is taken as an all-pole system and the outer loop system is taken as a system that has a zero in the left-half plane. In the third case, an all-pole system and a non-minimum phase system are considered in the inner loop and the outer loop, respectively. Finally, the inner loop system is selected as a non-minimum phase system and the outer loop system is selected as a system with the free integrator.

The proposed cascade control method is compared with the "Model Separation-based Cascade Controller (MSCC)" method for all cases. The comparison criterion is selected as ITSE (Integral Time Square Error) and the disturbance rejection and reference tracking performances of both methods are examined in MATLAB (MATrix LABoratory) Simulink environment, which is the software of Mathworks commonly used in academia and industry. Simulation results also show that Characteristic Ratio Assignment based high order serial cascade control method performs better than Model Separation-based Cascade Controller in disturbance rejection. In the Model Separation-based Cascade Controller method first-order dead-time or second-order dead-time model approximations of high order system models are used. Because of this approach, an extra overshoot may be observed when Model Separation-based Cascade Controller is applied to high order system models that fit real-time systems better.

In the light of the simulation results, good results are obtained in cascade controller design with the Characteristic Ratio Assignment method, especially in terms of disturbance rejection performance. Characteristic Ratio Assignment based method needs a fewer number of controller design parameters. Compared to Model Separation-based Cascade Controller controller design methods, the fewer number of controller design parameters with the Characteristic Ratio Assignment controller simplifies the controller designer's job. While no overshoot is observed in the simulation made over the dead-time system using Model Separation-based Cascade Controller, overshoot may be observed in the closed-loop unit-step response on the real-time system. This difference may be caused by the modeling error since the controllers are designed over the dead-time system models of high-order systems. Moreover, when the coefficients of the higher-order terms are too small, which is a common case for the Characteristic Ratio Assignment based design method, the design can be carried out by omitting the terms with relatively small coefficients. Not only for higher-order controllers but also for a second-order controller design (such as the design of PID (Proportional - Integral - Derivative) controller), the controller designer can freely synthesize the controller by using the characteristic ratios proposed by Naslin, to choose the coefficients of the closed-loop characteristic polynomial.



1. GİRİŞ

Teknolojide yaşanan gelişmelerle birlikte, Endüstri 4.0 kaçınılmaz bir sonucu olan makineleşmeyle birlikte otomasyon endüstrinin vazgeçilmez bir parçası olmuştur. Otomasyonla birlikte üretim hacmi ciddi bir oranda artmış ve bu artan ihtiyaçla birlikte kontrol sistemlerine olan ihtiyaç daha da artmıştır. Otomasyonunun en çok kullandığı alanlara örnek olarak robotik, savunma sanayi, imalat sektörleri örnek verilebilir. İşin doğası gereği otomasyonun en çok tercih edildiği kontrol dallarından biri de süreç kontrolüdür. Kelime anlamıyla süreç kontrolü bir ürünün belirlenen kriterdeki özellikleri taşımasını sağlayabilmek adına tabi tutulacağı işlem ve koşulların doğruluğunu korumak amacıyla kontrol edilmesine denir. Bu nedenle süreç hakkında bilgi veren değişkenlerin gözlenerek bu değişkenlere etki etmekte olan ayar değişkenlerinin en etkin bir biçimde kontrolü edilmesi süreç sonucunda ortaya çıkacak ürün kalitesi için hayati bir önem arz etmektedir. Modern mühendislikte süreç kontrolü uygulamalarına örnek olarak kimyasal süreçler (sıcaklık kontrolü, derişim kontrolü vb.), otomotiv (motor kontrolü, şanzıman kontrolü vb.), uçuş kontrolü (insansız hava ve kara araçları vb.), robot ve haberleşme (kablosuz haberleşme için güç kontrolü) verilebilir. Endüstride süreç kontrolü için yaygın olarak kaskad kontrolör yapısı kullanılmaktadır. Bunun sebebi ise, tek çevrimli kapalı çevrim sistemin güçlü bozucular karşısında istenilen bozucu bastırma başarımının istenilen seviyelerde olmamasıdır. Kaskad kontrolde kullanılan iç içe geçmiş çevrimlerle birlikte iç çevrimde oluşan herhangi bir bozucu etki sistem çıkışına etki etmeden bastırılarak sistemin dinamik başarımı artırılmış olunur.

1.1 Tezin Amacı

Kaskad kontrolör yapıları sistemlerin bozucuları bastırma başarımını arttırmak için kullanılırlar. Bu kontrolör yapısının kontrol stratejisi olarak kullanılmasındaki temel amaç, iç çevrimin dış çevrimin kontrol hedefine etki etmeden bozucuları çok hızlı bir şekilde bastırmaktır. Bu çalışmada altında kaskad kontrol yapısı

altında “Karakteristik Oran Atama (KOA)” yöntemi kullanılarak yüksek mertebeden sistemler için yeni bir yüksek mertebeli kontrolör tasarım yöntemi sunulmuştur. KOA yöntemi ile kaskad kontrolör tasarımında, sistemin mertebesinden bir eksik mertebeli kontrolör tasarlanarak sistemin kontrol edilmesini sağlayan bir kontrolör tasarım yöntemidir. Bu yöntem sayesinde yüksek mertebeden sistemlere kontrolör tasarlanırken Pade yaklaşımı gibi yaklaşımlar kullanılıp sistemi 1. veya 2. mertebeden ölü zamanlı transfer fonksiyonuna çevirmeden kaynaklanan modelleme hatalarının önüne geçilip yüksek mertebeden kontrolör tasarımını mümkün kılmıştır. [2] ve [3] çalışmalarda gibi daha önce KOA yöntemiyle kontrolör tasarımı yapılmış olmasına rağmen daha önce literatürde KOA yöntemi kullanılarak kaskad kontrolör tasarımı yapılmamıştır. Bu çalışmada KOA yönteminin τ genelleştirilmiş zaman sabiti ve α_1 temel karakteristik oran ayar parametreleri ile yükselme zamanı ve aşımın kontrol edilebilmesinin yüksek mertebeden kaskad sistemlerin kontrol uygulamalarında değerli bir katkı sağlayacağı düşünülmüştür. Önerilen kaskad kontrolör yapısı, kaskad kontroldeki temel kural olan iç çevrimin dış çevrimden hızlı olmasına dayalı olarak tasarlanmıştır. Bu amaçla iç çevrimin hızlanması, dış çevrimde ise süreçlerde sistemde olacak olası aşım çok tercih edilen bir zaman bölgesi kriteri olmadığı için aşımsız sistem cevabı hedeflenmiştir. Önerilen kontrolör yapısında sistemin hızı τ parametresi ve aşımı ise α_1 parametresi ile doğrudan kontrol edilebilmesiyle esnek kontrolör tasarımını mümkün kılmıştır. Buna ek olarak, yüksek mertebeden sistemlerin ölü zamanlı modelleri için önerilen “Model Ayırıştırma Temelli Kontrol Yapısı” [4] ile KOA yöntemiyle farklı yüksek mertebeden kaskad sistemler için kaskad kontrolör tasarımları yapılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

1.2 Literatür Araştırması

Kontrol Mühendisliği, her geçen gün ciddi gelişmeler meydana gelen modern teknolojiye dayalı sistemlerde temel rol oynayan bir mühendislik dalıdır [5]. Kontrol mühendisliği temel olarak belirlenen isterlerin yerine getirilmesini amaç edinmektedir. Çıkış işaretinin kontrol eylemi üzerinde hiçbir etkisinin olmadığı sistemlere açık çevrim kontrol sistemleri denir. Açık çevrim kontrol sistemlerinde çıkış ve giriş referans değerleri karşılaştırılmamaktadır. Giriş referans değeri ile çıkış arasındaki hata arttıkça istenilen çıkış değeri açık çevrim kontrol sistemlerinde sağlanamaz.

Bu durumu engellemek adına kapalı çevrimler sistemler kullanılır. Kapalı çevrim kontrol sistemlerinde, giriş referans değeri ile çıkış arasındaki hatayı azaltmak için geri besleme kullanılır [6]. Geribesleme, kontrol sisteminin çevresel değişikliklere karşı daha az duyarlı olmasında da rol oynar [7]. Tek çevrimli kapalı çevrim sistemlerinin birçok avantajı olmasına rağmen hareket kontrolü gibi sistemlerde, bazen sistemden istenilen başarımın elde edilmesi mümkün olmayabilir [8]. Basit geri beslemeli kontrol yapısı istenilen başarım kriterlerini sağlamadığı zaman kaskad kontrol yapısı kullanılarak sistemin başarımı iyileştirilebilir. Kaskad kontrol yapısı genellikle bazı seri dinamiklere sahip olan ve bu dinamikler arasındaki çıktı değişkenleri ölçülebilen sistemler için uygundur [9].

Kaskad kontrol yapısı 1956 yılında Franks ve Worley tarafından yayınlanan makale ile literatüre girmiştir [10]. Kaskad kontrol yapısı genel olarak iç içe geçmiş iki çevrimden oluşmaktadır. Bu iç içe geçmiş çevrimler ikincil çevrim (iç) ve birincil (dış) çevrimi ya da yardımcı (slave) ve ana (master) çevrimler olarak adlandırılır. İç içe çevrim sayısını sonsuz sayıda çevrim ile oluşturmak mümkün olmasına karşın genellikle iç ve dış çevrim olacak şekilde iki çevrim kullanılır [4]. Bir kontrol sisteminde iyi bir kontrolörün sisteme etki eden bozuculara karşı iyi bir bozucu bastırma başarımı göstermesi gerekir [11]. Güçlü bozucular karşısında klasik geri beslemeli kontrol sistemleri ve uzun gecikmeye sahip sistemlerin bozucu bastırma başarımları istenilen seviyede olmayabilir. Tek çevrimli geri beslemeli kontrol sistemlerine bir alternatif olarak kaskad kontrol yapısı sistemin çıkışını doğrudan etkileyen öngörülme bozucu etkilerini bastırarak sistemin başarımını arttırmak için kullanılır. Bozucu bastırma başarımı geleneksel tek girişli sistemlere kıyasla daha iyi olduğu için kaskad kontrol yapısı süreç kontrolünde sıklıkla kullanılmaktadır. Özellikle endüstride akış, basınç ve sıcaklık kontrolü için kaskad kontrol sistemleri yaygın olarak tercih edilmektedir [12].

1.3 Tez Organizasyonu

Bu çalışmanın ikinci bölümünde kaskad kontrolör hakkında bilgi verilip, literatürde bulunan seri kaskad kontrol yapısı ve paralel kaskad kontrol yapısı incelenecektir. Üçüncü bölümde Karakteristik Oran Atama yönteminden bahsedilerek, bu yöntemle yükselme zamanı ve aşımın nasıl ayarlanabileceğinden bahsedilecektir. Buna

ek olarak, KOA yöntemiyle kaskad kontrolör tasarımı örnek sistem üzerinden gösterilecektir. Dördüncü bölümde ise Model Ayırıştırma Temelli kaskad kontrolör tasarımıyla yüksek mertebeden sistemlerin ölü zamanlı modellerini kullanarak kontrolör tasarımından bahsedilecektir. Beşinci bölümde dört adet kaskad sistem ele alınarak, iç çevrimde yükselme zamanını azaltacak ve dış çevrimde ise aşırımsız bir sistem cevabı edecek iki farklı kaskad kontrolör tasarımı yapıldıktan sonra, belirlenen başarımlar kriterlerine göre karşılaştırılmaları yapılacaktır. En son olarak altıncı bölümde ise sonuçlar ve öneriler verilecektir.



2. KASKAD KONTROL

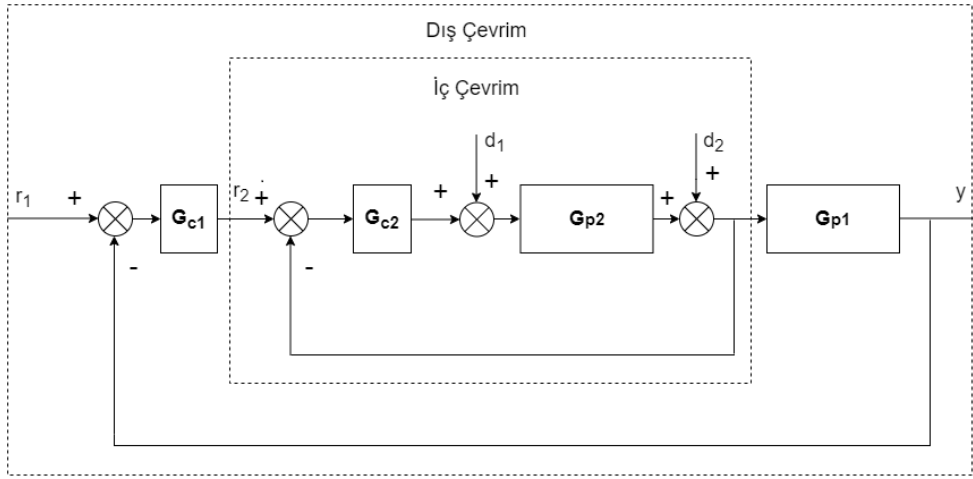
Kaskad kontrol yapısı genel olarak iç içe geçmiş iki çevrimden oluşmaktadır. Bu iç içe geçmiş çevrimler ikincil çevrim (iç) ve birincil (dış) çevrimi ya da yardımcı (slave) ve ana (master) çevrimler olarak adlandırılır. İç içe çevrim sayısını sonsuz sayıda çevrim ile oluşturmak mümkün olmasına karşın genellikle iç ve dış çevrim olacak şekilde iki çevrim kullanılır [4]. Endüstride kaskad kontrol yapısının tercih edilme sebepleri;

- sisteme etkiyen bozucuları çok hızlı bir şekilde bastırarak sistemin dinamik başarımını arttırmak,
- sistemin hızını arttırarak zaman gecikmesinden kaynaklanan olumsuz etkilerini gidermek,
- iç çevrimde oluşan herhangi bir bozucu etkisinin sistem çıkışına etki etmeden bastırılarak yok edilmesi

şeklinde özetlenebilir [11]. Literatüre bakıldığında zaman kaskad kontrol yapısı paralel ve seri kaskad kontrol olmak üzere iki ayrılır.

2.1 Seri Kaskad Kontrol Yapısı (SKKY)

Kontrol mühendisleri sisteme etkiyen bozucu etkisini azaltmak için bir ara sensör ya da kontrolörün kullanıldığı seri kaskad kontrol yapısını (SKKY) kullanırlar. İlk olarak Franks ve Worley [10] kimyasal reaktörlerde ITAE başarımlarını kullanarak SKKY yapısını kullanmıştır. Geleneksel SKKY yapısında iç içe geçmiş iki kontrol çevrimi ve bu çevrimlere ait iki kontrolör bulunmaktadır. Şekil 2.1’de geleneksel SKKY yapısı verilmiştir [13].

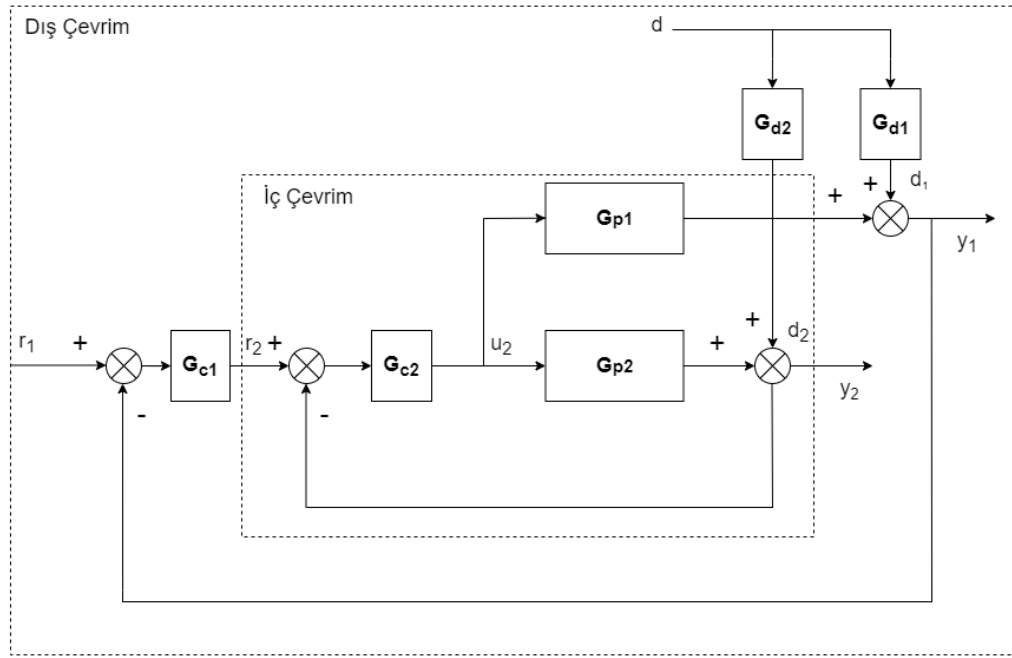


Şekil 2.1 : Geleneksel seri kaskad kontrol yapısı.

Şekil 2.1’de G_{p1} ve G_{p2} sırasıyla birincil ve ikincil sistemlere ait süreçlere ait sistem transfer fonksiyonlarıdır. G_{c1} ve G_{c2} ise birincil ve ikincil sistemlere ait kontrolörleri göstermektedir. d_1 ve d_2 bozucuları ise ikincil sistemin giriş ve çıkışına etkiyen bozucuları göstermektedir. Birincil sistemin referans girişi r_1 ile gösterilirken, birincil sistemin kontrolörü olan G_{c1} ’in çıkışı r_2 ise ikincil sistemin referans girişi olmaktadır [13]. Kaskad kontrol yapısında iç çevrimdeki kararlılığı sağlamak için birincil sistemin kontrolörü G_{c2} kullanılırken, dış çevrimdeki kararlılığı sağlamak için ikincil sistemin kontrolörü G_{c1} kullanılır [11]. Kaskad kontrolün tercih edilme sebeplerinden biri olan iyi bir bozucu bastırma başarımı için iç çevrimin dış çevrimden daha hızlı olması istenir. Bunun sebebi iç çevrim hızlı bir şekilde bozucuyu bastırarak ilk sistemin sürekli hal hatasını azaltır [13].

2.2 Paralel Kaskad Kontrol Yapısı (PKKY)

SKKY alternatif olarak bulunan paralel kaskad kontrol yapısı (PKKY) ilk olarak Luyben tarafından SKKY ve PKKY arasındaki farklar üzerinde çalışılmıştır [14]. SKKY’den farklı olarak PKKY’da ikincil çevrimdeki G_{c2} kontrolörü tarafından oluşturulan u_2 kontrol işareti ve bozucular aynı anda birincil ve ikincil sistem çıkışlarını etkiler. Şekil 2.2’de PKKY verilmiştir [15].



Şekil 2.2 : Paralel kaskad kontrol yapısı.



3. KARAKTERİSTİK ORAN ATAMA YÖNTEMİ İLE KASKAD KONTROLÖR TASARIMI

Kontrol sistemleri için basit ve güvenilir kontrolör tasarım yöntemlerine ihtiyaç vardır. Zamanla değişmeyen basit sistemler için, klasik kontrol kuramı bu ihtiyacı karşılamak için önerilmektedir. Ancak zamanla değişmeyen yüksek mertebeden sistemler için daha güçlü kontrolör tasarımı yöntemleri gerekmektedir [16]. Geri beslemeli zamanla değişmeyen sistemler için kontrolör tasarımında aşağıdaki problemler göz önünde bulundurulmalıdır;

- birim basamak, rampa, sinüzoidal gibi giriş işaretlerinde asimptotik referans takibi yapma ve bozucu bastırma başarımı,
- kararlılık,
- geçici hal cevabı [17].

Genellikle, kontrolör tasarımında, kontrolörün başarımını değerlendirmek için birim basamak cevabı kullanılır [18]. Her kontrol sistemi için iyi geçici hal yanıtı en önemli isterlerden biridir [17]. Kontrolör parametrelerinin hesaplanmasında aşım ve yükselme zamanı gibi geçici hal kriterlerine bakılmaktadır [19]. Bir sistemin karakteristik polinomunun katsayıları ile geçici hal yanıtı arasında belirgin bir ilişki bulunmaktadır [20]. Kontrolör tasarımında istenen kapalı çevrim geçici hal yanıtına elde etmek için karakteristik polinomların tanımlanması en önemli konulardan biridir [1]. Polinom ifadeleri kullanan bir cebirsel tasarım yaklaşımı olan Karakteristik Oran Atama yönteminde (KOA) istenilen kapalı çevrim karakteristik polinomu için karakteristik oranlar (α) ve genelleştirilmiş zaman sabitinin (τ) atanmasıyla kontrolör tasarımı yapılmıştır. Zaman yanıtlarında her iki parametre türü de net fiziksel anlama sahiptir. Karakteristik oranların (α) sönüm oranı ile güçlü bir ilişkisi varken, genelleştirilmiş zaman sabitinin (τ) de sistem yanıt hızı ile bir ilişkisi bulunmaktadır. Polinom yöntemi, karakteristik oranların ve genelleştirilmiş zaman sabitinin uygun belirlenmesi yoluyla geçici zaman cevabını açıkça ele alarak kontrolör tasarımında

kullanılabilir [18]. Karakteristik oranların (α) ve genelleştirilmiş zaman sabitini (τ) bağımsız olarak ayarlayarak, keyfi olarak sadece aşırı sistem cevabı değil bunun yanı sıra hızlı sistem cevabı da elde edilebilir [17].

3.1 Karakteristik Oran Atama Yöntemi

Karakteristik polinom katsayıları ile geçici hal yanıtı arasındaki ilişki ilk olarak İntegral Zaman Mutlak Hatası (ITAE) ile incelenmiştir [21]. 1960 yılında Kessler [22] %8 aşırı sahip birim basamak cevabı önererek ITAE'ye kıyasla daha az salınımlı birim basamak cevabı elde etmiştir. Naslin [1] 1960'larda yaptığı çalışmalarla karakteristik polinom katsayılarını belirlemede yeni yöntemlerin temelini atmıştır. 1978'de Lipatov ve Sokolov [23], karakteristik polinomların katsayıları açısından kararlı ve kararsız durumlar için bir dizi yeter koşul önermişlerdir. Lipatov ve Sokolov tarafından türetilen katsayı dizisi Naslin'in geçici yanıtı incelemek için kullandığı katsayı ilişkisi ile tesadüfen aynı çıkmıştır [3]. Manabe [18], Naslin'in çalışması ve Lipatov-Sokolov kararlılık kriterine dayanan Katsayı Diyagramı Yöntemini (CDM) önermiştir. Karakteristik polinom katsayıları için önerilen en son yöntem ise Karakteristik Oran Atama (KOA) yöntemidir [1]. Bu yönteme ilişkin olarak, Y.C.Kim, L.H.Keel ve S.P. Bhattacharyya [20], zamanla değişmeyen sistemler için aşırı birim basamak cevabı için koşullar önermişlerdir. KOA, istenilen geçici hal yanıtını elde edebilmek için uygun bir karakteristik polinom sunar [1]. Kontrol sisteminin dinamik yanıtını analiz etmek için 3 yöntem bulunmaktadır. Bunlar sırasıyla; köklerin yer eğrisi yöntemi, frekans-cevap tasarım yöntemi ve durum-uzay yöntemidir. Doğrusal bir kontrol sisteminin transfer fonksiyonunu $G(s)$ ele alınsın [24].

$$G(s) = \frac{n(s)}{p(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0} \quad (3.1)$$

$p(s)$ 'in pozitif gerçekte katsayıları olan bir Hurwitz polinomu olduğu varsayılınsın [1]. Eğer bir $p(s)$ polinomun bütün kökleri sol yarı s -düzleminde yer alıyorsa $p(s)$ polinomuna Hurwitz polinomu denir [25]. Karakteristik oranlar α_i ($i = 1, 2, \dots, n - 1$) ve genelleştirilmiş zaman sabiti τ şu şekilde tanımlanır;

$$\alpha_1 = \frac{a_1^2}{a_0 a_2}, \alpha_2 = \frac{a_2^2}{a_1 a_3}, \dots, \alpha_{n-1} = \frac{a_{n-1}^2}{a_{n-2} a_n} \quad (3.2)$$

$$\tau = \frac{a_1}{a_0} \quad (3.3)$$

ve karakteristik polinomun tüm katsayıları denklem (3.4) ve denklem (3.5) göre tekrar tanımlanabilir [26]:

$$\alpha_1 = \alpha_0 \tau \quad (3.4)$$

$$\alpha_i = \frac{\alpha_0 \tau^i}{\alpha_{i-1} \alpha_{i-2}^2 \alpha_{i-3}^3 \dots \alpha_2^{i-2} \alpha_1^{i-1}}, i = 2, \dots, n \quad (3.5)$$

KOA yönteminde ilk adım K-polinomunu seçmektir [27]. K-polinomu tanımlamak denklem (3.6) ve denklem (3.7)'deki formüller kullanılarak keyfi olarak tanımlanır:

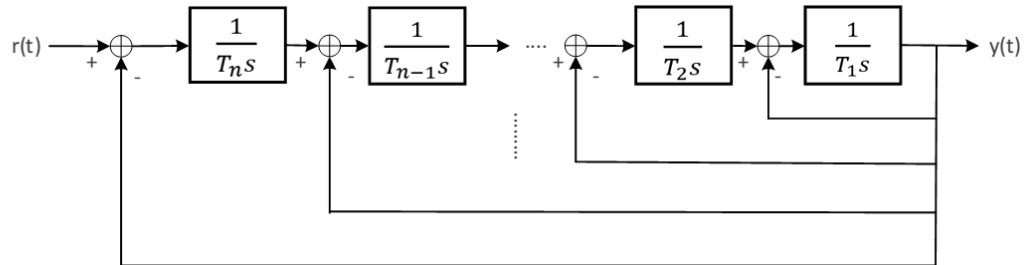
$$a_1 > 2 \quad (3.6)$$

$$a_k = \Gamma_k a_1 = \frac{\sin(\frac{k\pi}{n}) + \sin(\frac{\pi}{n})}{2 \sin(\frac{k\pi}{n})} a_1, k = 2, 3, \dots, n-1 \quad (3.7)$$

Tüm bu koşullar kontrol sisteminin aşım ve hızı ile tasarım parametrelerinin ayarlanmasına olanak sağlar. K-polinomuna göre seçilmiş sıfırı bulunmayan bir sistemin frekans yanıtı kademeli olarak azalır ve bu sistem her zaman kararlı bir sistemdir. Bu sonuçlardan da anlaşılacağı üzere uygun bir a_1 ve τ seçimiyle birlikte kararlı ve istenilen aşım oranına ve istenen kapalı çevrim sistem hızı isterlerini karşılayan bir sistem geliştirilebilir [26].

3.1.1 Karakteristik oran ve sönüm oranı ilişkisi

Sönüm oranı ile karakteristik oran arasındaki analitik ilişkiler henüz bilinmemekle birlikte, aralarındaki ilişki Kessler'in kaskad integral kontrolör çok çevrimli yapısı kullanılarak açıklanabilir. Şekil 3.1'de Kessler'in çok çevrimli yapısının blok diyagramı verilmiştir [20].

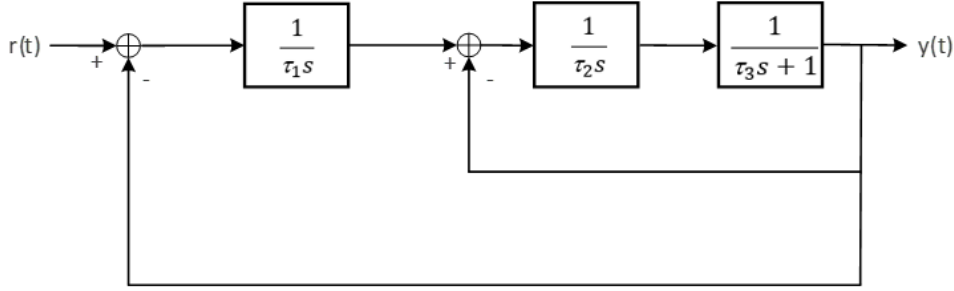


Şekil 3.1 : Kessler'in çok çevrimli yapısının blok diyagramı.

Kessler'in çok çevrimli yapısının kapalı çevrim transfer fonksiyonu:

$$G(s) = \frac{1}{(T_n T_{n-1} \dots T_1) s^n + (T_n T_{n-1} \dots T_2) s^{n-1} + \dots + (T_n T_{n-1}) s^2 + (T_n) s + 1} \quad (3.8)$$

şeklindedir. Burada T_i integral kontrolörlerinin zaman sabitleridir. Karakteristik polinom katsayılarının T_i 'leri ayarlanarak keyfi olarak seçilebileceği açıktır [20]. Bu durumu açıklamak için Şekil 3.2'deki Kessler'in 2 çevrimli sistemini ele alalım.



Şekil 3.2 : Kessler'in 2 çevrimli kaskad sistemi.

2 çevrimli sistemin kapalı çevrim transfer fonksiyonu;

$$T(s) = \frac{1}{1 + \tau_1 s [1 + \tau_2 s (1 + \tau_3 s)]} \quad (3.9)$$

$$= \frac{1}{\tau_1 \tau_2 \tau_3 s^3 + \tau_1 \tau_2 s^2 + \tau_1 s + 1} \quad (3.10)$$

şeklindedir. Denklem (3.10)'e göre $T(s)$ 'in karakteristik oranları;

$$\alpha_1 = \frac{\tau_1}{\tau_2}, \alpha_2 = \frac{\tau_2}{\tau_3} \quad (3.11)$$

şeklindedir. Ayrıca içteki sistemin transfer fonksiyonu ve karakteristik oranları ise;

$$T_i(s) = \frac{1}{1 + \tau_2 s (1 + \tau_3 s)} = \frac{1}{\tau_2 \tau_3 s^2 + \tau_2 s + 1} \quad (3.12)$$

$$\overline{\alpha}_1 = \frac{\tau_2}{\tau_3} = \alpha_2 \quad (3.13)$$

şeklindedir. İkinci olarak, $\tau_1 > \tau_2 \gg \tau_3$ olduğu varsayılırsa;

$$T(s) \approx \frac{1}{1 + \tau_1 s (1 + \tau_2 s)} = \frac{1}{\tau_1 \tau_2 s^2 + \tau_1 s + 1} := T_0(s) \quad (3.14)$$

olur. $T_0(s)$ 'in karakteristik oranları;

$$\widehat{\alpha}_1 = \frac{\tau_1}{\tau_2} = \alpha_2 \quad (3.15)$$

olarak bulunur. Ayrıca, ikinci mertebeden bir sistemin aşım oranı karakteristik oranlar cinsinden $\zeta = \frac{\sqrt{\alpha_1}}{2}$ olduğu kolayca görülebilir. Sıfırı bulunmayan keyfi mertebeli diğer sistemler de bu yolla geliştirildiğinden, denklem (3.12) ve denklem (3.13) yola çıkarak

sıfırı bulunmayan bir sistemin karakteristik oranının aşım ile doğrudan bir ilişkisi olduğu yorumu yapılabilir [28]. Tezin ilerleyen kısımlarında bir sistemin yükselme zamanı ve aşımının nasıl ayarlanabileceğinden bahsedilecektir.

3.1.2 Yükselme zamanının ayarlanması

Birinci mertebeden bir sistemin, sistem cevap hızını belirlenmesinde zaman sabiti önemli bir parametredir. Birinci mertebeden sistemler için zaman sabiti tanımı açık olsa da, birden fazla zaman sabiti bulunan sistemler için zaman sabiti bilinmemektedir. Birden çok zaman sabiti içeren sistemlerde zaman yanıtı ve zaman sabitleri arasındaki ilişki bilinmediğinden, yüksek mertebeden transfer fonksiyonu söz konusu olduğunda istenen bir yanıt hızına ulaşmak zordur [29]. Genelleştirilmiş zaman sabiti olarak adlandırılan τ ile bir sistemin cevap hızı arasında doğrudan bir ilişki vardır [10].

Teorem 1

n mertebeli sıfırı bulunmayan iki sistem ele alınsın:

$$G_1(s) = \frac{c_0}{P_1(s)} = \frac{c_0}{c_n s^n + c_{n-1} s^{n-1} + \dots + c_1 s + c_0} \quad (3.16)$$

$$G_2(s) = \frac{d_0}{P_2(s)} = \frac{d_0}{d_n s^n + d_{n-1} s^{n-1} + \dots + d_1 s + d_0} \quad (3.17)$$

$c_i, d_i > 0$ olsun. Bu sistemlerin genelleştirilmiş zaman sabitleri sırasıyla;

$$\tau_1 = \frac{c_1}{c_0} \quad (3.18)$$

$$\tau_2 = \frac{d_1}{d_0} \quad (3.19)$$

şeklindedir. $G_i(s)$ sistemleri için keyfi bir girişe göre sistem cevabı $y_i(t)$ olsun. $P_1(s)$ ve $P_2(s)$ polinomları aynı karakteristik orana sahip olduklarında aralarında;

$$\frac{c_i^2}{c_{i-1}c_{i+1}} = \frac{d_i^2}{d_{i-1}d_{i+1}} = \alpha_i, i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (3.20)$$

ilişkisi kurulmuş olunur. Sonuç olarak

$$y_1(t) = y_2\left(\frac{\tau_1}{\tau_2}t\right) \quad (3.21)$$

şeklinde sistem cevapları elde edilmiş olunur.

İspat:

Yeterlilik koşulu:

$G_1(s)$ ve $G_2(s)$ sistemleri arasında $\frac{c_i^2}{c_{i-1}c_{i+1}} = \frac{d_i^2}{d_{i-1}d_{i+1}} = \alpha_i$ olduğu varsayılınsın. $G_1(s)$ sistemi için keyfi bir $r(t)$ girişi için giriş ve çıkış arasındaki ilişki;

$$c_0 r(t) = c_n \frac{d^n y_1(t)}{dt^n} + c_{n-1} \frac{d^{n-1} y_1(t)}{dt^{n-1}} + \dots + c_1 \frac{dy_1(t)}{dt} + c_0 y_1(t) \quad (3.22)$$

şeklindedir. c_i katsayılarını a_i 'ler cinsinden yazarak giriş ve çıkış arasındaki ilişki tekrardan düzenlenirse;

$$r(t) = \frac{\tau_1^n}{\alpha_{n-1} \alpha_{n-2}^2 \dots \alpha_1^{n-1}} \frac{d^n y_1(t)}{dt^n} + \frac{\tau_1^{n-1}}{\alpha_{n-2} \alpha_{n-3}^2 \dots \alpha_1^{n-2}} \frac{d^{n-1} y_1(t)}{dt^{n-1}} + \dots + \frac{\tau_1^2}{\alpha_1} \frac{d^2 y_1(t)}{dt^2} + \tau_1 \frac{dy_1(t)}{dt} + y_1(t) \quad (3.23)$$

elde edilmiş olunur. $G_2(s)$ sistemi için giriş ve çıkış arasındaki ilişki aynı şekilde kurulursa;

$$r(t) = \frac{\tau_2^n}{\alpha_{n-1} \alpha_{n-2}^2 \dots \alpha_1^{n-1}} \frac{d^n y_2(t)}{dt^n} + \frac{\tau_2^{n-1}}{\alpha_{n-2} \alpha_{n-3}^2 \dots \alpha_1^{n-2}} \frac{d^{n-1} y_2(t)}{dt^{n-1}} + \dots + \frac{\tau_2^2}{\alpha_1} \frac{d^2 y_2(t)}{dt^2} + \tau_2 \frac{dy_2(t)}{dt} + y_2(t) \quad (3.24)$$

elde edilmiş olunur. $y_2(t)$ için t yerine $\frac{\tau_1}{\tau_2} t$ konulursa, ki bu ifade de (ε) 'a eşittir, $y_2(\frac{\tau_1}{\tau_2} t)$ halini alınır. $y_2(t)$ için diferansiyel denklemler tekrardan düzenlenirse;

$$\frac{dy_2\left(\frac{\tau_1}{\tau_2} t\right)}{dt} = \frac{dy_2(\varepsilon)}{d\left(\frac{\tau_1}{\tau_2} \varepsilon\right)} = \frac{\tau_1}{\tau_2} \frac{dy_2(\varepsilon)}{d\varepsilon} \quad (3.25)$$

$$\frac{d^2 y_2\left(\frac{\tau_1}{\tau_2} t\right)}{dt^2} = \left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right)^2 \frac{d^2 y_2(\varepsilon)}{d\varepsilon^2} \quad (3.26)$$

$$\frac{d^n y_2\left(\frac{\tau_1}{\tau_2} t\right)}{dt^n} = \left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right)^n \frac{d^n y_2(\varepsilon)}{d\varepsilon^n} \quad (3.27)$$

olur. Bu diferansiyel denklemlere göre $r(t)$ tekrar yazılırsa;

$$r(\varepsilon) = \frac{\tau_1^n}{\alpha_{n-1} \alpha_{n-2}^2 \dots \alpha_1^{n-1}} \frac{d^n y_2(\varepsilon)}{d\varepsilon^n} + \frac{\tau_1^{n-1}}{\alpha_{n-2} \alpha_{n-3}^2 \dots \alpha_1^{n-2}} \frac{d^{n-1} y_2(\varepsilon)}{d\varepsilon^{n-1}} + \dots + \frac{\alpha_1^2}{\alpha_1} \frac{d^2 y_2(\varepsilon)}{d\varepsilon^2} + \alpha_1 \frac{dy_2(\varepsilon)}{d\varepsilon} + y_2(\varepsilon) \quad (3.28)$$

elde edilir. Görüldüğü üzere denklem (3.24) ile denklem (3.28) aynı zaman bölgesindedir. Bu yüzden;

$$y_2(\varepsilon) = y_2\left(\frac{\tau_1}{\tau_2} t\right) = y_1(t) \quad (3.29)$$

ilişkisi elde edilir [2]. Bu ilişkiyi göstermek adına Örnek 3.1’de 6. mertebeden bir sistem ele alınarak genelleştirilmiş zaman sabiti ile sistemin cevap hızı arasında ilişkiye bakılacaktır.

Örnek 3.1:

6. mertebeden kararlı bir $G_1(s)$ sistemi olsun.

$$G_1(s) = \frac{c_0}{P_i(s)} = \frac{c_0}{c_n s^n + c_{n-1} s^{n-1} + \dots + c_1 s + c_0} \quad (3.30)$$

Karakteristik polinom ise;

$$P_1(s) = 5.292s^6 + 21.433s^5 + 57.87s^4 + 104.167s^3 + 125s^2 + 25s + 10 \quad (3.31)$$

şeklinde olsun. Bu sistem için genelleştirilmiş zaman sabitine bakarsak;

$$\tau_1 = \frac{c_1}{c_0} = \frac{25}{10} = 2.5 \quad (3.32)$$

olarak bulunur. Bu sistemin karakteristik oranları ise;

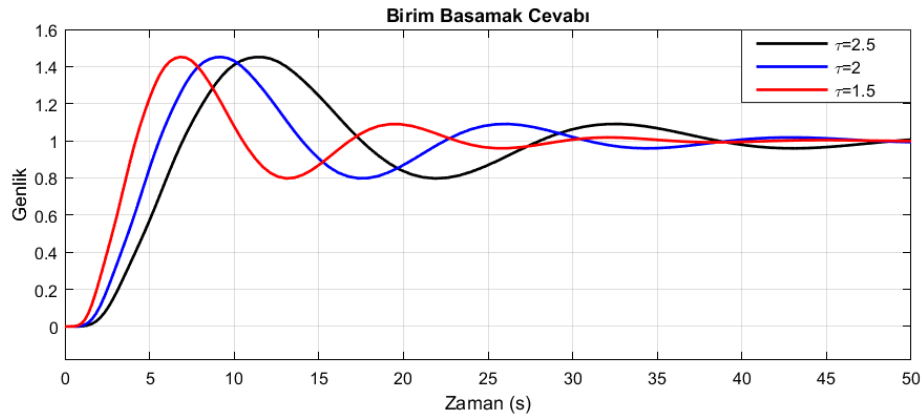
$$[\alpha_1 \ \alpha_2 \ \alpha_3 \ \alpha_4 \ \alpha_5] = [0.5 \ 6 \ 1.5 \ 1.5 \ 1.5] \quad (3.33)$$

şeklindedir. Karakteristik oranları değiştirmeden genelleştirilmiş zaman sabitlerini sırasıyla 2 ve 1.5 seçilirse $P_2(s)$ ve $P_3(s)$ polinomları;

$$P_2(s) = 1.386s^6 + 7.02s^5 + 23.70s^4 + 53.33s^3 + 80s^2 + 20s + 10 \quad (3.34)$$

$$P_3(s) = 0.245s^6 + 1.66s^5 + 7.5s^4 + 22.5s^3 + 45s^2 + 15s + 10 \quad (3.35)$$

olarak bulunur. Farklı genelleştirilmiş zaman sabitine göre bulunmuş aynı karakteristik oranlara sahip sistemlerin birim basamak cevapları Şekil 3.3’de verilmiştir.



Şekil 3.3 : Farklı genelleştirilmiş zaman sabitine sahip sistemlerin birim basamak cevabı.

Şekil 3.3'den görüldüğü üzere aynı karakteristik oranlara sahip sistemlerde genelleştirilmiş zaman sabiti artırılarak sistemin aşımını değiştirmeden daha yavaş bir sistem cevabı elde edilebilir [2]. Bir kontrol sisteminin birim basamak cevap hızını kontrol etmek için bir sonraki başlıklarda genelleştirilmiş zaman sabiti ve zaman ölçeklendirme yöntemlerinden bahsedilecektir.

3.1.3 Genelleştirilmiş zaman sabiti yöntemi ile sistem hızının ayarlanması

Belirli bir genelleştirilmiş zaman sabitine sahip sıfırı bulunmayan bir sistem için Teorem 1 istenilen sistem hızını sağlayacak yeni bir genelleştirilmiş zaman sabitini belirlemek için genişletilebilir.

Sonuç 1

$G_1(s)$ ve $G_2(s)$ sistemleri sırasıyla τ_1 ve τ_2 genelleştirilmiş zaman sabitine sahip aynı karakteristik orana sahip iki sıfırı bulunmayan sistem olsun. Keyfi t_1 ve t_2 zamanları için $y_1(t_1) = y_2(t_2)$ olması ancak ve ancak $\tau_2 = \frac{t_2}{t_1} \tau_1$ olmasıyla sağlanır [3]. Örnek 3.2'de 5. mertebeden bir sistem ele alınarak genelleştirilmiş zaman sabiti yöntemi ile sistemin cevap hızı belirlenen yükselme zamanı isterine göre hızlandırılacak ve yavaşlatılacaktır.

Örnek 3.2:

$G_1(s)$ transfer fonksiyonu 5. mertebeden sıfırı bulunmayan bir sistem olsun.

$$G_1(s) = \frac{1}{s^5 + 2.8s^4 + 5s^3 + 5.5s^2 + 3.4s + 1} \quad (3.36)$$

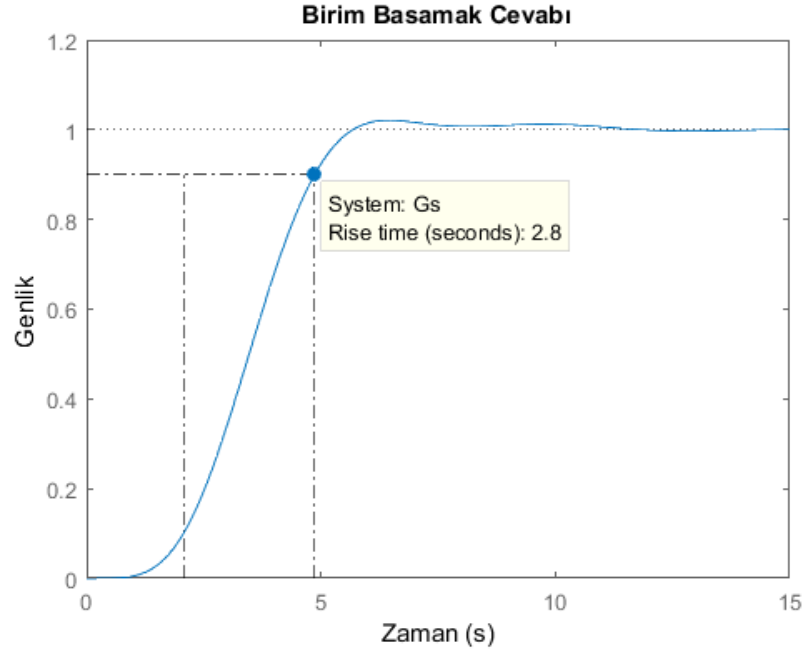
$G_1(s)$ sisteminin genelleştirilmiş zaman sabiti;

$$\tau_1 = \frac{a_1}{a_0} = \frac{3.4}{1} = 3.4 \quad (3.37)$$

olarak bulunur. Bu sistemin karakteristik oranları ise;

$$[\alpha_1 \ \alpha_2 \ \alpha_3 \ \alpha_4] = [1.568 \ 1.624 \ 1.779 \ 2.102] \quad (3.38)$$

olarak bulunur. $G_1(s)$ sisteminin birim basamak cevabı Şekil 3.4'de verilmiştir.



Şekil 3.4 : $G_1(s)$ sisteminin birim basamak cevabı.

Şekil 3.4'den görüldüğü üzere $G_1(s)$ sisteminin yükselme zamanı 2.8 saniyedir. Yükselme zamanı 1 saniye olarak hedeflenen yeni sisteme ise $G_2(s)$ diyelim. τ_2 genelleştirilmiş zaman sabiti Sonuç 1'e göre belirlenir.

$$\tau_2 = \frac{1}{2.8} 3.4 = 1.21 \quad (3.39)$$

Böylece ortaya çıkan sistem;

$$G_2(s) = \frac{1}{0.00581s^5 + 0.04555s^4 + 0.2278s^3 + 0.7015s^2 + 1.214s + 1} \quad (3.40)$$

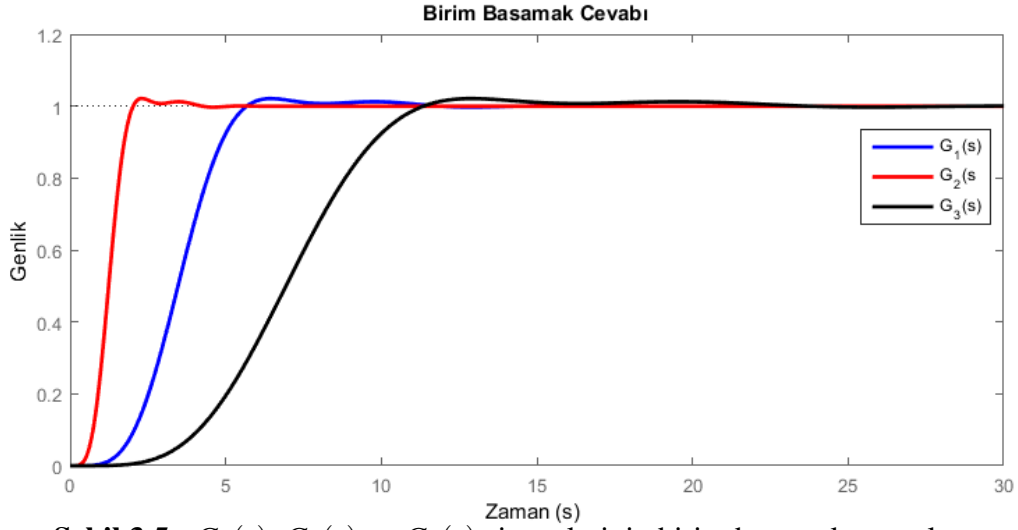
olarak bulunur. $G_1(s)$ sistemi, genelleştirilmiş zaman sabiti $\tau_2=1.21$ seçilerek aynı karakteristik oranlara sahip yükselme zamanı 1 saniye olan $G_2(s)$ sistemi elde edildi. Aynı şekilde, Sonuç 1'den yararlanılarak aynı karakteristik oranlara sahip daha yavaş yükselme zamanına sahip $G_3(s)$ sistemini elde etmek mümkündür. $G_3(s)$ sisteminin yükselme zamanı olarak $G_1(s)$ sisteminin yükselme zamanının 2 katını seçilirse;

$$\tau_3 = 2 3.4 = 6.8 \quad (3.41)$$

olarak bulunur. Böylece ortaya çıkan sistem;

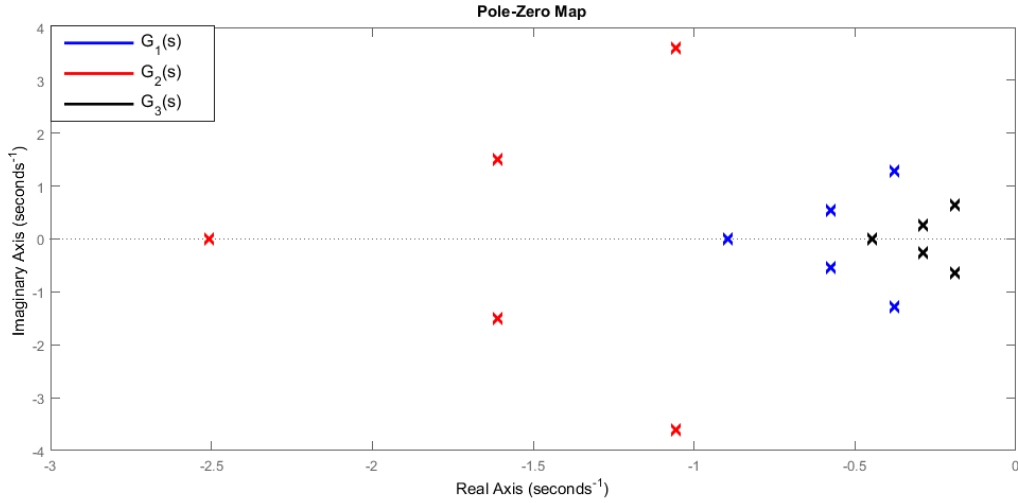
$$G_3(s) = \frac{1}{32s^5 + 44.8s^4 + 40s^3 + 22s^2 + 6.8s + 1} \quad (3.42)$$

olarak bulunur. $G_1(s)$, $G_2(s)$ ve $G_3(s)$ sistemlerinin birim basamak cevapları Şekil 3.5'de verilmiştir.



Şekil 3.5 : $G_1(s)$, $G_2(s)$ ve $G_3(s)$ sistemlerinin birim basamak cevapları.

$G_1(s)$, $G_2(s)$ ve $G_3(s)$ sistemlerinin kutup sıfır dağılımı Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6 : $G_1(s)$, $G_2(s)$ ve $G_3(s)$ sistemlerinin kutup sıfır dağılımı.

Şekil 3.6'da görüldüğü üzere aynı karakteristik oranlara sahip sistemlerin kutupları orijinden çekilen düz bir çizgi boyunca hareket eder [1, 3].

3.1.4 Zaman ölçeklendirme yöntemi ile sistem hızının ayarlanması

$R(s)$ birim basamak girişinde $Y(s)$ çıkışını veren $G(s)$ kapalı çevrim transfer fonksiyonu olsun. $y(t)$ sistem cevabını $\beta > 1$ olacak şekilde $y(\beta t)$ yaparak hızlandırılabilir. Aynı şekilde $0 < \beta < 1$ aralığı için sistem cevabı yavaşlatılabilir. Bunun ispatı Laplace dönüşümü ile açıklanabilir. Eğer bir $x(t)$ fonksiyonun Laplace dönüşümü $X(s)$ ise, $x(\beta t)$ fonksiyonun Laplace dönüşümü $(1/\beta)X(s/\beta)$ 'dir. Aşımın aynı kalması koşuluyla sadece zaman bölgesindeki hızlanma dikkate alınır,

$L\{x(\beta t)\} \rightarrow X(s/\beta)$ olur. Böyle $Y(s)$ sistem cevabı s yerine s/β koyarak hızlandırılabilir ya da yavaşlatılabilir [10]. Örnek 3.3’de 5. mertebeden bir sistem ele alınarak zaman ölçeklendirme yöntemi ile sistemin cevap hızını $\beta > 1$ ve $0 < \beta < 1$ durumları için değişimi incelenecektir.

Örnek 3.3:

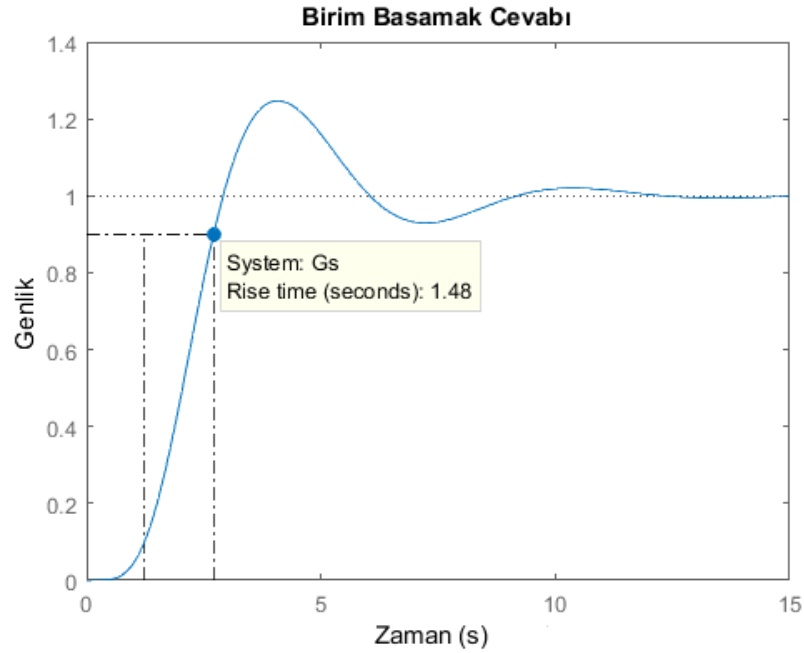
$G_1(s)$ transfer fonksiyonu 5. mertebeden sıfırı bulunmayan bir sistem olsun.

$$G_1(s) = \frac{12.615}{s^5 + 4.3s^4 + 14.21s^3 + 23.135s^2 + 20.59s + 12.615} \quad (3.43)$$

Bu sistemin karakteristik oranları ise;

$$[\alpha_1 \ \alpha_2 \ \alpha_3 \ \alpha_4] = [1.4526 \ 1.8293 \ 2.0298 \ 1.3012] \quad (3.44)$$

olarak bulunur. $G_1(s)$ sisteminin birim basamak cevabı Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.7 : $G_1(s)$ sisteminin birim basamak.

Şekil 3.7’de görüldüğü üzere $G_1(s)$ sisteminin yükselme zamanı 1.48 saniyedir. Aynı karakteristik oranlara sahip yükselme zamanı 1 saniye ve 2 saniye olan sistemler sırasıyla $G_2(s)$ ve $G_3(s)$ olsun. $G_2(s)$ ve $G_3(s)$ sistemleri için β ’lar sırasıyla $\beta = \frac{t_1}{t_2} = \frac{1.48}{1} = 1.48$ ve $\beta = \frac{t_1}{t_2} = \frac{1.48}{2} = 0.74$ olmalıdır. $G_2(s)$ ve $G_3(s)$ sistemleri denklem (3.45) göre hesaplanır.

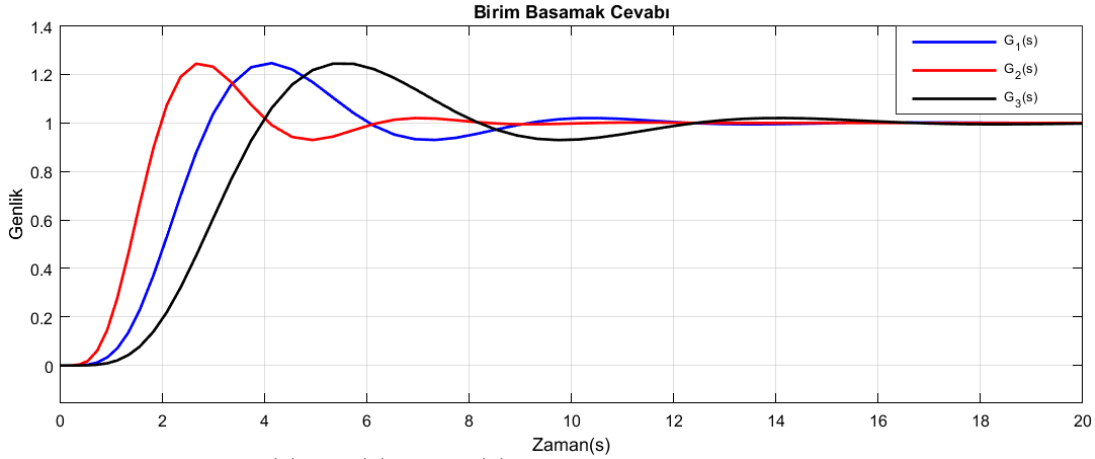
$$G_i(s) = \frac{\frac{12.615}{\beta^0}}{\frac{1}{\beta^5}s^5 + \frac{4.3}{\beta^4}s^4 + \frac{14.21}{\beta^3}s^3 + \frac{23.135}{\beta^2}s^2 + \frac{20.59}{\beta^1}s + \frac{12.615}{\beta^0}} \quad (3.45)$$

Böylece $G_2(s)$ ve $G_3(s)$ sistemleri;

$$G_2(s) = \frac{12.615}{0.1428s^5 + 0.9062s^4 + 4.42s^3 + 10.62s^2 + 13.95s + 12.615} \quad (3.46)$$

$$G_3(s) = \frac{12.615}{4.569s^5 + 14.5s^4 + 35.36s^3 + 42.48s^2 + 27.9s + 12.615} \quad (3.47)$$

olarak bulunur. $G_1(s)$, $G_2(s)$ ve $G_3(s)$ sistemlerinin birim basamak cevapları Şekil 3.8’de verilmiştir.



Şekil 3.8 : $G_1(s)$, $G_2(s)$ ve $G_3(s)$ sistemlerinin birim basamak cevapları.

Şekil 3.8’de görüldüğü üzere genelleştirilmiş zaman sabiti yönteminde olduğu gibi zaman ölçeklendirme yöntemiyle de istenilen yükselme zamanını elde etmek mümkündür [29].

3.1.5 Sistem aşım değerinin ayarlanması

KOA yönteminin ispatı kısmında Kessler’in 2 çevrimli kaskad sistemi ile sönüm oranı ile karakteristik oranlar arasındaki ilişki gösterildi. Sönüm oranı ile aşım arasında doğrudan bir ilişki bulunmaktadır.

Teorem 2

$G_1(s)$ n. mertebeden sıfırı bulunmayan bir sistem olsun.

$$G_1(s) = \frac{a_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} \quad (3.48)$$

$G_2(s)$ sistemi ise $G_1(s)$ sistemin k katı karakteristik oranlarına sahip bir sistem olsun.

$$G_2(s) = \frac{a'_0}{a'_n s^n + a'_{n-1} s^{n-1} + \dots + a'_1 s + a'_0} \quad (3.49)$$

Bu durumda $G_2(s)$ sistemine ait transfer fonksiyonu denklem (3.50)’deki gibi tekrar düzenlenebilir.

$$G_2(s) = \frac{k^{\frac{1}{2}n^2 - \frac{1}{2}n} a_0}{a_n s^n + k^{n-1} a_{n-1} s^{n-1} + \dots + k^{\frac{1}{2}n^2 - \frac{1}{2}n-1} a_1 s + k^{\frac{1}{2}n^2 - \frac{1}{2}n} a_0} \quad (3.50)$$

$k > 1$ olması durumunda sönüm oranı artarken, $0 < k < 1$ olması durumunda sönüm oranı azalacaktır [20].

İspat

$G(s)$ sıfırı bulunmayan bir sistem olsun.

$$G(s) = \frac{a_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} \quad (3.51)$$

Bu $G(s)$ sisteminin pay ve paydasını a_0 'a bölerek sadeleştirilirse;

$$G(s) = \frac{1}{\frac{a_n}{a_0} s^n + \frac{a_{n-1}}{a_0} s^{n-1} + \dots + \frac{a_1}{a_0} s + 1} \quad (3.52)$$

şeklini alır. $G(s)$ sistemin karakteristik polinomunun, polinom katsayılarına ait matris

A matrisi ve ters karakterisik oranlarına b_i ($b_i = \frac{a_i}{a_{i+1}}$) ve ters karakterisik oranların birbirine oranı c_i ($c_i = \frac{b_{i+1}}{b_i}$) olsun. Bu durumda A matrisi;

$$A = \begin{bmatrix} \frac{1}{\prod_{i=0}^{n-1} b_i} & \frac{1}{\prod_{i=0}^{n-2} b_i} & \dots & \frac{1}{\prod_{i=0}^1 b_i} & \frac{1}{\prod_{i=0}^0 b_i} \end{bmatrix} \quad (3.53)$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{1}{[\prod_{i=0}^{n-2} c_i \prod_{i=0}^{n-3} c_i \dots \prod_{i=0}^0 c_i] b_0^n} & \frac{1}{[\prod_{i=0}^{n-3} c_i \prod_{i=0}^{n-4} c_i \dots \prod_{i=0}^0 c_i] b_0^{n-1}} & \dots & \frac{1}{b_0} & 1 \end{bmatrix} \quad (3.54)$$

şeklinde ifade edilir. Karakteristik oranlar k kadar artırıldığı zaman A karakteristik polinom katsayı matrisi;

$$A = \begin{bmatrix} \frac{1}{k^{\frac{1}{2}n^2 - \frac{1}{2}n} [\prod_{i=0}^{n-2} c_i \prod_{i=0}^{n-3} c_i \dots \prod_{i=0}^0 c_i] b_0^n} & \frac{1}{k^{\frac{1}{2}n^2 - \frac{1}{2}n-1} [\prod_{i=0}^{n-3} c_i \prod_{i=0}^{n-4} c_i \dots \prod_{i=0}^0 c_i] b_0^{n-1}} & \dots & \frac{1}{b_0} & 1 \end{bmatrix} \quad (3.55)$$

halini alır [30]. Kutupları keyfi seçilmiş sistemler için KOA ile nasıl aşımın ayarlanacağını Örnek 3.4'te gösterilecektir.

Örnek 3.4:

$G_1(s)$ transfer fonksiyonu 5. mertebeden sıfırı bulunmayan bir sistem olsun.

$$G_1(s) = \frac{0.21}{s^5 + 2.97s^4 + 2.78s^3 + 2.05s^2 + 0.9s + 0.21} \quad (3.56)$$

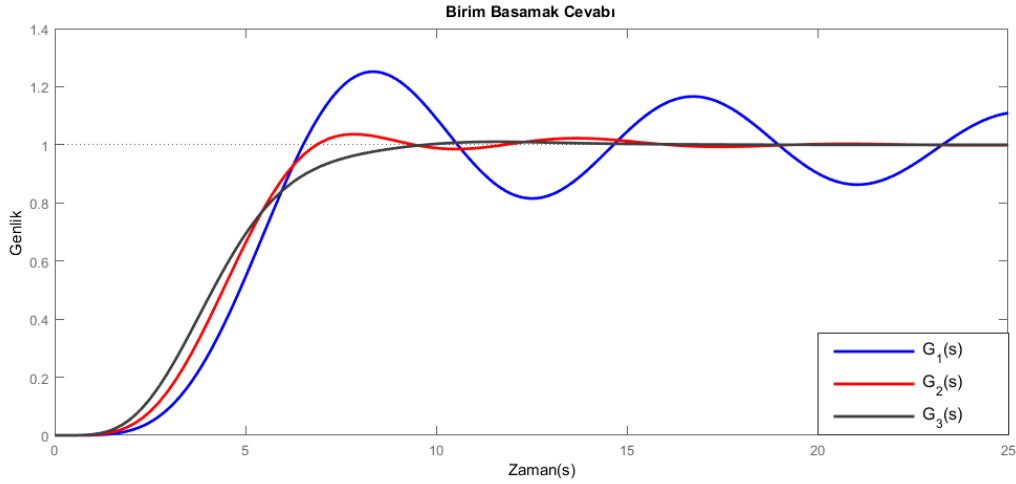
Denklem (3.50)'deki verilen ilişkiden yararlanılarak $k=1.1$ ve $k=1.2$ için sistemlerin aşımalarının nasıl değiştiği gözlemlenecektir. $k < 1$ olduğu durum için bu sistem cevabı kararsız olduğu için $k < 1$ durumu için aşım değişimine bakılmamıştır. $k=1.1$ ($G_2(s)$) ve $k=1.2$ ($G_3(s)$) için $G_1(s)$ transfer fonksiyonu denklem (3.57)'deki halini alır.

$$G_k(s) = \frac{0.21k^{10}}{s^5 + 2.97k^{n-1}s^4 + 2.78k^{2n-3}s^3 + 2.05k^{\frac{1}{2}n^2 - \frac{1}{2}n-1}s^2 + 0.9k^{\frac{1}{2}n^2 - \frac{1}{2}n}s + 0.21k^{\frac{1}{2}n^2 - \frac{1}{2}n}} \quad (3.57)$$

$G_1(s)$ sistemi için 5. mertebeden bir sistem olduğu için $n=5$ 'tir. Bu durumda $G_k(s)$ denklem (3.58)'deki gibi tekrar yazılabilir.

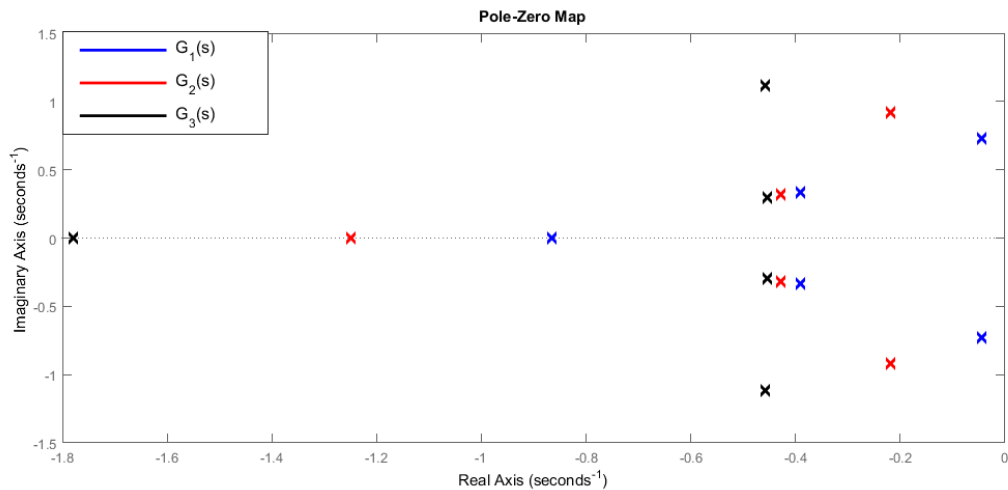
$$G_k(s) = \frac{0.21k^{10}}{s^5 + 2.97k^4s^4 + 2.78k^7s^3 + 2.05k^9s^2 + 0.9k^{10}s + 0.21k^{10}} \quad (3.58)$$

Şekil 3.9'da $G_1(s)$, $G_2(s)$ ve $G_3(s)$ için birim basamak cevapları verilmiştir.



Şekil 3.9 : $G_1(s)$, $G_2(s)$ ve $G_3(s)$ sistemlerinin birim basamak cevapları.

Daha önce belirtildiği gibi $k>1$ olması durumunda sönüm oranı artmasıyla, sistemlerin birim basamak cevapları karşılaştırıldığında $k=1.2$ için en az aşım gözlenmiştir. $G_1(s)$, $G_2(s)$ ve $G_3(s)$ sistemlerinin kutup sıfır dağılımı Şekil 3.10'da verilmiştir.

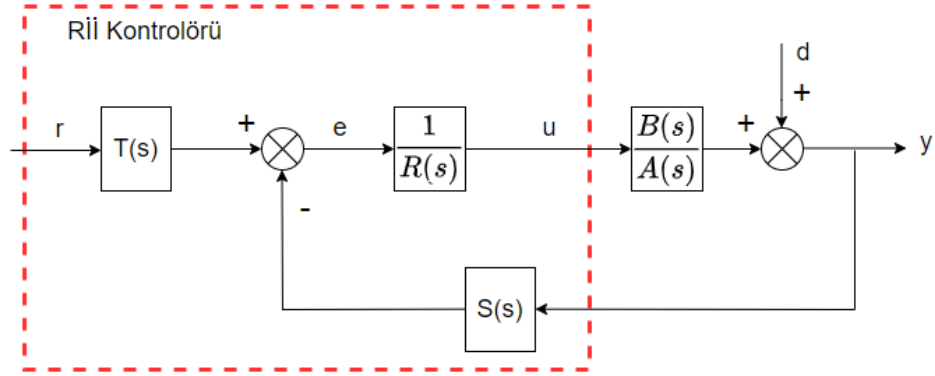


Şekil 3.10 : $G_1(s)$, $G_2(s)$ ve $G_3(s)$ sistemlerinin kutup sıfır dağılımı.

Şekil 3.10'dan da görüldüğü üzere $k=1.2$ için sistem kutuplarını orijinden daha uzaklaştırarak sistemin aşımını azaltılmıştır [20].

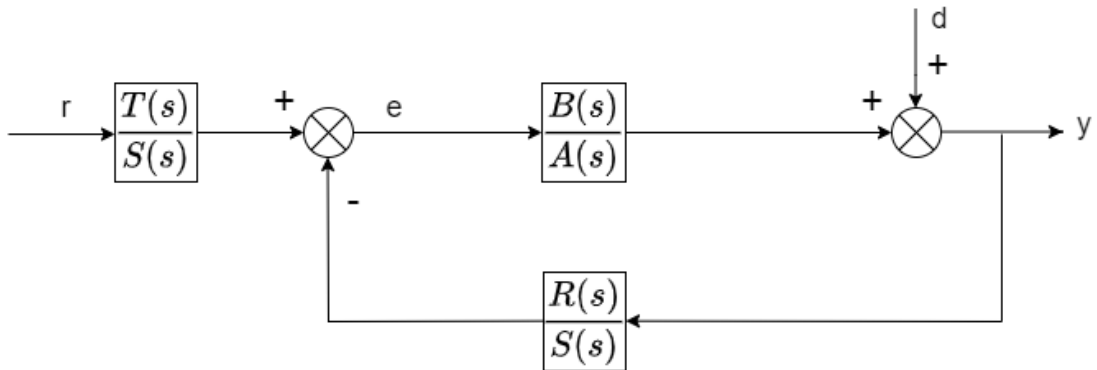
3.2 Referans İşaret İzleme Kontrolör Yapısı

Referans İşaret İzleme (Referans Signal Tracking) kontrolörü ilk olarak Ioan Landau [31] tarafından ayrık zamanlı kontrolör tasarımı için önerilerek literatüre kazandırılmıştır. PID kontrolör referans takibi için çok etkili bir kontrolör olmasına rağmen bozucu bastırma başarımı için çok etkili bir kontrolör değildir. Yapısında ileri beslemeli kontrolör ve geri beslemeli kontrolör barındıran Rİİ kontrolörü daha başarılı bozucu bastırma başarımı için kullanılabilir. Şekil 3.11’de Rİİ kontrolörüne ait blok diyagramı verilmiştir [32].



Şekil 3.11 : Rİİ kontrolör yapısı.

Şekil 3.12’de modifiye edilmiş Rİİ kontrolörüne ait blok diyagramı verilmiştir [32].



Şekil 3.12 : Modifiye edilmiş Rİİ kontrolör yapısı.

Şekil 3.12’deki blok diyagramındaki transfer fonksiyonlarına bakıldığında $\frac{B(s)}{A(s)}$ sistem, $\frac{R(s)}{S(s)}$ geri besleme kontrolörü ve $\frac{T(s)}{S(s)}$ ise ileri besleme kontrolörünü temsil etmektedir [32]. Rİİ kontrolör yapısında R(s) ve S(s) polinomları sistemin kararlılığı,

aşım ve yükselme zamanı gibi zaman tanım bölgesi kriterleri için önem arz etmektedir. T(s) filtresi ise istenilen referans takibini sağlamak için tasarlanır [31].

Rİİ kontrolör tasarımı, iki serbestlik mertebesine sahip olan kutup-sıfır götürmesine temel alan bir kutup atama yöntemine göre yapılır. Ayrıca, Rİİ kontrolörünün tasarımı "diophantine" denklem çözümüne dayanmaktadır [33]. Şekil 3.11'deki blok diyagramı ele alındığında, giriş ve çıkış arasındaki kapalı çevrim transfer fonksiyonu;

$$C(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{T(s) B(s)}{P(s)} \quad (3.59)$$

şeklindedir. Denklem (3.59)'daki P(s) polinomu;

$$P(s) = A(s)R(s) + S(s)B(s) \quad (3.60)$$

şeklinde olup, karakteristik polinomu temsil etmektedir. R(s) ve S(s) polinomlarının mertebeleri mer(R) ve mer(S) olarak gösterilmek üzere, mer(R)=mer(S) olması durumunda kontrolör parametreleri sayısı (s_p);

$$s_p = 2(\text{mer}(R) + 1) = 2 \text{mer}(R) + 2 \quad (3.61)$$

olur. P(s) polinomunun mertebesi için $\frac{B(s)}{A(s)}$ transfer fonksiyonun nedensel olduğu ve mer(A)> mer(B) kabulü yapılırsa;

$$\text{mer}(P) = \max(\text{mer}(AR), \text{mer}(BS)) = \text{mer}(AR) = \text{mer}(A) + \text{mer}(R) \quad (3.62)$$

şeklinde bulunur. P(s) polinomunda bulunan terim sayısı (t_{say}) ise;

$$t_{say} = \text{mer}(C) + 1 = \text{mer}(A) + \text{mer}(R) + 1 \quad (3.63)$$

olur. Benzersiz tek çözüm için s_p ile t_{say} birbirine eşit olmalıdır. Bu ilişki kurulduğu zaman

$$s_p = t_{say} \quad (3.64)$$

$$2\text{mer}(R) + 2 = \text{mer}(A) + \text{mer}(R) + 1 \quad (3.65)$$

$$\text{mer}(R) = \text{mer}(A) - 1 \quad (3.66)$$

olarak bulunur. Bu ilişkiden yararlanılarak C(s) karakteristik polinomunun minimum mertebesi

$$\text{mer}(C) = 2\text{mer}(A) - 1 \quad (3.67)$$

olacaktır [34].

3.3 Karakteristik Oran Atama Yöntemiyle Yüksek Mertebeden Kontrolör Tasarımı

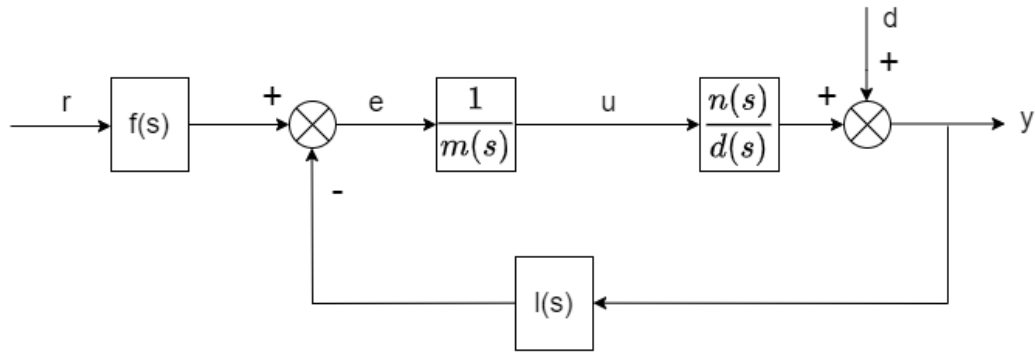
Bu başlık altında n. mertebeden bir sistem için KOA yöntemiyle Rİİ kontrolör yapısı kullanılarak yüksek mertebeden kontrolör tasarımı anlatılacaktır. Şekil 3.11'deki Rİİ kontrolör yapısı göz önüne alınsın. Rİİ kontrolör yapısındaki transfer fonksiyonları;

$$T(s) = f(s) \quad (3.68)$$

$$R(s) = m(s) \quad (3.69)$$

$$S(s) = l(s) \quad (3.70)$$

şeklinde olsun. Kontrol edilecek $G(s)$ transfer fonksiyonu ise $G(s) = \frac{n(s)}{d(s)}$ şeklinde tekrar yazılabilir. Bu yeni durumda oluşan blok diyagramı Şekil 3.13'de verilmiştir.

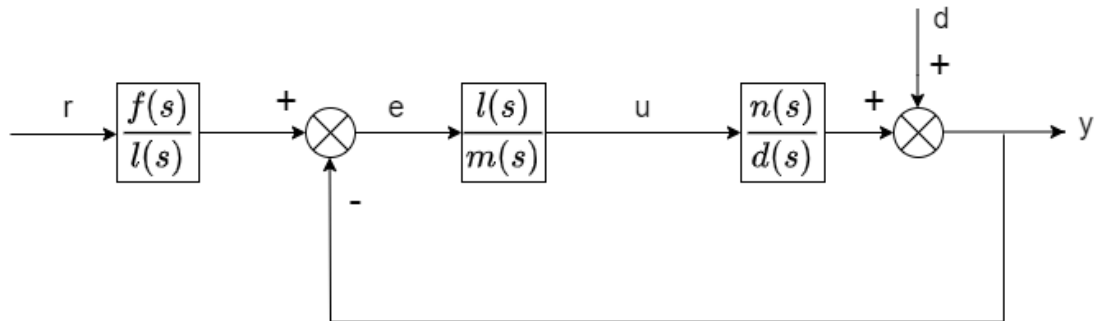


Şekil 3.13 : Rİİ kontrolör yapısı.

Şekil 3.13'deki blok diyagramı ele alındığında kapalı çevrime ait transfer fonksiyonu;

$$G_{cl}(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{f(s) n(s)}{p(s)} = \frac{f(s) n(s)}{m(s)d(s) + l(s)n(s)} \quad (3.71)$$

şeklinde elde edilir. Şekil 3.13'deki geri besleme yolundaki $l(s)$ nedensel olmadığı için Rİİ kontrolör yapısı Şekil 3.14'deki gibi indirgenebilir [3].



Şekil 3.14 : İndirgenmiş Rİİ kontrolör yapısı.

$G(s) = \frac{n(s)}{d(s)}$ sisteminin sıfırları için 3 durum mevcuttur. Bu durumlar;

- $G(s)$ sistemi sıfırı bulunmayan bir sistem olup, sıfırı olmayabilir,
- $G(s)$ sistemi sol-yarı düzlemde sıfır ya da sıfırları olabilir,
- $G(s)$ sistemi sağ-yarı düzlemde sıfır ya da sıfırları olabilir.

şeklindedir. Bu bahsedilen üç durum için sırasıyla KOA atama yöntemiyle n . mertebeden sistemler için nasıl kontrolör tasarımı yapılacağı alt başlıklarda detaylı olarak anlatılacaktır.

3.3.1 Sıfırı bulunmayan sistemler için karakteristik oran atama yöntemiyle kontrolör tasarımı

KOA yöntemi baskın kutup atama yöntemlerinden biri olup, kutup-sıfır götürmesiyle kontrolör tasarımı temel alır. Sıfırı bulunmayan bir sistemde sıfır olmadığı için kutup-sıfır götürmesine gerek yoktur. $G(s)$ denklem (3.72)'de verilen gibi bir sıfırı bulunmayan sistem olsun.

$$G(s) = \frac{a_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} \quad (3.72)$$

$G(s)$ sistemi n . mertebeden olduğu için Şekil 3.14'de verilen Rİİ kontrolör yapısına göre $m(s)$ ve $l(s)$ polinomları diophantine denkleminde $n-1$. mertebeden olmalıdır. Kapalı çevrim transfer karakteristik polinomu $p(s)$ ise bu durumda $2n-1$. mertebeden olur.

3.1 bölümün altında daha önce bahsedildiği üzere KOA yönteminde ilk adım K -polinomunu seçmektir. Denklem (3.6) ve denklem (3.7) tekrar göz önüne alındığında ilk olarak α_1 karakteristik oranı seçilmelidir. KOA yöntemiyle diophantine denkleminde göre $n-1$. mertebeden kontrolör tasarımı mümkün olduğu için 1. mertebeden sistemlere kontrolör tasarımı mümkün değildir. 2. mertebeden 8. mertebeye kadar sıfırı bulunmayan sistemler için farklı α_1 değerleri için $\tau = 1$ olması durumundaki aşım değerleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 : Farklı α_1 değerleri için $\tau=1$ olması durumundaki n. mertebeden sistemlerin KOA yöntemine göre aşım değerleri

Mertebe (n)	$\alpha_1 = 2$	$\alpha_1 = 2.25$	$\alpha_1 = 2.5$	$\alpha_1 = 3$	$\alpha_1 = 3.5$	$\alpha_1 = 4$
2	%4.3210	%2.8369	%1.7322	%0.4333	%0.0245	%0
3	%10.5346	%4.3771	%0.8085	%0	%0	%0
4	%15.3414	%2.3971	%0	%0	%0	%0
5	%18.0771	%0.2404	%0	%0	%0	%0
6	%19.0140	%0.2519	%0	%0	%0	%0
7	%18.7959	%0	%0	%0	%0	%0
8	%18.1137	%0	%0	%0	%0	%0

Çizelge 3.1’den görüldüğü üzere KOA yöntemi ile kontrolör tasarlanacak sistemler için, kapalı çevrim karakteristik polinomunun mertebesi eğer 4 ve 4’ten daha yüksekse $\alpha_1=2.5$ seçildiği zaman aşımsız bir cevap elde etmek mümkündür. Kapalı çevrim karakteristik polinomunun mertebesi 2 ve 3 olması durumunda ise α_1 sırasıyla 4 ve 3 seçilirse sıfırı bulunmayan sistemlerde aşımsız birim basamak cevapları elde edilebilir. Sıfırı olan sistemlerde aşım gözlenilebileceği için sıfırı bulunmayan sistemlerde aşımsız sonuç veren α_1 değerleri seçildiğinde, sıfırı olan sistemlerde az da olsa bir aşımlı cevap gözlenebilir. Bu durumda α_1 ya da τ biraz daha yüksek seçilerek aşımsız bir cevap elde edilebilir. KOA yöntemi için diğer bir kontrolör tasarım parametresi olan τ değerinin, kapalı çevrimli sistemin birim basamak cevap hızına doğrudan etkisi vardır. KOA yöntemiyle teorik olarak çok hızlı sistem cevapları elde etmek mümkün olsa da, bu yüksek hızlı sistem cevaplarını sağlayacak kontrol işaretlerinin genliği çok yüksek olacağından yapılan tasarım çok gerçekçi olmayacaktır. İstenilen yerleşme zamanına t_s denilirse τ parametresinin seçimi denklem (3.73)’deki gibi yapılabilir [35].

$$\tau = \frac{t_s}{(2.5 \sim 3)} \quad (3.73)$$

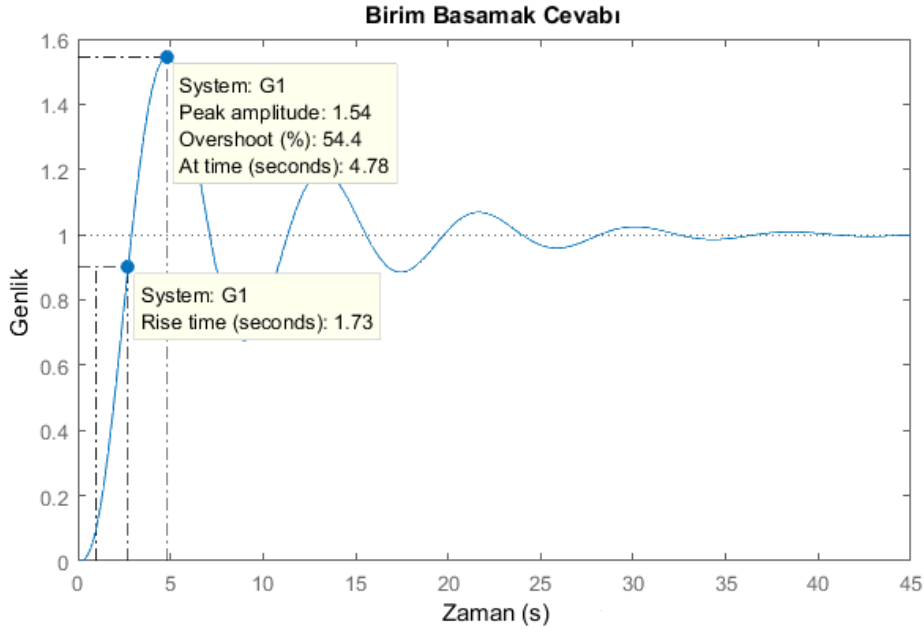
Örnek 3.5’de sıfırı bulunmayan bir sistem için kontrolör tasarımı gösterilecektir.

Örnek 3.5:

G(s) transfer fonksiyonu 3. mertebeden sıfırı bulunmayan bir sistem olsun.

$$G(s) = \frac{1}{s^3 + 2s^2 + s + 1} \quad (3.74)$$

G(s) transfer fonksiyonun açık çevrim birim basamak cevabı Şekil 3.15’de verilmiştir.



Şekil 3.15 : $G(s)$ sisteminin birim basamak cevabı.

Şekil 3.15'deki açık çevrim birim basamak cevabına bakıldığında zaman, sistem %54.4'lik bir aşım ve 1.73 saniyelik bir yükselme zamanına sahiptir. Tasarlanacak kontrolör ile kapalı çevrim transfer fonksiyonunun birim basamak cevabı için sistemin yükselme zamanı 3 saniye ve aşımsız sistem cevabı elde edilecek kontrolör tasarımı yapılacaktır. Sistem 3. mertebeden bir sistem olduğu için tasarlanacak kontrolör 2. mertebeden olacaktır. Böylece kapalı çevrim karakteristik polinomun mertebesi 5. mertebeden olacaktır. Bu duruma göre kapalı çevrim karakteristik polinomu,

$$m(s) = (m_2s^2 + m_1s + m_0) \quad (3.75)$$

$$d(s) = (s^3 + 2s^2 + s + 1) \quad (3.76)$$

$$l(s) = (l_2s^2 + l_1s + l_0) \quad (3.77)$$

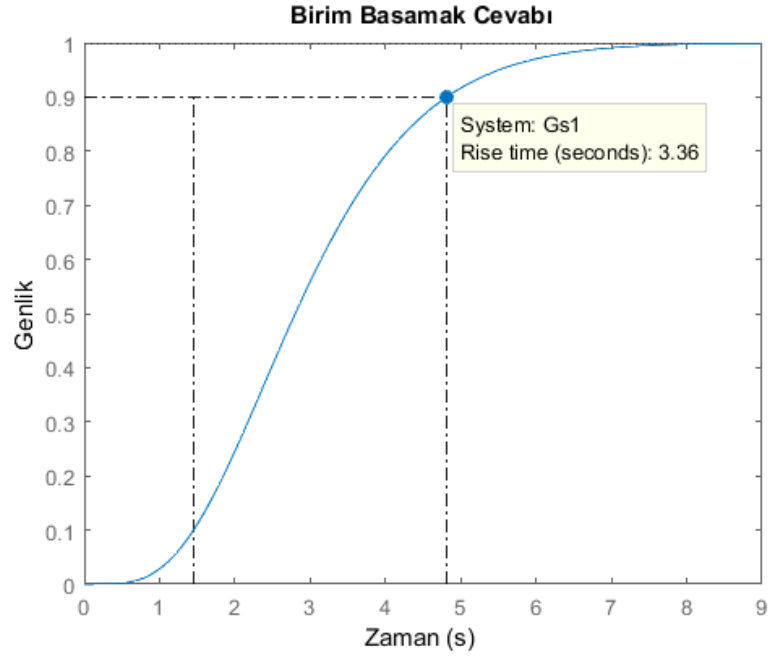
$$n(s) = (1) \quad (3.78)$$

olmak üzere

$$p(s) = m(s)d(s) + l(s)n(s) \quad (3.79)$$

şeklinde ifade edilebilir.

İlk olarak $\tau = 3$ ve aşımsız bir sistem cevap için $\alpha_1 = 2.5$ seçildiği durumda, kapalı çevrim sistemin birim basamak cevabına bakılacaktır. Birim basamak cevabı Şekil 3.16'da verilmiştir.

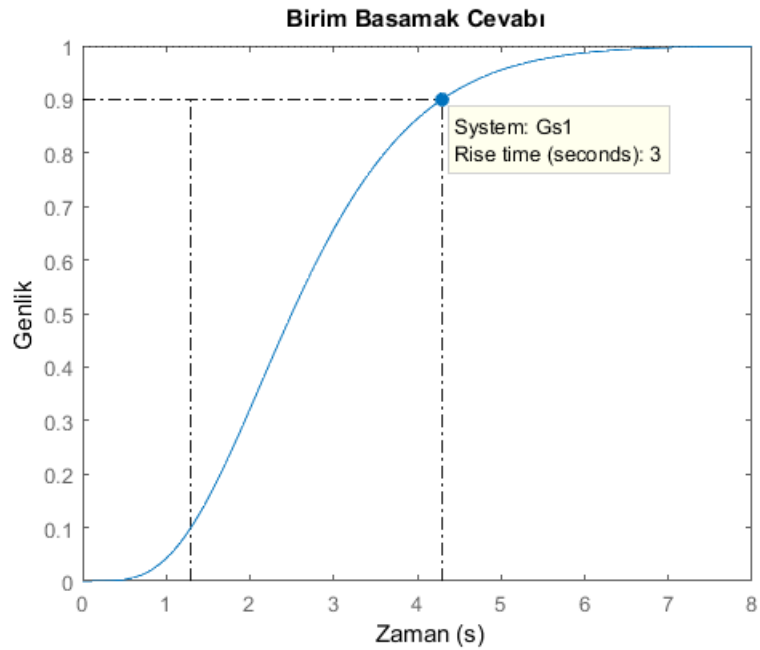


Şekil 3.16 : $\tau = 3$ ve $\alpha_1 = 2.5$ durumunda kapalı çevrim birim basamak cevabı.

Şekil 3.16'dan görüldüğü üzere sistem cevabı aşım yapmamakta ve sistemin yükselme zamanı 3.36 saniyedir. Sistemin yükselme zamanını 3 saniye yapmak için;

$$\tau = \frac{3}{3.36} 3 = 2.68 \quad (3.80)$$

seçilir. $\tau = 2.68$ ve $\alpha_1 = 2.5$ durumunda kapalı çevrim birim basamak cevabı Şekil 3.17'de verilmiştir.



Şekil 3.17 : $\tau = 2.68$ ve $\alpha_1 = 2.5$ durumunda kapalı çevrim birim basamak cevabı.

Şekil 3.17’den görüldüğü üzere kapalı çevrim sistem birim basamak cevabı aşırı ve yükselme zamanı ise 3 saniye olmuştur. Bu sistem için tasarlanan kontrolör için tasarımı sonucu oluşan kapalı çevrim transfer fonksiyonu;

$$G_{cl}(s) = \frac{1}{0.04157s^5 + 0.3971s^4 + 1.517s^3 + 2.866s^2 + 2.677s + 1} \quad (3.81)$$

olarak bulunur. Kapalı çevrim transfer karakteristik polinomu ise;

$$p(s) = 0.04157s^5 + 0.3971s^4 + 1.517s^3 + 2.866s^2 + 2.677s + 1 \quad (3.82)$$

şeklindedir. Bu kapalı çevrimi sağlayacak m(s) ve l(s) polinomları ise;

$$m(s) = 0.04157s^2 + 0.3139s + 0.8477 \quad (3.83)$$

$$l(s) = 0.815s^2 + 1.515s + 0.1523 \quad (3.84)$$

olarak bulunur. Kapalı çevrim birim basamak değerinin son değeri 1’e yerleştiği için;

$$f(s) = 1 \quad (3.85)$$

şeklinde bulunur.

3.3.2 Sol-yarı düzlemde sıfırı olan sistemler için karakteristik oran atama yöntemiyle kontrolör tasarımı

KOA yöntemi baskın kutup atama yöntemlerinden biri olduğu için sol-yarı düzlemde sıfırı olan sistemler için kutup-sıfır götürmesi yapılarak kontrolör tasarımı yapılır. G(s) denklem (3.86)’de gibi bir sol-yarı düzlemde sıfırı olan bir sistem olsun.

$$G(s) = \frac{b_1s + b_0}{a_ns^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_1s + a_0} \quad (3.86)$$

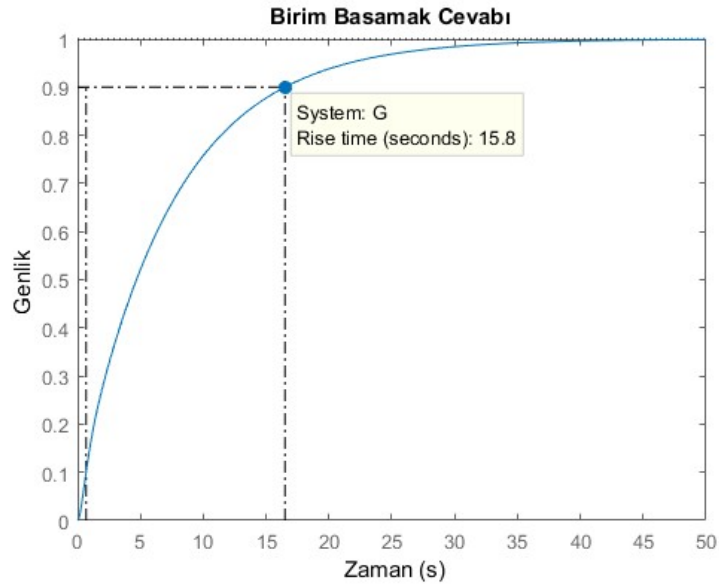
G(s) sistemi n. mertebeden olduğu için Şekil 3.14’te verilen Rİİ kontrol yapısına göre m(s) ve l(s) polinomları diophantine denkleminde n-1. mertebeden olmalıdır. Ancak m(s) transfer fonksiyonun köklerinden biri açık çevrim transfer fonksiyonun sıfırlarından biri olacaktır. Diğer n-2 kökü ise K-polinomunu ile belirlenir. Aynı şekilde, kapalı çevrime ilişkin karakteristik polinomu p(s) ise bu durumda 2n-1. mertebeden olur. Örnek 3.6’da sol-yarı düzlemde sıfırı olan sistemler için kontrolör tasarımı gösterilecektir.

Örnek 3.6:

$G(s)$ transfer fonksiyonu 3. mertebeden sol-yarı düzlemde sıfırı olan bir sistem olsun.

$$G(s) = \frac{s+1}{s^3 + 5s^2 + 8s + 1} \quad (3.87)$$

$G(s)$ transfer fonksiyonun açık çevrim birim basamak cevabı Şekil 3.18’de verilmiştir.



Şekil 3.18 : $G(s)$ sisteminin birim basamak.

Şekil 3.18’deki açık çevrim birim basamak cevabı 15.8 saniyelik bir yükselme zamanına sahiptir. Tasarlanacak kontrolör ile kapalı çevrim transfer fonksiyonun birim basamak cevabı için yükselme zamanı açık çevriminden yaklaşık 4 kat daha hızlı olacak yükselme zamanı ($t_r=4$ saniye) ve aşısız sistem cevabı elde edilecek kontrolör tasarımı yapılacaktır. Sistem 3. mertebeden bir sistem olduğu için tasarlanacak kontrolör 2. mertebeden olacaktır. Böylece kapalı çevrime ilişkin karakteristik polinomun mertebesi 5 olacaktır. Sistemin $s=-1$ ’de bir sıfırı olduğu için $m(s)$, $n(s)$ polinomları

$$m(s) = \bar{m}(s)(s+1); \bar{m}(s) = m_1s + m_0 \quad (3.88)$$

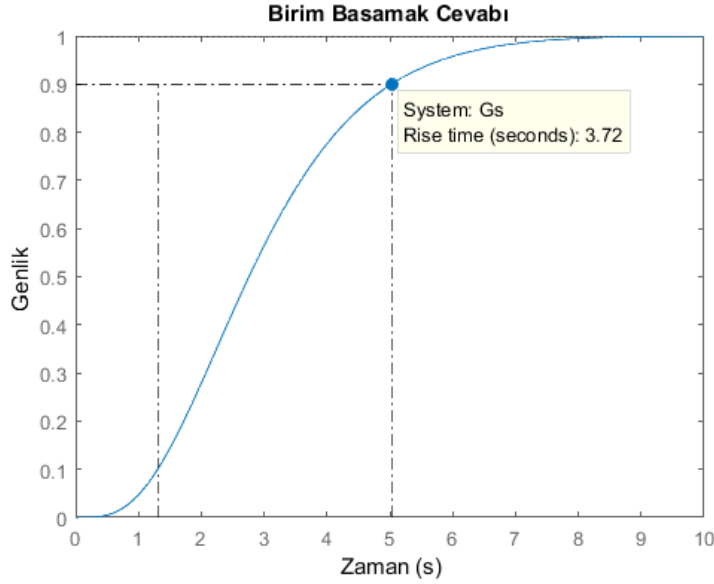
$$n(s) = \bar{n}(s)(s+1); \bar{n}(s) = 1 \quad (3.89)$$

şeklinde ifade edilebilir. Buradan,

$$p(s) = \bar{p}(s)(s+1) = \bar{m}(s)(s+1)d(s) + l(s)\bar{n}(s)(s+1) \quad (3.90)$$

$$p(s) = (m_1s + m_0)(s+1)(s^3 + 4s^2 + 9s + 10) + (l_1s + l_0)(1)(s+1) \quad (3.91)$$

elde edilir. $\tau = 4$ ve aşısız bir sistem cevap için $\alpha_1 = 2.5$ seçildiği durumda, kapalı çevrim sistemin birim basamak cevabı Şekil 3.19’da verilmiştir.

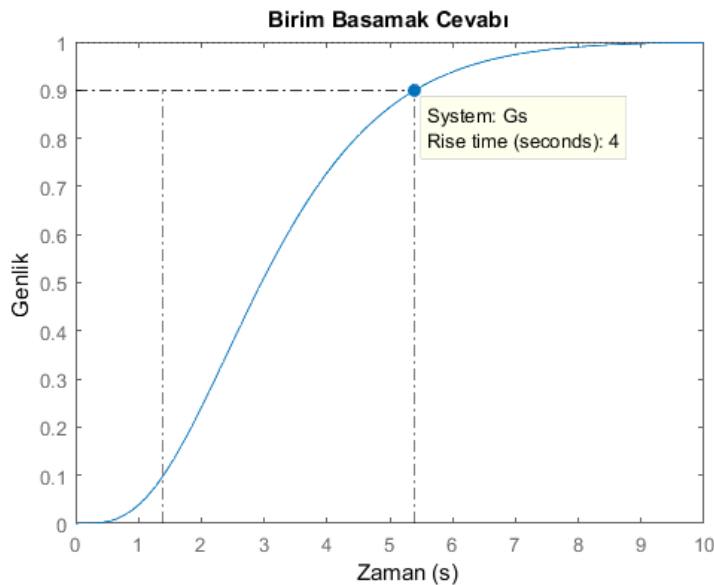


Şekil 3.19 : $\tau = 4$ ve $\alpha_1 = 2.5$ durumunda kapalı çevrim birim basamak cevabı.

Şekil 3.19’den görüldüğü üzere sistem cevabı aşım yapmamakta ve sistemin yükselme zamanı 3.72 saniyedir. Sistemin yükselme zamanını 4 saniye yapmak için;

$$\tau = \frac{4}{3.72}4 = 4.30 \quad (3.92)$$

seçilir. $\tau = 4.30$ ve $\alpha_1 = 2.5$ durumunda kapalı çevrim birim basamak cevabı Şekil 3.20’da verilmiştir.



Şekil 3.20 : $\tau = 4.30$ ve $\alpha_1 = 2.5$ durumunda kapalı çevrim birim basamak cevabı.

Şekil 3.20’den görüldüğü üzere kapalı çevrim sistem birim basamak cevabı aşısız ve yükselme zamanı ise 4 saniye olmuştur. Bu sistem için tasarlanan kontrolör sonucunda oluşan kapalı çevrim transfer fonksiyonu;

$$G_{cl}(s) = \frac{s+1}{0.4032s^5 + 2.445s^4 + 5.929s^3 + 7.111s^2 + 4.216s + 1} \quad (3.93)$$

olarak bulunur. Kapalı çevrim transfer karakteristik polinomu ise;

$$p(s) = 0.4032s^5 + 2.445s^4 + 5.929s^3 + 7.111s^2 + 4.216s + 1 \quad (3.94)$$

şeklindedir. Bu kapalı çevrimi sağlayacak $m(s)$ ve $l(s)$ polinomları ise;

$$m(s) = 0.04157s^2 + 0.3139s + 0.8477 \quad (3.95)$$

$$l(s) = 0.815s^2 + 1.515s + 0.1523 \quad (3.96)$$

olarak bulunur. Kapalı çevrim birim basamak değerinin son değeri 1’e yerleştiği için;

$$f(s) = 1 \quad (3.97)$$

şeklinde bulunur.

3.3.3 Sağ-yarı düzlemde sıfırı olan sistemler için karakteristik oran atama yöntemiyle kontrolör tasarımı

Sağ-yarı düzlemde sıfırı olan sistemler için, sağ-yarı düzlemdeki sıfır kararsız bölgede olduğu için sol-yarı düzlemde sıfırı olan sistem gibi kutup-sıfır götürmesi yapılmaz. $G(s)$ denklem (3.98)’daki gibi bir sağ-yarı düzlemde sıfırı olan bir sistem olsun.

$$G(s) = \frac{-c_1s + c_0}{a_ns^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_1s + a_0} \quad (3.98)$$

$G(s)$ sistemi n . mertebeden olduğu için Şekil 3.14’te verilen Rİİ kontrol yapısına göre $m(s)$ ve $l(s)$ polinomları diophantine denkleminde $n-1$. mertebeden olmalıdır. Kapalı çevrim transfer karakteristik polinomu $p(s)$ ise bu durumda $2n-1$. mertebeden olur. Sağ-yarı düzlemde sıfırı olan sistemlerin birim basamak cevabında ters aşım gözlenir. Ters aşım istenilen bir durum olmadığı için tasarlanan kontrolörle birlikte kapalı çevrim birim basamak cevabında ters aşımın azaltılması hedeflenir. KOA yönteminde α_1 ve τ değerleri daha yüksek değerler seçilerek ters aşım azaltılabilir. α_1 ’in ters aşıma etkisi çok büyük olmasa da τ değeri daha büyük seçilerek ters

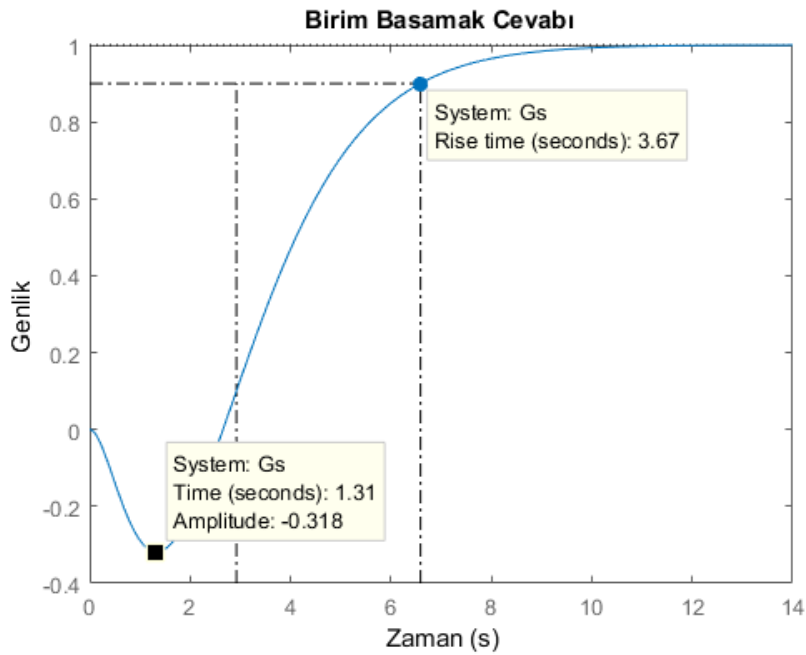
aşım azaltılabilir. Örnek 3.7’de sağ-yarı düzlemde sıfırı olan sistemler için kontrolör tasarımı gösterilecektir.

Örnek 3.7:

$G(s)$ transfer fonksiyonu 3. mertebeden sağ-yarı düzlemde sıfırı olan bir sistem olsun.

$$G(s) = \frac{-2s + 1}{s^3 + 3s^2 + 3s + 1} \quad (3.99)$$

$G(s)$ transfer fonksiyonun açık çevrim birim basamak cevabı Şekil 3.21’de verilmiştir.

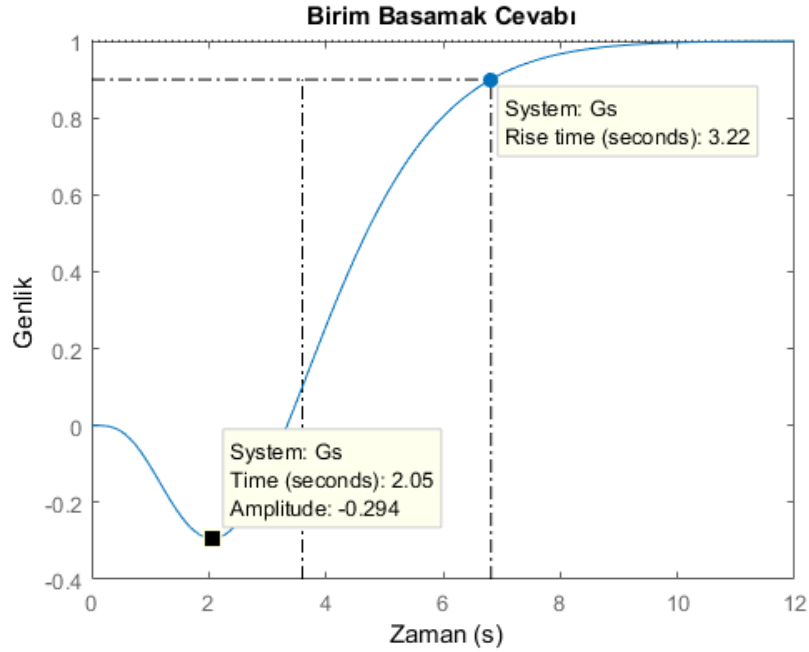


Şekil 3.21’deki açık çevrim birim basamak cevabına bakıldığında zaman, sistem %31.8’lik ters aşım ve 3.67 saniyelik bir yükselme zamanına sahiptir. Tasarlanacak kontrolör ile kapalı çevrim transfer fonksiyonun birim basamak cevabı için sistemin hızını arttıracak (yükselme zamanını azaltılarak) bir kontrolör tasarımı yapılacaktır. Sistem 3. mertebeden bir sistem olduğu için tasarlanacak kontrolör 2. mertebeden olacaktır. Böylece kapalı çevrim karakteristik polinomun mertebesi 5 olacaktır. Farklı α_1 ve τ değerleri için yükselme zamanı ve ters aşım değerleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2 : Farklı α_1 ve τ değerleri için yükselme zamanı ve ters aşım değerleri

	Yükselme Zamanı	Ters Aşım
$\alpha_1 = 2$ & $\tau = 1$	0.2019	%185.89
$\alpha_1 = 2.25$ & $\tau = 1$	0.4371	%170.68
$\alpha_1 = 2$ & $\tau = 2$	0.7391	%65.88
$\alpha_1 = 2.5$ & $\tau = 1$	0.7706	%160.64
$\alpha_1 = 2.5$ & $\tau = 3.5$	3.2209	%29.38

Çizelge 3.2’den görüldüğü üzere α_1 parametresini artırmak ters aşımın çok az olsa da bir etkisi varken, τ parametresinin artırmak ters aşımın oldukça azaltmaktadır. $\tau=3.5$ ve $\alpha_1=2.5$ durumundaki kapalı çevrim birim basamak cevabı Şekil 3.22’de verilmiştir.



Şekil 3.22 : $G(s)$ sisteminin birim basamak cevabı.

Şekil 3.22’den görüldüğü üzere kapalı çevrim sistem birim basamak cevabı sistem %29.4’lük ters aşım ve 3.22 saniyelik bir yükselme zamanına sahiptir. Bu sistem için tasarlanan kontrolör sonucunda oluşan kapalı çevrim transfer fonksiyonu;

$$G_{cl}(s) = \frac{-2s + 1}{0.1589s^5 + 1.161s^4 + 3.392s^3 + 4.9s^2 + 3.5s + 1} \quad (3.100)$$

olarak bulunur. Kapalı çevrime ilişkin karakteristik polinomu ise ;

$$p(s) = 0.1589s^5 + 1.161s^4 + 3.392s^3 + 4.9s^2 + 3.5s + 1 \quad (3.101)$$

şeklindedir. Bu kapalı çevrimi sağlayacak $m(s)$ ve $l(s)$ polinomları ise;

$$m(s) = 0.1589s^2 + 0.6841s + 0.8628 \quad (3.102)$$

$$l(s) = 0.1004s^2 + 0.2275s + 0.1372 \quad (3.103)$$

olarak bulunur. Kapalı çevrim birim basamak değerinin son değeri 1'e yerleştiği için;

$$f(s) = 1 \quad (3.104)$$

şeklinde bulunur.

3.4 Karakteristik Oran Atama Yöntemiyle Kaskad Kontrolör Tasarımı

Kaskad kontrolde temel kural iç çevrimin dış çevrimden daha hızlı olmasıdır [4]. Bunun sebebi, eğer dış çevrim iç çevrimden daha hızlı olursa, iç çevrim için tasarlanan kontrolör sistemin gereksinimlerini sağlamayacak ve istenilen kontrol başarımı elde edilemeyecektir. Bu temel kurala göre tasarlanacak kontrolördeki tasarım kriterleri;

- iç çevrimin yükselme zamanı düşürerek daha hızlı birim basamak cevabı,
- dış çevrimde ise aşırımsız bir sistem cevabı

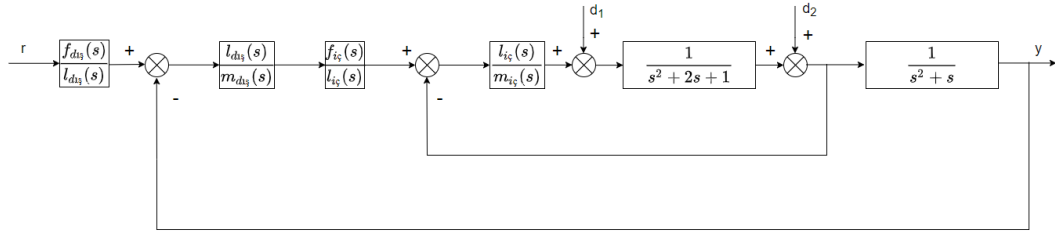
elde etmektir.

KOA yöntemi ile kaskad kontrolör tasarım yöntemini açıklayabilmek için iç ve dış çevrimdeki sistemlerin transfer fonksiyonları sırasıyla;

$$G_{iç}(s) = \frac{1}{(s+1)^2} = \frac{1}{s^2 + 2s + 1} \quad (3.105)$$

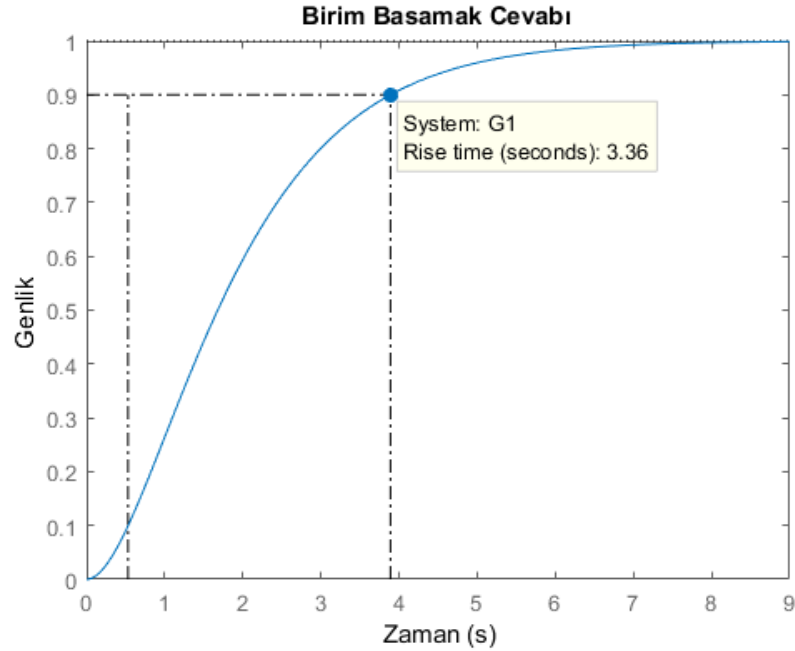
$$G_{dış}(s) = \frac{1}{(s+1)s} = \frac{1}{s^2 + s} \quad (3.106)$$

oluşan kaskad sistem ele alınmıştır. Kaskad sisteme d_1 ve d_2 bozucuları verilerek, bozucuları ne kadar sürede bastırdıklarına ve ITSE (Integral Time Square Error) kriterine göre referans takip başarımlarındaki hata değerlerine bakılacaktır. Kaskad sistem için kaskad indirgenmiş Rİİ kontrolör yapısına ait blok diyagramı Şekil 3.23'de verilmiştir.



Şekil 3.23 : Kaskad sistem için kaskad indirgenmiş Rİİ kontrolör yapısına ait blok diyagramı.

$G_{i\check{c}}(s)$ transfer fonksiyonunun açık çevrim birim basamak cevabı Şekil 3.24’de verilmiştir.



Şekil 3.24 : $G_{i\check{c}}(s)$ sisteminin birim basamak.

Şekil 3.24’den görüldüğü üzere sistem cevabı aşım yapmamakta ve sistemin yükselme zamanı 3.36 saniyedir. Tasarlanacak kontrolörle birlikte kapalı çevrim sistem cevabında yükselme zamanını kısaltarak sistem cevabı hızlandırılacak ve aşısız bir sistem cevabı elde edilecek kontrolör tasarımı yapılacaktır. Sistem 2. mertebeden bir sistem olduğu için tasarlanacak kontrolör 1. mertebeden olacaktır. Böylece kapalı çevrim karakteristik polinomun mertebesi 3 olacaktır. Bu duruma göre kapalı çevrim karakteristik polinomu,

$$m_{i\check{c}}(s) = (m_1s + m_0) \quad (3.107)$$

$$d_{i\check{c}}(s) = (s^2 + 2s + 1) \quad (3.108)$$

$$l_{i\zeta}(s) = (l_1 s + l_0) \quad (3.109)$$

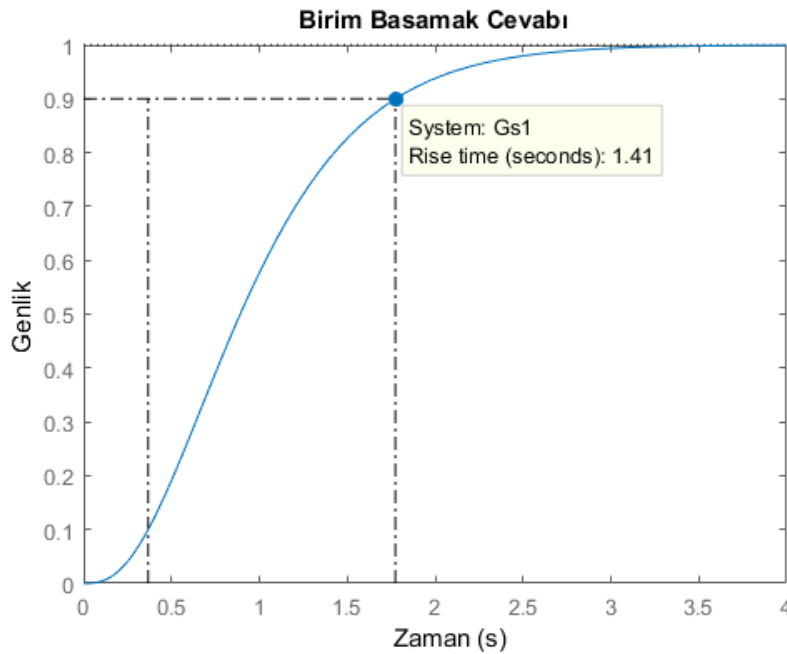
$$n_{i\zeta}(s) = (1) \quad (3.110)$$

olmak üzere

$$p_{i\zeta}(s) = m_{i\zeta}(s) d_{i\zeta}(s) + l_{i\zeta}(s) n_{i\zeta}(s) \quad (3.111)$$

şeklinde ifade edilebilir.

$\tau=1$ ve aşısız bir sistem cevap için $\alpha_1 = 3$ seçildiği durumda, kapalı çevrim sistemin birim basamak cevabı Şekil 3.25’de verilmiştir.



Şekil 3.25 : $\tau = 1$ ve $\alpha_1 = 3$ durumunda kapalı çevrim birim basamak cevabı.

Şekil 3.25’den görüldüğü üzere kapalı çevrim sistem birim basamak cevabı aşısız ve yükselme zamanı ise 1.41 saniye olmuştur. İç çevrim için tasarlanan kontrolör sonucunda oluşan kapalı çevrim transfer fonksiyonu;

$$G_{cl-i\zeta}(s) = \frac{1}{0.03704 s^3 + 0.3333 s^2 + s + 1} \quad (3.112)$$

olarak bulunur. Kapalı çevrim transfer karakteristik polinomu ise;

$$p_{i\zeta}(s) = 0.03704 s^3 + 0.3333 s^2 + s + 1 \quad (3.113)$$

şeklindedir. Bu kapalı çevrimi sağlayacak $m_{i\zeta}(s)$ ve $l_{i\zeta}(s)$ polinomları ise;

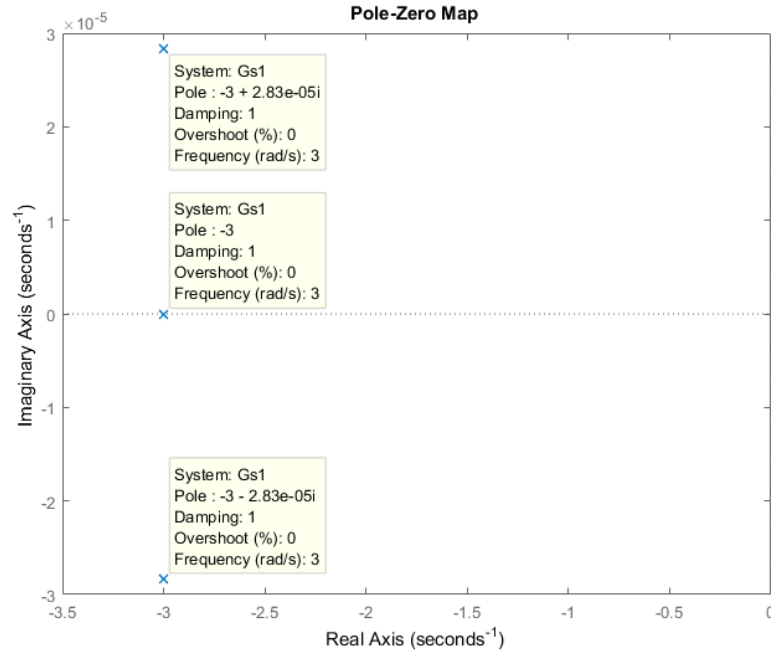
$$m_{i\zeta}(s) = 0.03704 s + 0.25926 \quad (3.114)$$

$$l_{iç}(s) = 0.4444 s + 0.74074 \quad (3.115)$$

olarak bulunur. Kapalı çevrim birim basamak değerin son değeri 1'e yerleştiği için

$$f_{iç}(s) = 1 \quad (3.116)$$

şeklinde bulunur. İç çevrime ait kapalı çevrim transfer fonksiyonunun kutup-sıfır dağılımı Şekil 3.26'da verilmiştir.

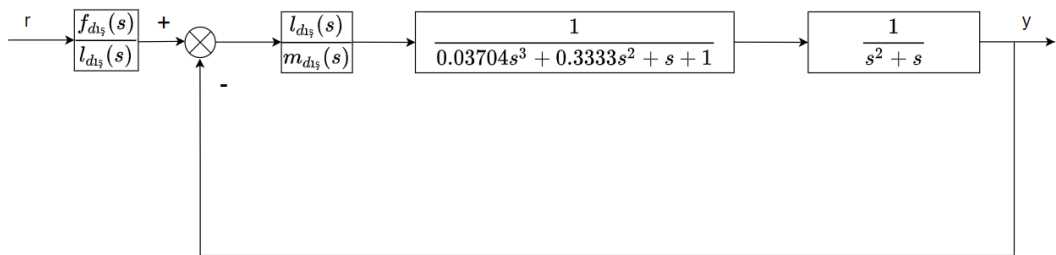


Şekil 3.26 : $G_{cl-iç}(s)$ sisteminin kutup-sıfır dağılımı.

$G_{cl-iç}(s)$ sisteminin kutupları;

$$s_{1,2,3} = -3 \quad (3.117)$$

şeklinde. İç çevrim için kontrolör tasarımı yapıldıktan sonra Şekil 3.23'deki kaskad sistem Şekil 3.27'deki gibi indirgenebilir.

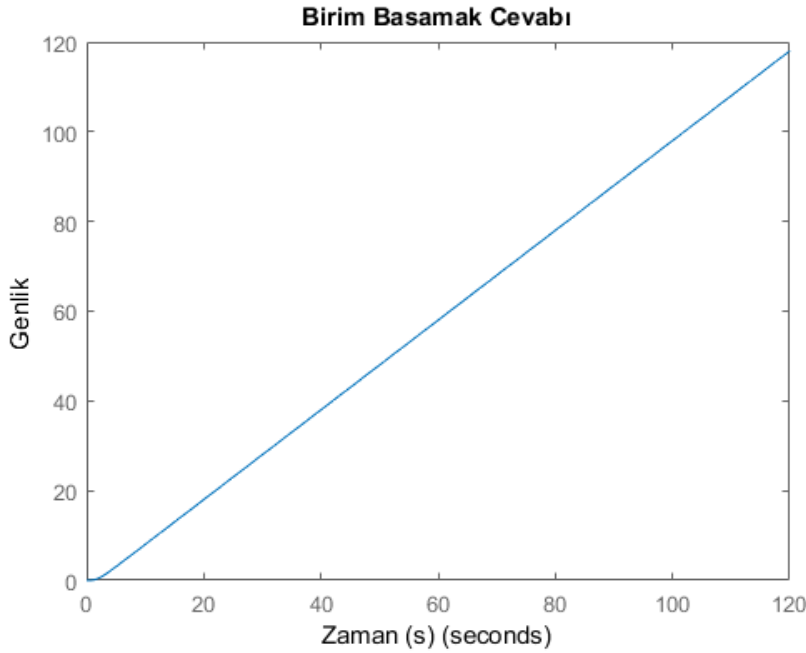


Şekil 3.27 : İndirgenmiş kaskad blok diyagramı.

Şekil 3.27'deki indirgenmiş blok diyagramındaki ileri yoldaki transfer fonksiyonu;

$$G_{ileri}(s) = \frac{1}{0.03704 s^5 + 0.3703 s^4 + 1.333s^3 + 2 s^2 + s} \quad (3.118)$$

şeklindedir. $G_{ileri}(s)$ transfer fonksiyonunun birim basamak cevabı Şekil 3.28'de verilmiştir.



Şekil 3.28 : $G_{ileri}(s)$ sisteminin birim basamak.

Şekil 3.28'den görüldüğü üzere sistem cevabı integratör etkisinden dolayı sonsuza gitmektedir. Tasarlanacak kontrolörle birlikte kapalı çevrim sistem cevabında aşısız bir sistem cevabı elde edilecek kontrolör tasarımı yapılacaktır. İleri yoldaki sistem 5. mertebeden bir sistem olduğu için tasarlanacak kontrolör 4. mertebeden olacaktır. Böylece dış çevrim ait kapalı çevrim karakteristik polinomun mertebesi 9 olacaktır. Bu duruma göre kapalı çevrim karakteristik polinomu,

$$m_{dış}(s) = (m_4s^4 + m_3s^3 + m_2s^2 + m_1s + m_0) \quad (3.119)$$

$$d_{dış}(s) = (0.03704 s^5 + 0.3703 s^4 + 1.333s^3 + 2 s^2 + s) \quad (3.120)$$

$$l_{dış}(s) = (l_4s^4 + l_3s^3 + l_2s^2 + l_1s + l_0) \quad (3.121)$$

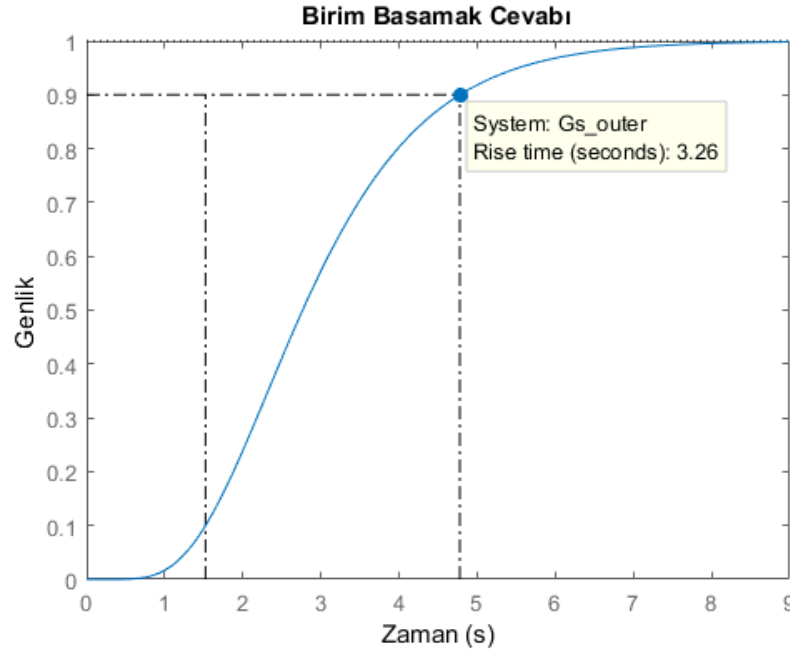
$$n_{dış}(s) = (1) \quad (3.122)$$

olmak üzere

$$p_{dış}(s) = m_{dış}(s) d_{dış}(s) + l_{dış}(s) n_{dış}(s) \quad (3.123)$$

şeklinde ifade edilebilir.

$\tau=3$ ve aşırıdır bir sistem cevap için $\alpha_1 = 2.5$ seçildiği durumda, kapalı çevrim sistemin birim basamak cevabı Şekil 3.29’da verilmiştir.



Şekil 3.29 : $\tau = 3$ ve $\alpha_1 = 2.5$ durumunda kapalı çevrim birim basamak cevabı.

Şekil 3.29’dan görüldüğü üzere kapalı çevrim sistem birim basamak cevabı aşırıdır ve yükselme zamanı ise 3.26 saniye olmuştur. Dış çevrim için tasarlanan kontrolör sonucunda oluşan kapalı çevrim transfer fonksiyonu;

$$G_{cl-dış}(s) = \frac{1}{9.17 \cdot 10^{-7}s^9 + 6.042 \cdot 10^{-5}s^8 + 0.001592s^7 + 0.02192s^6 + 0.173s^5 + 0.8106s^4 + 2.256s^3 + 3.6s^2 + 3s + 1} \quad (3.124)$$

olarak bulunur. Kapalı çevrim transfer karakteristik polinomu ise;

$$p_{dış}(s) = 9.17 \cdot 10^{-7}s^9 + 6.042 \cdot 10^{-5}s^8 + 0.001592s^7 + 0.02192s^6 + 0.173s^5 + 0.8106s^4 + 2.256s^3 + 3.6s^2 + 3s + 1 \quad (3.125)$$

şeklindedir. Bu kapalı çevrimi sağlayacak $m_{dış}(s)$ ve $l_{dış}(s)$ polinomları ise;

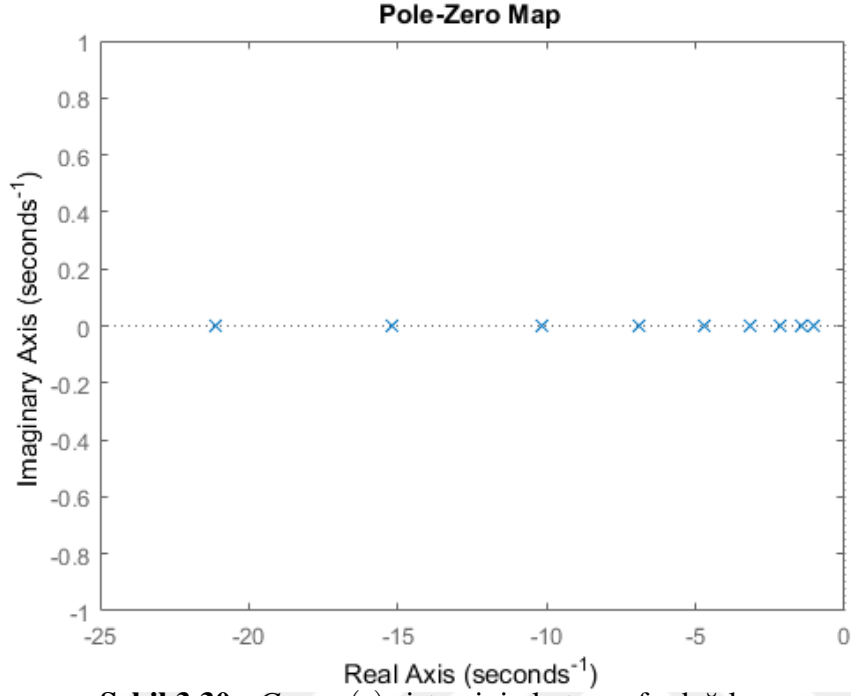
$$m_{dış} = 2.476 \cdot 10^{-5}s^4 + 0.001384s^3 + 0.02827s^2 + 0.2579s + 0.9985 \quad (3.126)$$

$$l_{dış}(s) = 0.03913s^4 + 0.3806s^3 + 1.345s^2 + 2.001s + 1 \quad (3.127)$$

olarak bulunur. Kapalı çevrim birim basamak değerinin son değeri 1’e yerleştiği için

$$f_{dış}(s) = 1 \quad (3.128)$$

şeklinde bulunur. Dış çevrime ait kapalı çevrim transfer fonksiyonunun kutup-sıfır dağılımı Şekil 3.30’da verilmiştir.



Şekil 3.30 : $G_{cl-dış}(s)$ sisteminin kutup-sıfır dağılımı.

$G_{cl-dış}(s)$ sisteminin kutupları;

$$s_1 = -1.0386 \quad (3.129)$$

$$s_2 = -1.4445 \quad (3.130)$$

$$s_3 = -2.1676 \quad (3.131)$$

$$s_4 = -3.1946 \quad (3.132)$$

$$s_5 = -4.6865 \quad (3.133)$$

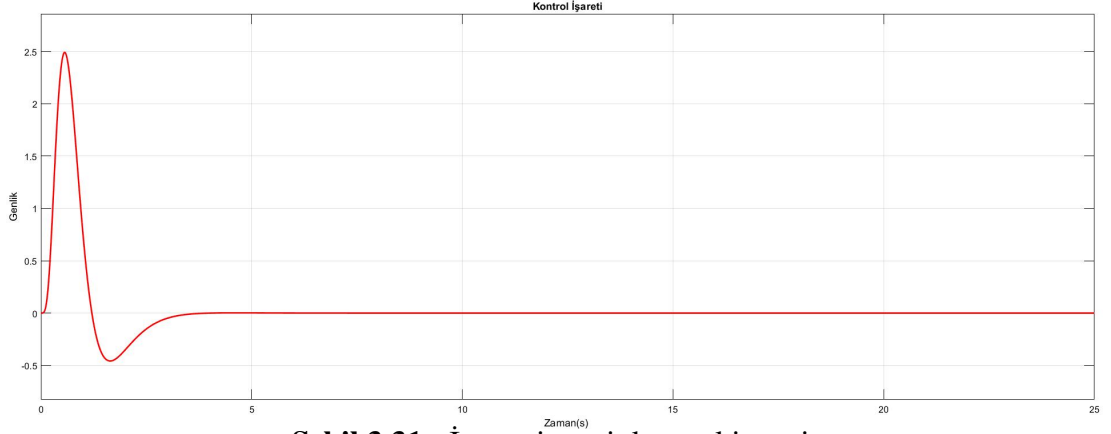
$$s_6 = -6.8751 \quad (3.134)$$

$$s_7 = -10.1323 \quad (3.135)$$

$$s_8 = -15.2044 \quad (3.136)$$

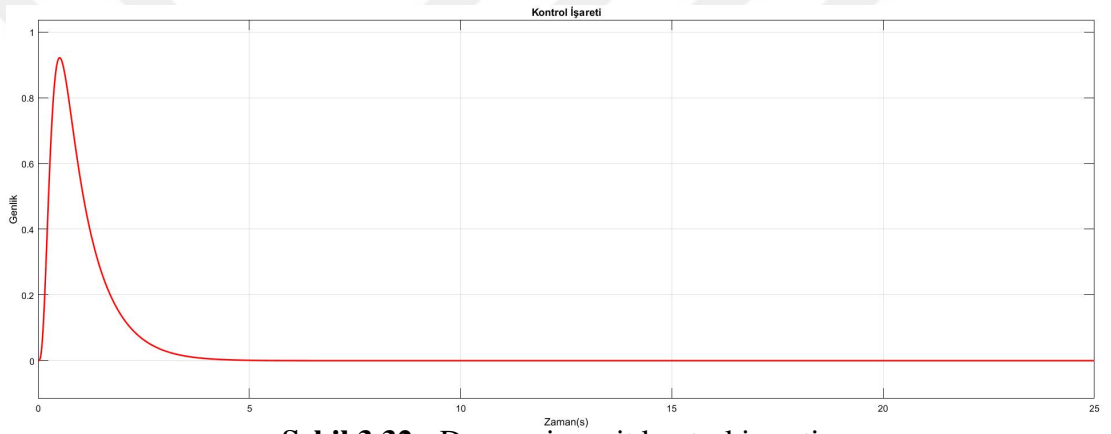
$$s_9 = -21.1461 \quad (3.137)$$

şeklindedir. İç çevrime ait kontrol işareti Şekil 3.31’de verilmiştir.



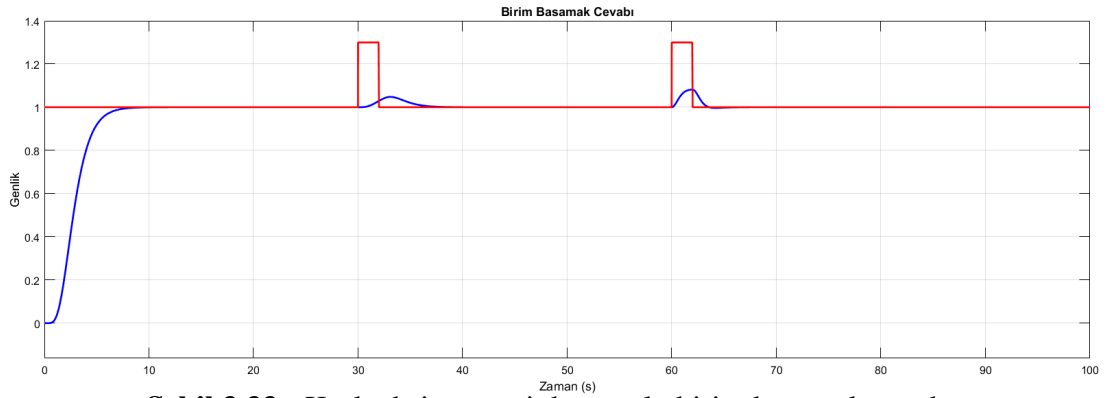
Şekil 3.31 : İç çevrime ait kontrol işareti.

Dış çevrime ait kontrol işareti Şekil 3.32’de verilmiştir.



Şekil 3.32 : Dış çevrime ait kontrol işareti.

Şekil 3.23’de gösterilen d_1 ve d_2 bozucuları sırasıyla 30. ve 60. saniyede verilmiştir. Bozucuların genlikleri 0.3 olup 2 saniye boyunca sisteme verilmişlerdir. Kaskad sistemin d_1 ve d_2 bozucuları etkisinde birim basamak cevabı Şekil 3.33’de verilmiştir.



Şekil 3.33 : Kaskad sisteme ait bozuculu birim basamak cevabı.

Şekil 3.33’den görüldüğü üzere sistem d_1 ve d_2 bozucularını bastırmıştır. Sistem d_1 bozucusunu 4.98 saniyede bastırırken, d_2 bozucusunu 3.43 saniyede bastırmıştır. d_1 ve

d_2 bozucusuna ait ITSE hata değerleri sırasıyla;

$$ITSE_{d_1} = 0.1697$$

$$ITSE_{d_2} = 0.6341$$

şeklindedir.

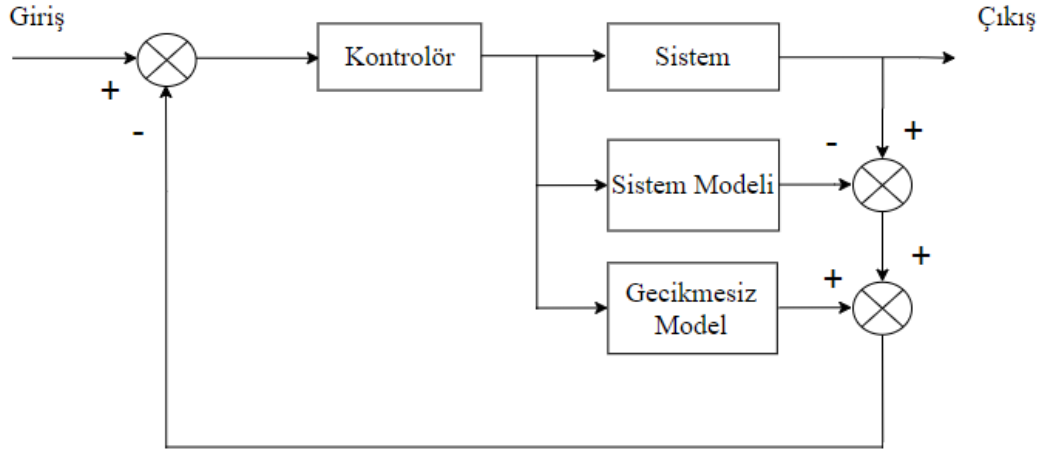


4. MODEL AYRIŞTIRMA TEMELLİ KASKAD KONTROLÖR TASARIMI

Tezde önerilen yüksek mertebeden sistemler için kaskad kontrol yöntemi, yüksek mertebeden sistemler için uygun olan Model Ayırıştırma Temelli (MAT) kaskad kontrol tasarım yöntemi [4] ile karşılaştırılacaktır.

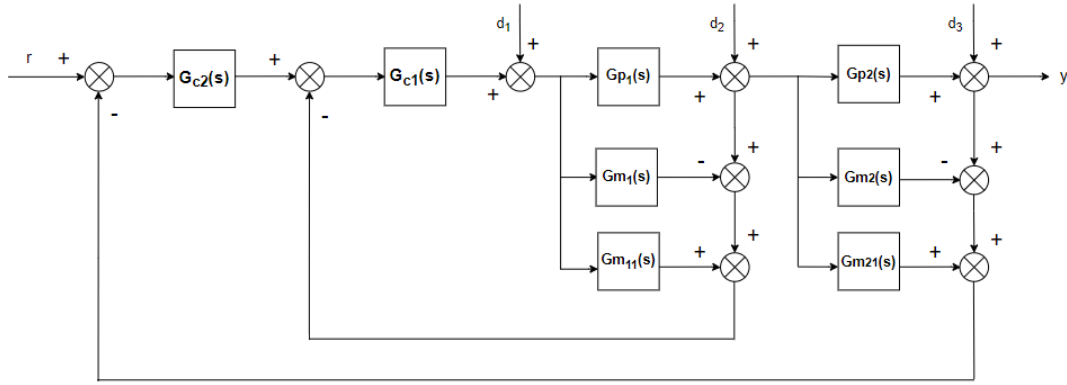
4.1 İç ve Dış Kontrol Yapıları

MAT kaskad kontrol yapısında ölü zamana sahip sistem modellerinden yararlanılmaktadır. Ölü zaman etkisinin giderilmesi için Smith Öngörücüsünden yararlanılabilir [36]. Smith Öngörücüsü'ne ait blok diyagramı Şekil 4.1'de verilmiştir [37].



Şekil 4.1 : Smith Öngörücüsü.

Bu önerilen yöntemde iç çevrimde bulunan sistem, birinci mertebeden ölü zamanlı sistem olarak düşünülmüştür. Dış çevrim ise integratörü olan ya da integratörü olmayan n. mertebeden ölü zamanlı sistem olabilir. İç ve dış çevrimde ölü zamanın etkisini gidermek için Smith Öngörücüsü yapısı kullanılmıştır. Şekil 4.2'de önerilen kaskad kontrol yapısı verilmiştir.



Şekil 4.2 : Önerilen kaskad kontrol yapısı.

İç ve dış çevrimde kontrol edilecek sistemler sırasıyla $G_{p1}(s)$ ve $G_{p2}(s)$ olarak adlandırılmıştır. İç ve dış çevrimdeki sistemler için tasarlanacak kontrolörler sırasıyla $G_{c1}(s)$ ve $G_{c2}(s)$ olarak belirlenmiştir. $G_{m1}(s)$ ve $G_{m2}(s)$ sırasıyla iç ve dış çevrimdeki süreçleri temsil ederken, $G_{m11}(s)$ ve $G_{m21}(s)$ ise iç ve dış çevrimdeki süreçlerin ölü zamansız transfer fonksiyonlarını temsil etmektedir. İç ve dış çevrimdeki sistemlere ait transfer fonksiyonları;

$$G_{p1}(s) = \frac{K_1}{T_1s + 1} e^{-L_1s} \quad (4.1)$$

$$G_{p2}(s) = \frac{K_2}{s^n(T_2s + 1)^m} e^{-L_2s} \quad (4.2)$$

şeklinde ifade edilmiştir. İç çevrimde yer alan $G_{m1}(s)$ ve $G_{m11}(s)$ transfer fonksiyonları;

$$G_{m1}(s) = \frac{K_{1m}}{T_{1m}s + 1} e^{-L_{1m}s} \quad (4.3)$$

$$G_{m11}(s) = \frac{K_{1m}}{T_{1m}s + 1} \quad (4.4)$$

ve dış çevrimde yer alan $G_{m2}(s)$ ve $G_{m21}(s)$ transfer fonksiyonları ise;

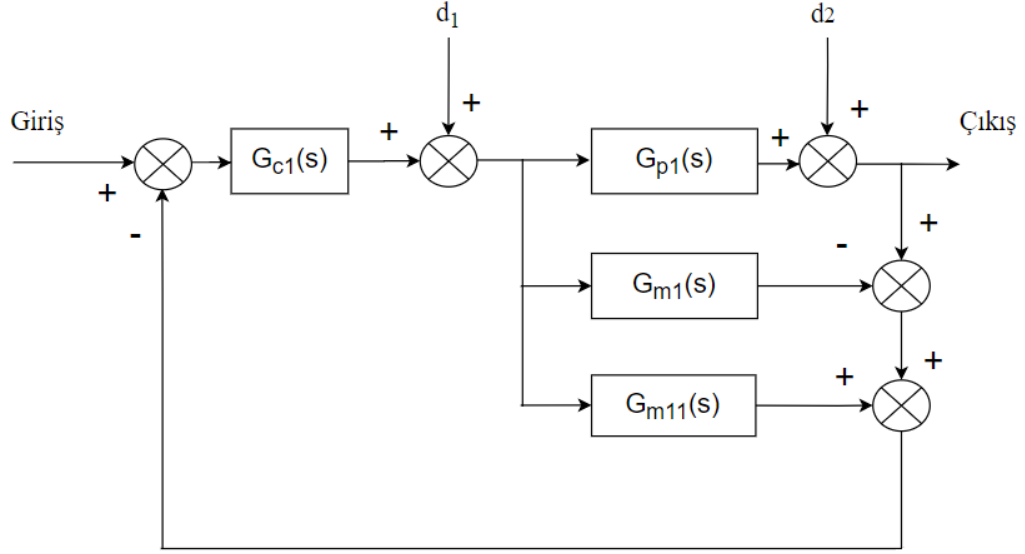
$$G_{m2}(s) = \frac{K_{2m}}{s^n(T_2s + 1)^m} e^{-L_{2m}s} \quad (4.5)$$

$$G_{m21}(s) = \frac{K_{2m}}{s^n(T_2s + 1)^m} \quad (4.6)$$

olarak ifade edilmiştir.

4.1.1 İç çevrim kontrol yapısı

Önerilen kaskad kontrol yapısının iç çevriminde birinci mertebeden ölü zamanlı (BMÖZ) sistem bulunmaktadır. İç çevrim için kontrol blok diyagramı Şekil 4.3’de verilmiştir.



Şekil 4.3 : İç çevrim için kontrol blok diyagramı.

İç çevrim için tasarlanacak $G_{c1}(s)$ kontrolörü ölü zaman içermeyen $G_{m11}(s)$ modeli üzerinden tasarlanacaktır. Tasarlanan kontrolör kutup-sıfır götürmesini yöntemine dayalı olarak yapılmaktadır. İç çevrim kontrolörü PI tipindedir ve

$$G_{c1}(s) = K_{c1} \frac{T_{1m}s + 1}{s} \quad (4.7)$$

şeklinde ifade edilebilir. $G_{c1}(s)$ kontrolörüyle birlikte iç çevrim için kapalı çevrim transfer fonksiyonu;

$$T_{iç}(s) = \frac{G_{c1}(s)G_{m11}(s)}{1 + C_1(s)G_{m11}(s)} \quad (4.8)$$

$$T_{iç}(s) = \frac{K_{c1} \frac{T_{1m}s+1}{s} \frac{K_{1m}}{T_{1m}s+1}}{1 + K_{c1} \frac{T_{1m}s+1}{s} \frac{K_{1m}}{T_{1m}s+1}} = \frac{\frac{K_{c1}K_{1m}}{s}}{1 + \frac{K_{c1}K_{1m}}{s}} = \frac{1}{\frac{1}{K_{c1}K_{1m}}s + 1} \quad (4.9)$$

olarak hesaplanır. Eğer K_{c1} kontrolör kazancı;

$$K_{c1} = \frac{1}{\gamma_1 L_{1m} K_{1m}} \quad (4.10)$$

seçilirse $T_{iç}(s)$ transfer fonksiyonu;

$$T_{iç}(s) = \frac{1}{1 + \gamma_1 L_{1m} K_{1m}} \quad (4.11)$$

halini alır. Denklem (4.11)'de γ_1 iç çevrim kontrolörü $G_{c1}(s)$ için tasarım parametresidir. Denklem (4.11) zaman gecikmesiz sistem modelinden değerlendirildiğinden ve sisteme ait zaman gecikmesinin kapalı çevrim transfer fonksiyonu üzerinde bir etkisi olması gerektiğinden, $T_{iç}(s)$ 'in zaman sabiti için γ_2 tasarım parametresi eklenir.

$$T_{iç-yeni}(s) = \frac{1}{1 + (\gamma_1 + \gamma_2) L_{1m} K_{1m}} \quad (4.12)$$

Denklem (4.12)'den görüldüğü üzere γ_1 ve γ_2 tasarım parametreleri sistem cevabına doğrudan etkisi vardır. γ_1 parametresi yerleşme zamanı ve bozucu bastırma başarımı üzerinde doğrudan etkisi varken, γ_2 parametresinin sistemin kararlılığı üzerinde güçlü bir etkisi bulunmaktadır. γ_1 parametresinin seçimi iç çevrimin zaman sabiti ile sistemin zaman gecikmesi arasındaki orana göre yapılır. γ_1 parametresinin seçimi şu şekilde özetlenebilir:

- Eğer $\frac{T_{1m}}{L_{1m}}$ oranı 1'den büyükse, γ_1 parametresi 0.1 ile 0.5 arasında seçilmelidir.
- Eğer $\frac{T_{1m}}{L_{1m}}$ oranı 1'den küçükse, γ_1 parametresi 0.5 ile 1 arasında seçilmelidir.

γ_1 parametresi daha büyük bir değer seçildiğinde sistemin referans takip başarımı azalır ve parametre değişikliklerine karşı duyarlılığı artar. Bu yüzden, referans takip başarımını arttırmak için γ_1 parametresi olabildiğince küçük seçilmelidir. γ_1 parametresini seçtikten sonraki adım olan γ_2 parametresinin seçimi ise denklem (4.13)'deki eşitsizliğe göre yapılır.

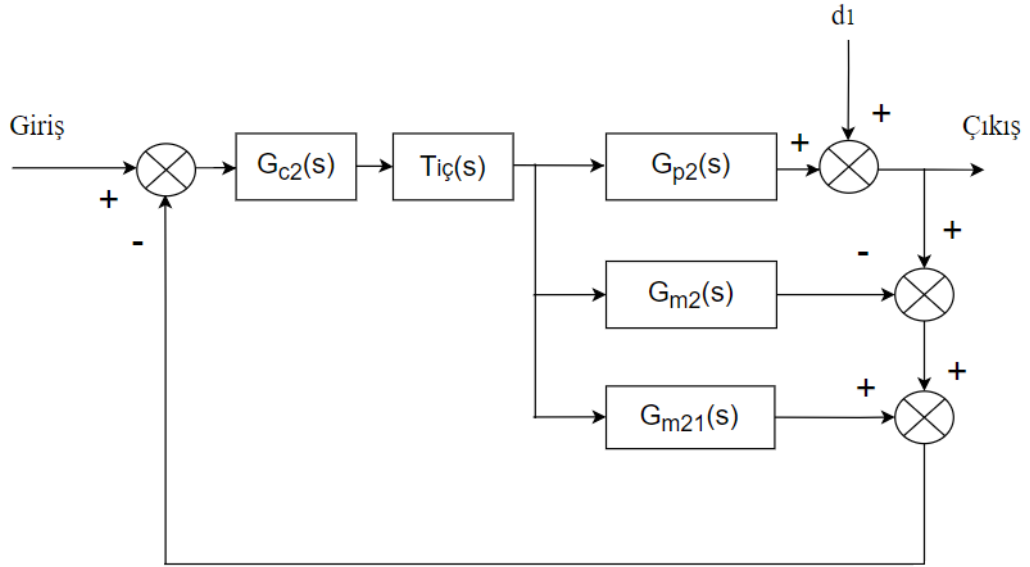
$$\frac{2L_{1m}(\gamma_1 + \gamma_2)}{L_{1m}} = 2(\gamma_1 + \gamma_2) > 1 \quad (4.13)$$

$2(\gamma_1 + \gamma_2)$ değeri ne kadar 1'e yakın olursa sistem cevabında daha fazla salınım gözlenir ve sistemin parametre değişikliklerine karşı duyarlılığı artar.

4.1.2 Dış çevrim kontrol yapısı

4.1.2.1 Dış çevrimdeki sistemin birinci mertebeden integratör etkili ölü zamanlı sistem olması durumu

İç çevrimdeki sistem için tasarlanan $G_{c1}(s)$ kontrolörü sonrasında el edilen $T_{iç-yeni}(s)$ kapalı çevrim transfer fonksiyonundan sonra önerilen kaskad kontrol yapısı Şekil 4.4'deki gibi indirgenebilir.



Şekil 4.4 : Dış çevrim için indirgenmiş blok diyagramı.

$G_{p2}(s)$ sistemi birinci mertebeden integratör etkili ölü zamanlı sistem olduğu için denklem (4.14)'deki gibi ifade edilebilir.

$$G_{p2}(s) = \frac{K_{2m}}{s} e^{-L_{2m}s} \quad (4.14)$$

Dış çevrim için tasarlanacak $G_{c2}(s)$ kontrolörü ölü zaman içermeyen $G_{m21}(s)$ modeli üzerinden tasarlanacaktır. Kontrolör kutup-sıfır götürmesini yapılarak tasarlanmaktadır. Dış çevrim birinci mertebeden integratör etkili ölü zamanlı sistem olduğu için tasarlanacak kontrolör P tipi kontrolör olacaktır. $G_{c2}(s)$ P tipi kontrolörü;

$$G_{c2}(s) = \frac{K_{c2} K_{2m}}{s G_{m21}(s)} = K_{c2} \quad (4.15)$$

şeklinde ifade edilebilir. Tasarlanacak olan $G_{c2}(s)$ kontrolörüyle birlikte dış çevrim için kapalı çevrim transfer fonksiyonu;

$$T_{dış}(s) = \frac{1}{\frac{(\gamma_1 + \gamma_2)L_{1m}}{K_{c2} K_{2m}} s^2 + \frac{1}{K_{c2} K_{2m}} s + 1} \quad (4.16)$$

şeklini alır. Denklem (4.16)'dan görüldüğü üzere zaman gecikmesiz dış çevrim için kapalı çevrim transfer fonksiyonu 2. mertebeden sistem halini almıştır. 2. mertebeden sistemler için genel standart formu;

$$T_{genel}(s) = \frac{1}{T^2 s^2 + 2T\zeta s + 1} \quad (4.17)$$

olarak ifade edilebilir. Denklem (4.17)'e bakıldığında zaman ζ sönüm oranını, T ise doğal frekansın ($T = \frac{1}{\omega_n}$) tersini temsil etmektedir. Denklem (4.16) ve denklem (4.17)

birbirlerine eşitlendiklerinde K_{c2} ;

$$K_{c2} = \frac{1}{4\zeta^2(\gamma_1 + \gamma_2)L_{m1}K_{2m}} \quad (4.18)$$

şeklinde elde edilir. Denklem (4.18)'den görüldüğü üzere sönüm oranı γ_1 ve γ_2 tasarım parametrelerinden sonra üçüncü tasarım parametresi olmuştur. Eğer kapalı çevrim sistem cevabında aşısız bir cevap isteniyorsa ζ değeri 1 seçilmelidir.

4.1.2.2 Dış çevrimdeki sistemin birinci mertebeden ölü zamanlı sistem olması durumu

$G_{p2}(s)$ sistemi birinci mertebeden ölü zamanlı sistem olduğu için Denklem (4.19)'daki gibi ifade edilebilir.

$$G_{p2}(s) = \frac{K_{2m}}{T_{2m}s + 1} e^{-L_{2m}s} \quad (4.19)$$

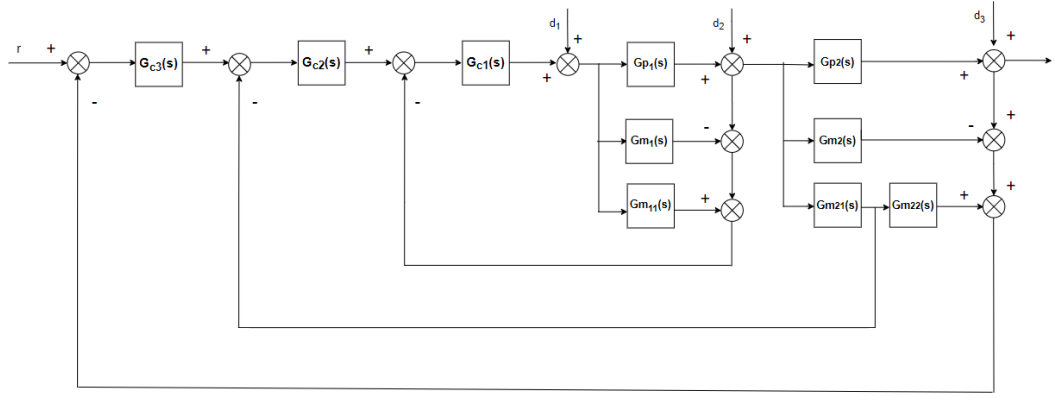
$G_{p2}(s)$ sistemi için tasarlanacak kontrolör ölü zaman içermeyen $G_{m21}(s)$ modeli üzerinden kutup-sıfır götürmesini yapılarak tasarlanacaktır. Dış çevrim için tasarlanacak kontrolör PI tipi kontrolör olacaktır. $G_{c2}(s)$ PI tipi kontrolörü;

$$G_{c2}(s) = K_{c3} \frac{T_{2m}s + 1}{s} \quad (4.20)$$

şeklinde ifade edilebilir. $G_{c2}(s)$ kontrolörüyle birlikte sisteme ait kapalı çevrim transfer fonksiyonuna bakıldığı zaman denklem (4.16)'daki ifade tekrardan elde edilir. Böylece K_{c3} kazancı K_{c2} kazancı ile aynı şekilde tasarlanabilir.

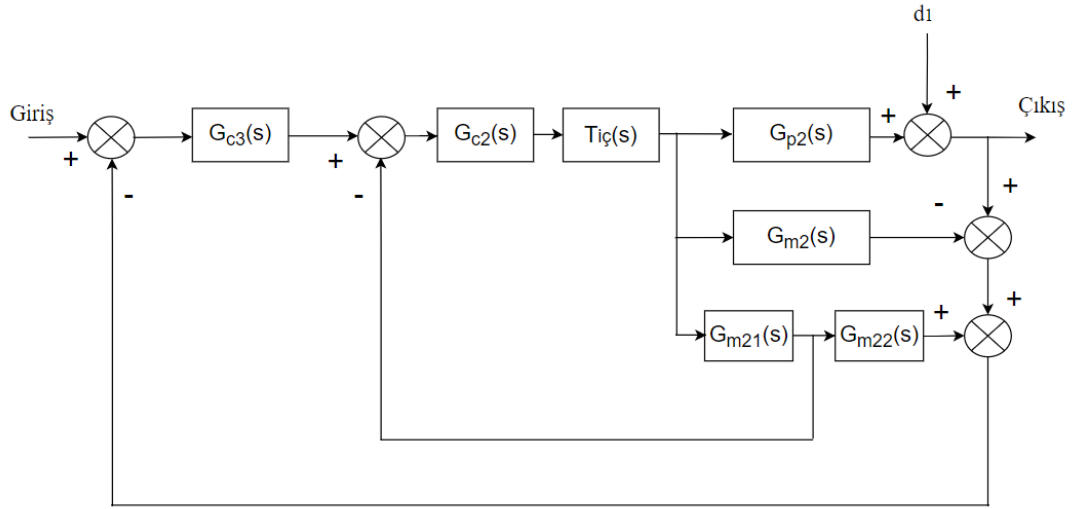
4.1.2.3 Dış çevrimdeki sistemin ikinci mertebeden ölü zamanlı sistem olması durumu

Dış çevrimdeki sistemin mertebesi birinci mertebeden ölü zamanlı olmadığı durumlarda dış çevrimin kontrolü için [4]'de yazarlar model ayırma yöntemini önermişlerdir. Model ayırmadaki amaç klasik Smith Öngörücüsü üzerinde yer alan zaman gecikmesiz ikinci mertebeden sistemi iki adet birinci mertebeden sisteme ayırarak her sistem dinamiğini ayrı çevrimlerde kontrol etmektir. Eğer sistemin mertebesi n . mertebeden ise bu durumda sistem n adet birinci mertebeden sisteme ayırarak sistem dinamikleri ayrı çevrimlerde kontrol edilir. İkinci mertebeden ölü zamanlı sistemler için önerilen kaskad kontrol yapısı Şekil 4.5'de verilmiştir.



Şekil 4.5 : İkinci mertebeden sistem ölü zamanlı sistemler için önerilen kaskad kontrol yapısı.

Önerilen yöntemde iç çevrim birinci mertebeden ölü zamanlı olması varsayımı her sistemde ortak olduğu için iç çevrim için kontrolör tasarımı başlık 4.1.1. belirtildiği gibi yapılır. İç çevrim için kontrolör tasarımı yapıldıktan sonra sistem Şekil 4.6'daki gibi indirgenebilir.



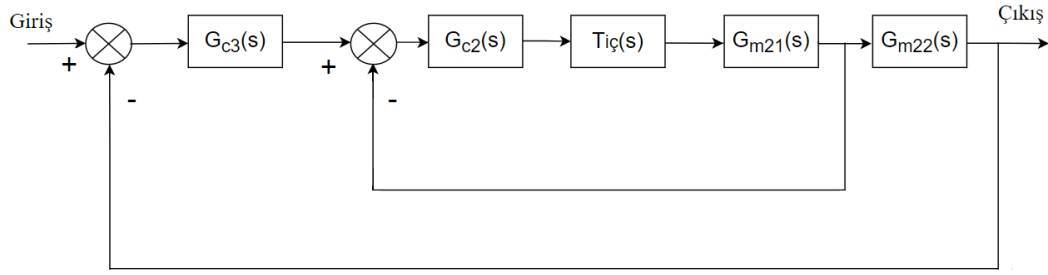
Şekil 4.6 : İç çevrim kontrol edildikten sonra indirgenmiş blok diyagramı.

Şekil 4.6'dan görüldüğü üzere $G_{c2}(s)$ kontrolörü $T_{iç}(s)$ ile $G_{m21}(s)$ zaman gecikmesiz birinci mertebeden sistemi, $G_{c3}(s)$ kontrolörü ise $G_{m22}(s)$ zaman gecikmesiz birinci mertebeden sistemini kontrol etmektedir. $G_{m21}(s)$ ve $G_{m22}(s)$ sistemleri;

$$G_{m21}(s) = \frac{K_{2m}^1}{(T_{1m}s + 1)} \quad (4.21)$$

$$G_{m22}(s) = \frac{K_{2m}^2}{(T_{2m}s + 1)} \quad (4.22)$$

şeklinde temsil edilebilir. Kontrolör ve sistemleri daha net görmek adına Şekil 4.6'daki blok diyagramı Şekil 4.7'deki blok diyagramına dönüştürülebilir.



Şekil 4.7 : İndirgenmiş kaskad blok diyagramı.

$T_{iç}(s)$ kapalı çevrim transfer fonksiyonu elde edildikten sonra, $G_{c2}(s)$ kontrolörü dış çevrimdeki sistemin birinci mertebeden ölü zamanlı sistem olması durumundaki tasarım yöntemiyle birebir aynı kontrolör tasarım yöntemi kullanılır. $G_{m21}(s)$ zaman gecikmesiz birinci mertebeden sistemi için kapalı çevrim transfer fonksiyonu;

$$T_{m21}(s) = \frac{G_{c2}(s)T_{iç}(s)G_{m21}(s)}{1 + G_{c2}(s)T_{iç}(s)G_{m21}(s)} \quad (4.23)$$

$$T_{m21}(s) = \frac{1}{\frac{(\gamma_1 + \gamma_2)L_{m1}}{K_{c2}K_{2m}^1}s^2 + \frac{1}{K_{c2}K_{2m}^1}s + 1} \quad (4.24)$$

haline alır. K_{c2} kazancı ise;

$$K_{c2} = \frac{1}{4\zeta^2(\gamma_1 + \gamma_2)L_{m1}K_{2m}^1} \quad (4.25)$$

şeklinde hesaplanır. $G_{m21}(s)$ sistemi için kontrolör tasarımı yapıldıktan sonra $G_{m22}(s)$ sistemi için kontrolör tasarımını kolaylaştırmak adına $T_{m21}(s)$ transfer fonksiyonunu birinci mertebeden transfer fonksiyonuna indirgenebilir [4]. Bu indirgenme işlemi yapılırken $\zeta \geq 1$ varsayımı yapılır ve yerleşme zamanı;

$$t_s = 4.5\zeta T \quad (4.26)$$

eşitliğine göre hesaplanır [38]. Birinci merteben sistemlerde yerleşme zamanı, zaman sabitine doğrudan bağlı olduğu için, zaman sabiti ζ ile doğru orantılıdır. Smith Öngörücüsü yapısındaki zaman gecikmesinin etkisi tamamen ortadan kaldırılamayacağı için zaman sabiti γ_3 tasarım parametresi ile çarpılır. Böylece $T_{m21}(s)$ transfer fonksiyonu denklem (4.27)'deki gibi birinci mertebeden transfer fonksiyonuna indirgenebilir.

$$T_{m21}(s) = \frac{1}{\gamma_3\zeta Ts + 1} \quad (4.27)$$

Eklenen γ_3 parametresi γ_1 ve γ_2 parametresiyle karşılaştırıldığı zaman sistemin başarımı ve kararlılığı üzerinde daha az etkisi vardır. γ_3 parametresi zaman gecikmesinin etkisini modellemek için kullanıldığından 1'e eşit ya da 1'den büyük seçilmelidir ($\gamma_3 \geq 1$). $T_{m21}(s)$ transfer fonksiyonun indirgenme işlemi tamamlandıktan sonra $G_{m22}(s)$ sistemi için tasarlanacak $G_{c3}(s)$ kontrolörü;

$$G_{c3}(s) = K_{c3} \frac{(T_{2m}s + 1)}{s} \quad (4.28)$$

şeklinde PI tipi kontrolör tasarlanabilir. $G_{c3}(s)$ kontrolörüyle birlikte $T_{dtş}(s)$ kapalı çevrim transfer fonksiyonu;

$$T_{dtş}(s) = \frac{1}{\frac{\gamma_3(\gamma_1 + \gamma_2)\zeta T}{K_{c3}K_{2m}^2}s^2 + \frac{1}{K_{c3}K_{2m}^2}s + 1} \quad (4.29)$$

halini alır. İkinci mertebeden sistemler için genel standart biçim, $T_{genel}(s)$ ile denklem (4.29)'u birbirine eşitlenirse $G_{c3}(s)$ kontrolör kazancı;

$$K_{c3} = \frac{1}{8\zeta^4 K_{2m}^2 \gamma_3(\gamma_1 + \gamma_2)} \quad (4.30)$$

olarak bulunur [4].

4.2 Ölü Zamanlı Sistemler İçin Model Ayırıştırma Temelli Kontrolör Tasarımına İlişkin Benzetim Çalışmaları

Önceki başlıklar altında verilen bilgiler ışığında başlık 3.3'de bahsedilmiş olan sistemlerin için 3 durum ele alınarak model ayırıştırma temelli kontrolör tasarımı yapılacaktır.

4.2.1 Sıfırı olmayan sistemler için model ayırıştırma temelli kontrolör tasarımı

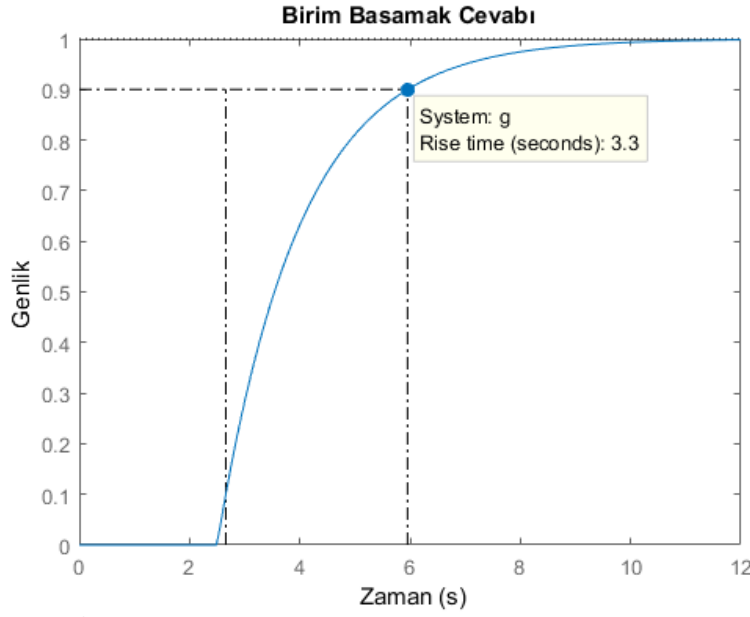
$G(s)$ transfer fonksiyonu 4. mertebeden sıfırı bulunmayan bir sistem olsun.

$$G(s) = \frac{1}{(s+1)^4} = \frac{1}{s^4 + 4s^3 + 6s^2 + 4s + 1} \quad (4.31)$$

Bu transfer fonksiyonun [39]'dan birinci mertebeden ölü zamanlı yaklaşımına ($g(s) = k \frac{e^{-\theta s}}{\tau s + 1}$) bakılırsa;

$$g(s) = \frac{1}{1.5s + 1} e^{-2.5s} \quad (4.32)$$

şeklindedir. $G(s)$ transfer fonksiyonun açık çevrim birim basamak cevabı Şekil 4.8'de verilmiştir.



Şekil 4.8 : $G(s)$ sisteminin birim basamak cevabı.

Şekil 4.8’den görüldüğü üzere sistem cevabı aşım yapmamakta ve sistemin yükselme zamanı 3.3 saniyedir. Tasarlanacak kontrolörle birlikte kapalı çevrim sistem cevabında yükselme zamanını kısaltarak sistem cevabı hızlandırılacak ve aşısız bir sistem cevabı elde edilecek kontrolör tasarımı yapılacaktır. Denklem (4.1)’deki genel iç çevrim transfer ölü zamanlı transfer fonksiyonu ile $G(s)$ ’i birbirine eşitlersek;

$$G(s) = \frac{1}{1.5s + 1} e^{-2.5s} = \frac{K_{1m}}{T_{1m}s + 1} e^{-L_{1m}s} \quad (4.33)$$

K_{1m} , T_{1m} ve L_{1m} sırasıyla;

$$K_{1m} = 1 \quad (4.34)$$

$$T_{1m} = 1.5 \quad (4.35)$$

$$L_{1m} = 2.5 \quad (4.36)$$

olarak bulunur. Tasarlanan kontrolör kutup-sıfır götürmesini yöntemine dayalı olarak yapılmaktadır. Tasarlanacak kontrolör PI tipi kontrolör olacaktır. $G_{c1}(s)$ PI tipi kontrolörü;

$$G_{c1}(s) = K_{c1} \frac{T_{1m}s + 1}{s} = K_{c1} \frac{1.5s + 1}{s} \quad (4.37)$$

şeklinde gösterilebilir. K_{c1} kontrolör kazancı ise denklem (4.38)’deki gibi hesaplanabilir.

$$K_{c1} = \frac{1}{(\gamma_1 + \gamma_2)L_{1m}K_{1m}} \quad (4.38)$$

γ_1 parametresinin seçimi için $\frac{T_{1m}}{L_{1m}}$ oranına bakılır. Bu orana bakıldığı zaman,

$$\frac{T_{1m}}{L_{1m}} = \frac{1.5}{2.5} = 0.6 \quad (4.39)$$

olarak bulunur. Bu oran 1’de küçük olduğu için γ_1 parametresi 0.5 ile 1 arasında seçilmelidir. γ_2 parametresinin seçimi ise denklem (4.40)’daki eşitsizliğe göre yapılır.

$$2(\gamma_1 + \gamma_2) > 1 \quad (4.40)$$

$G_{c1}(s)$ kontrolörünün tasarımı için γ_1 ve γ_2 parametreleri sırasıyla;

$$\gamma_1 = 0.5 \quad (4.41)$$

$$\gamma_2 = 0.05 \quad (4.42)$$

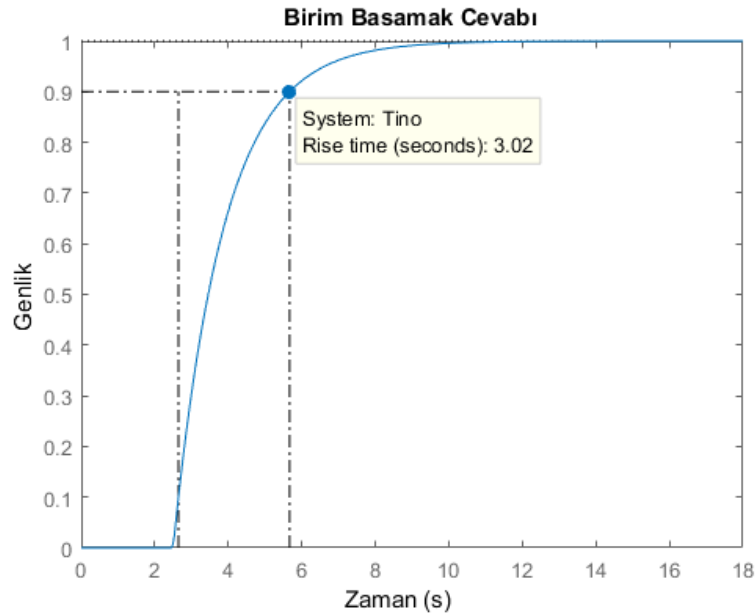
olarak seçilmiştir. Parametrelerin seçiminden sonra $G_{c1}(s)$ PI tipi kontrolörü;

$$G_{c1}(s) = 0.7273 \frac{1.5s + 1}{s} = \frac{1.091s + 0.7273}{s} \quad (4.43)$$

olarak bulunur. Bu durumda kapalı çevrim transfer fonksiyonu $T_{cl}(s)$;

$$T_{cl}(s) = \frac{1}{1.091s + 1} e^{-2.5s} \quad (4.44)$$

şeklini alır. Kapalı çevrim sistemin birim basamak cevabı Şekil 4.9’da verilmiştir.



Şekil 4.9 : Kapalı çevrim sistemin birim basamak cevabı.

Şekil 4.9’dan görüldüğü üzere kapalı çevrim sistem birim basamak cevabı aşısız ve yükselme zamanı ise 3.02 saniye olmuştur. Yükselme zamanında ciddi azalma olmaması şu şekilde özetlenebilir;

- $\frac{T_{1m}}{L_{1m}}$ arasındaki oran 1'den küçük olduğu durumlarda γ_1 parametresi 0.5 ile 1 arasında seçilmesi gerekir. Birinci mertebeden sistemlerde zaman sabitinin yükselme zamanı üzerinde doğrudan bir etkisi olmasından dolayı $\frac{T_{1m}}{L_{1m}}$ arasındaki oran ne kadar 0.5 yakınsa sistemi hızlandırmak o kadar zor olacaktır. Örneğin $\frac{1}{2s+1}e^{-4.1s}$ sisteminde $\frac{T_{1m}}{L_{1m}}$ arasındaki oran 0.4878 olduğu için sistem hiçbir şekilde hızlandırılmayacaktır.

Buna ek olarak sıfırı bulunmayan sistemlere ait diğer koşullar için MAT kontrolör tasarımı için aşağıdaki yöntemler izlenebilir:

- $\frac{T_{1m}}{L_{1m}}$ arasındaki oran 1'den küçük ve 1'e yakın olduğu durumlarda sistemin referans takip başarımını arttırmak adına γ_1 olabildiğince küçük (bu durum için en az 0.5) seçilmelidir. γ_2 parametresi ise sistemin parametre değişikliği ve salınımı azaltmak adına $2(\gamma_1 + \gamma_2) > 1$ eşitsizliğini sağlayacak şekilde daha büyük seçilebilir.
- $\frac{T_{1m}}{L_{1m}}$ arasındaki oran 1'e eşit olduğu durumlarda γ_1 parametresi 0.5 seçilebilir. $\frac{T_{1m}}{L_{1m}}$ oranı 1 olduğu için γ_2 parametresi 0.5'den küçük seçilerek sistem cevabı hızlandırılabilir.
- $\frac{T_{1m}}{L_{1m}}$ arasındaki oran 1'den büyük olduğu durumlarda γ_1 parametresi 0.1 ile 0.5 arasında seçilmesi gerekir. Referans takip başarımını arttırmak adına γ_1 olabildiğince küçük ve eşitsizliğini sağlayacak şekilde γ_2 parametresi daha büyük seçilebilir. $\gamma_1 + \gamma_2$ ifadesi $\frac{T_{1m}}{L_{1m}}$ arasındaki oranını geçtiği takdirde sistem cevabı hızlandırılmayacaktır.

4.2.2 Sol-yarı düzlemde sıfırı olan sistemler için model ayrıştırma temelli kontrolör tasarımı

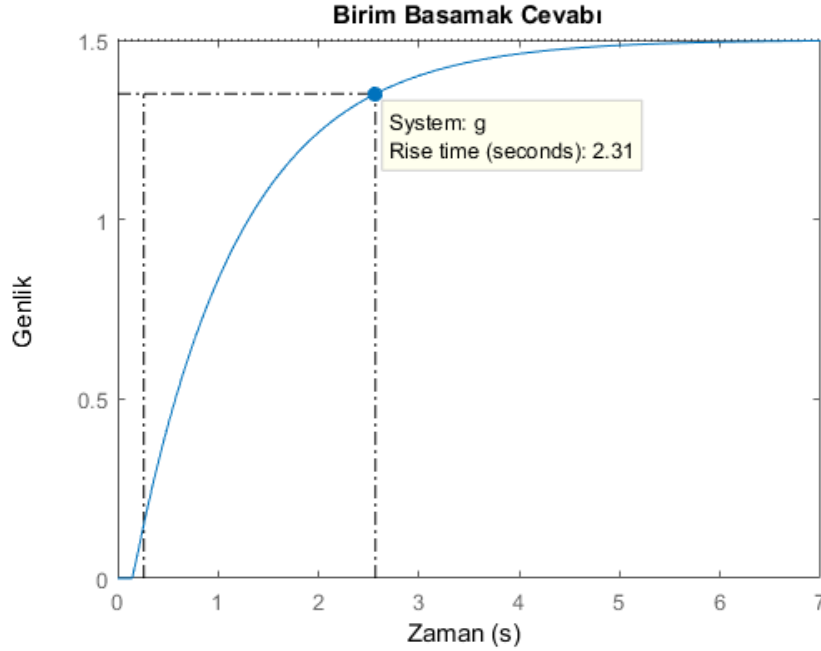
G(s) transfer fonksiyonu 4. mertebeden sıfırı bulunmayan bir sistem olsun.

$$G(s) = \frac{2(15s+1)}{(20s+1)(s+1)(0.1s+1)^2} = \frac{30s+2}{0.2s^4 + 4.21s^3 + 24.21s^2 + 21.2s + 1} \quad (4.45)$$

Sistemin $s=-0.0667$ 'de bir sıfırı bulunmaktadır. Bu transfer fonksiyonun [39]'dan birinci mertebeden ölü zamanlı yaklaşımına ($g(s) = k\frac{e^{-\theta s}}{\tau s + 1}$) bakılırsa;

$$G(s) = \frac{1.5}{1.05s + 1}e^{-0.15s} \quad (4.46)$$

şeklindedir. $G(s)$ transfer fonksiyonunun açık çevrim birim basamak cevabı Şekil 4.10'da verilmiştir.



Şekil 4.10 : $G(s)$ sisteminin birim basamak cevabı.

Şekil 4.10'dan görüldüğü üzere sistem cevabı aşım yapmamakta ve sistemin yükselme zamanı 2.31 saniyedir. Tasarlanacak kontrolörle birlikte kapalı çevrim sistem cevabında yükselme zamanını kısaltarak sistem cevabı hızlandırılacak ve aşımsız bir sistem cevabı elde edilecek kontrolör tasarımı yapılacaktır. Denklem (4.1)'deki genel iç çevrim transfer ölü zamanlı transfer fonksiyonu ile $G(s)$ 'i birbirine eşitlersek;

$$G(s) = \frac{1.5}{1.05s + 1} e^{-0.15s} = \frac{K_{1m}}{T_{1m}s + 1} e^{-L_{1m}s} \quad (4.47)$$

K_{1m} , T_{1m} ve L_{1m} sırasıyla;

$$K_{1m} = 1.5 \quad (4.48)$$

$$T_{1m} = 1.05 \quad (4.49)$$

$$L_{1m} = 0.15 \quad (4.50)$$

olarak bulunur. Tasarlanan kontrolör kutup-sıfır götürmesini yöntemine dayalı olarak yapılmaktadır. Tasarlanacak kontrolör PI tipi kontrolör olacaktır. $G_{c1}(s)$ PI tipi kontrolörü;

$$G_{c1}(s) = K_{c1} \frac{T_{1m}s + 1}{s} = K_{c1} \frac{1.05s + 1}{s} \quad (4.51)$$

şeklinde gösterilebilir. K_{c1} kontrolör kazancı ise denklem (4.52)'deki gibi hesaplanabilir.

$$K_{c1} = \frac{1}{(\gamma_1 + \gamma_2)L_{1m}K_{1m}} \quad (4.52)$$

γ_1 parametresinin seçimi için $\frac{T_{1m}}{L_{1m}}$ oranına bakılır. Bu orana bakıldığında zaman,

$$\frac{T_{1m}}{L_{1m}} = \frac{1.05}{0.15} = 7 \quad (4.53)$$

olarak bulunur. Bu oran 1'de büyük olduğu için γ_1 parametresi 0.1 ile 0.5 arasında seçilmelidir. γ_2 parametresinin seçimi ise denklem (4.54)'deki eşitsizliğe göre yapılır.

$$2(\gamma_1 + \gamma_2) > 1 \quad (4.54)$$

$G_{c1}(s)$ kontrolörünün tasarımı için γ_1 ve γ_2 parametreleri sırasıyla;

$$\gamma_1 = 0.1 \quad (4.55)$$

$$\gamma_2 = 4 \quad (4.56)$$

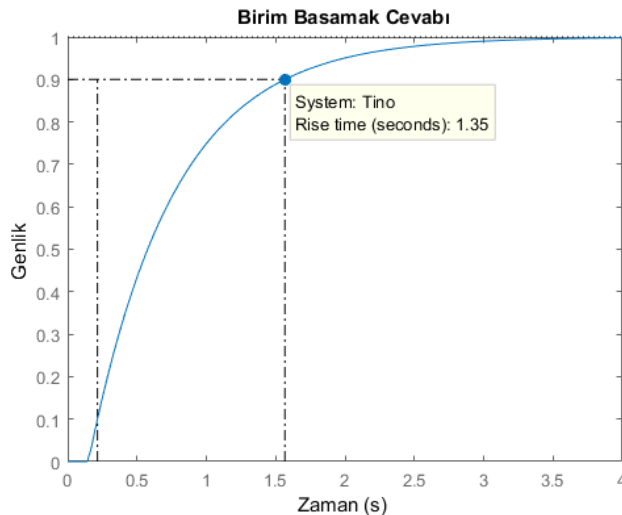
olarak seçilmiştir. Parametrelerin seçiminden sonra $G_{c1}(s)$ PI tipi kontrolörü;

$$G_{c1}(s) = 1.0840 \frac{1.05s + 1}{s} = \frac{1.1382s + 1.0840}{s} \quad (4.57)$$

olarak bulunur. Bu durumda kapalı çevrim transfer fonksiyonu $T_{cl}(s)$;

$$T_{cl}(s) = \frac{1}{1.138s + 1} e^{-2.5s} \quad (4.58)$$

şeklini alır. Kapalı çevrim sistemin birim basamak cevabı Şekil 4.11'de verilmiştir.



Şekil 4.11 : Kapalı çevrim sistemin birim basamak cevabı.

Şekil 4.11'den görüldüğü üzere kapalı çevrim sistem birim basamak cevabı aşırı ve yükselme zamanı ise 1.35 saniye olmuştur. Bu örneğe ek olarak diğer durumlarda;

- $\frac{T_{1m}}{L_{1m}}$ arasındaki oran 1'den küçük olduğu durumlarda γ_1 parametresi 0.5 ile 1 arasında seçilmesi gerekir. Birinci mertebeden sistemlerde zaman sabitinin yükselme zamanı üzerinde doğrudan bir etkisi olmasından dolayı $\frac{T_{1m}}{L_{1m}}$ arasındaki oran ne kadar 0.5 yakınsa sistemi hızlandırmak o kadar zor olacaktır.
- $\frac{T_{1m}}{L_{1m}}$ arasındaki oran 1'den küçük ve 1'e yakın olduğu durumlarda sistemin referans takip başarımını arttırmak adına γ_1 olabildiğince küçük (bu durum için en az 0.5) seçilmelidir. γ_2 parametresi ise sistemin parametre değişikliği ve salınımı azaltmak adına $2(\gamma_1 + \gamma_2) > 1$ eşitsizliğini sağlayacak şekilde daha büyük seçilebilir.
- $\frac{T_{1m}}{L_{1m}}$ arasındaki oran 1'e eşit olduğu durumlarda γ_1 parametresi 0.5 seçilebilir. $\frac{T_{1m}}{L_{1m}}$ oranı 1 olduğu için γ_2 parametresi 0.5'den küçük seçilerek sistem cevabı hızlandırılabilir.

yöntemleri izlenebilir.

4.2.3 Sağ-yarı düzlemde sıfırı olan sistemler için model ayrıştırma temelli kontrolör tasarımı

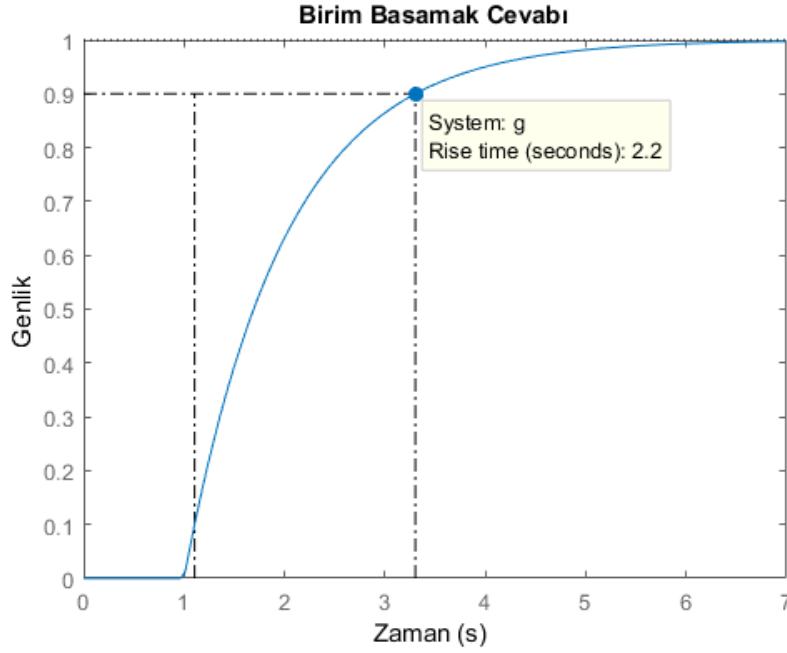
$G(s)$ transfer fonksiyonu 1. mertebeden sıfırı bulunmayan bir sistem olsun.

$$G(s) = \frac{-s+1}{s+1} \quad (4.59)$$

Sistemin $s=1$ 'de bir sıfırı bulunmaktadır. Bu transfer fonksiyonun [39]'dan birinci mertebeden ölü zamanlı yaklaşımına ($g(s)=k\frac{e^{-\theta s}}{\tau s+1}$) bakılırsa;

$$G(s) = \frac{1}{s+1}e^{-s} \quad (4.60)$$

şeklindedir. $G(s)$ transfer fonksiyonun açık çevrim birim basamak cevabı Şekil 4.12'de verilmiştir.



Şekil 4.12 : $G(s)$ sisteminin birim basamak cevabı.

Şekil 4.12’den görüldüğü üzere sistem cevabı aşım yapmamakta ve sistemin yükselme zamanı 2.2 saniyedir. Tasarlanacak kontrolörle birlikte kapalı çevrim sistem cevabında yükselme zamanını kısaltarak sistem cevabı hızlandırılacak ve aşımsız bir sistem cevabı elde edilecek kontrolör tasarımı yapılacaktır. Denklem (4.1)’deki genel iç çevrim transfer ölü zamanlı transfer fonksiyonu ile $G(s)$ ’i birbirine eşitlersek;

$$G(s) = \frac{1}{s+1}e^{-s} = \frac{K_{1m}}{T_{1m}s+1}e^{-L_{1m}s} \quad (4.61)$$

K_{1m} , T_{1m} ve L_{1m} sırasıyla;

$$K_{1m} = 1 \quad (4.62)$$

$$T_{1m} = 1 \quad (4.63)$$

$$L_{1m} = 1 \quad (4.64)$$

olarak bulunur. Tasarlanan kontrolör kutup-sıfır götürmesini yöntemine dayalı olarak yapılmaktadır. Tasarlanacak kontrolör PI tipi kontrolör olacaktır. $G_{c1}(s)$ PI tipi kontrolörü;

$$G_{c1}(s) = K_{c1} \frac{T_{1m}s+1}{s} = K_{c1} \frac{s+1}{s} \quad (4.65)$$

şeklinde gösterilebilir. K_{c1} kontrolör kazancı ise denklem (4.66)’daki hesaplanabilir.

$$K_{c1} = \frac{1}{(\gamma_1 + \gamma_2)L_{1m}K_{1m}} \quad (4.66)$$

γ_1 parametresinin seçimi için $\frac{T_{1m}}{L_{1m}}$ oranına bakılır. Bu orana bakıldığı zaman,

$$\frac{T_{1m}}{L_{1m}} = \frac{1}{1} = 1 \quad (4.67)$$

olarak bulunur. Bu oran 1'e eşit olduğu için γ_1 0.5 seçilebilir. γ_2 parametresinin seçimi ise denklem (4.68)'deki eşitsizliğe göre yapılır.

$$2(\gamma_1 + \gamma_2) > 1 \quad (4.68)$$

$G_{c1}(s)$ kontrolörünün tasarımı için γ_1 ve γ_2 parametreleri sırasıyla;

$$\gamma_1 = 0.5 \quad (4.69)$$

$$\gamma_2 = 0.4 \quad (4.70)$$

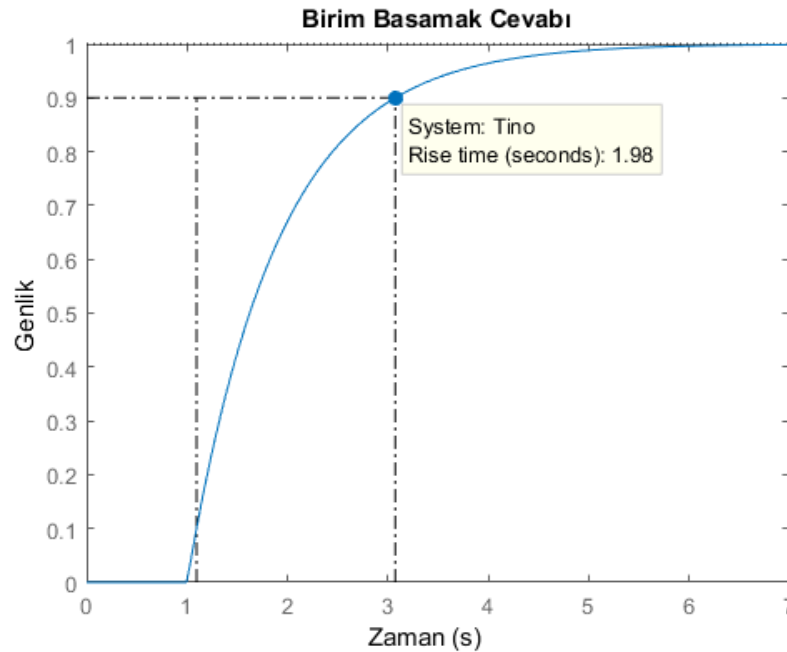
olarak seçilmiştir. Parametrelerin seçiminden sonra $G_{c1}(s)$ PI tipi kontrolörü;

$$G_{c1}(s) = 1.1111 \frac{s+1}{s} = \frac{1.1111s + 1.1111}{s} \quad (4.71)$$

olarak bulunur. Bu durum iç çevrim kapalı çevrim transfer fonksiyonu $T_{cl}(s)$;

$$T_{cl}(s) = \frac{1}{1.111s + 1} e^{-s} \quad (4.72)$$

şeklini alır. Kapalı çevrim sistemin birim basamak cevabı Şekil 4.13'de verilmiştir.



Şekil 4.13 : Kapalı çevrim sistemin birim basamak cevabı.

Şekil 4.13'den görüldüğü üzere kapalı çevrim sistem birim basamak cevabı aşısız ve yükselme zamanı ise 1.98 saniye olmuştur. Bu örneğe ek olarak diğer durumlarda;

- $\frac{T_{1m}}{L_{1m}}$ arasındaki oran 1'den küçük olduğu durumlarda γ_1 parametresi 0.5 ile 1 arasında seçilmesi gerekir. Birinci mertebeden sistemlerde zaman sabitinin yükselme zamanı üzerinde doğrudan bir etkisi olmasından dolayı $\frac{T_{1m}}{L_{1m}}$ arasındaki oran ne kadar 0.5 yakınsa sistemi hızlandırmak o kadar zor olacaktır.
- $\frac{T_{1m}}{L_{1m}}$ arasındaki oran 1'den küçük ve 1'e yakın olduğu durumlarda sistemin referans takip başarımını arttırmak adına γ_1 olabildiğince küçük (bu durum için en az 0.5) seçilmelidir. γ_2 parametresi ise sistemin parametre değişikliği ve salınımı azaltmak adına $2(\gamma_1 + \gamma_2) > 1$ eşitsizliğini sağlayacak şekilde daha büyük seçilebilir.
- $\frac{T_{1m}}{L_{1m}}$ arasındaki oran 1'den büyük olduğu durumlarda γ_1 parametresi 0.1 ile 0.5 arasında seçilmesi gerekir. Referans takip başarımını arttırmak adına γ_1 olabildiğince küçük ve eşitsizliğini sağlayacak şekilde γ_2 parametresi daha büyük seçilebilir. $\gamma_1 + \gamma_2$ ifadesi $\frac{T_{1m}}{L_{1m}}$ arasındaki oranını geçtiği takdirde sistem cevabı hızlandırılmayacaktır.

yöntemleri izlenebilir.

5. KASKAD KONTROL YAPILARININ KARŞILAŞTIRILMASINA İLİŞKİN BENZETİM ÇALIŞMALARI

Bu bölümde MAT ve KOA kaskad kontrol yöntemlerinin karşılaştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla farklı özelliklere sahip dört kaskad yapı seçilmiştir. Bu yapılarda yer alan sistem modelleri ve bu modellerin düşük mertebeden ölü zamanlı karşılıkları, [39] ve [40] referanslarından elde edilmiştir. KOA yönteminde sistemleri yüksek mertebeden modelleri doğrudan kullanılmış, bu modeller için yüksek mertebeden kontrolörler tasarlanmıştır. MAT yönteminde ise yüksek mertebeden modellerin ölü zamanlı düşük mertebeden yaklaşık karşılıklarından yararlanılmıştır. Tasarımda kullanılacak iç ve dış çevrim sistem modelleri Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1 : İç ve dış çevrim sistem modelleri

	İç Çevrim	Dış Çevrim
Kaskad Model 1	$\frac{1}{(s+1)(0.2s+1)}$	$\frac{1}{(s+1)(0.2s+1)(0.04s+1)(0.0008s+1)}$
Kaskad Model 2	$\frac{1}{(s+1)(0.2s+1)}$	$\frac{2(15s+1)}{(20s+1)(s+1)(0.1s+1)^2}$
Kaskad Model 3	$\frac{1}{(s+1)(0.2s+1)(0.04s+1)(0.0008s+1)}$	$\frac{-s+1}{s+1}$
Kaskad Model 4	$\frac{-0.3s+1}{(s+1)^3}$	$\frac{1}{s(s+1)^2}$

Seçilen sistemlerde;

- Kaskad Model 1’de, hem iç çevrim hem dış çevrimin sıfırı olmayan sistemler olması,
- Kaskad Model 2’de, iç çevrimde sıfırı olmayan sistem, dış çevrimde sol-yarı düzlemde sıfırı olan sistem olması,
- Kaskad Model 3’de, iç çevrimde sıfırı olmayan sistem, dış çevrimde sağ-yarı düzlemde sıfırı olan sistem olması,
- Kaskad Model 4’de, iç çevrimde sağ-yarı düzlemde sıfırı olan sistem, dış çevrimde integratörü olan sistem olması,

şeklinde özelliklere yer verilmiştir. Karşılaştırma kriteri olarak ITSE seçilmiştir. Ayrıca iç çevrime giriş ve çıkış bozucuları verilerek bozucu bastırma başarımları da karşılaştırılmıştır.

5.1 “Kaskad Model 1” için Kaskad Kontrolör Tasarımı

5.1.1 Model ayrıştırma temelli kaskad kontrolör tasarımı

5.1.1.1 İç ve dış çevrimde ölü zamanlı birinci mertebeden modellerin kullanılması

Kaskad Model 1’de bulunan iç ve dış çevrimdeki sistemlerin transfer fonksiyonları sırasıyla;

$$G_{iç}(s) = \frac{1}{(s+1)(0.2s+1)} = \frac{1}{0.2s^2 + 1.2s + 1} \quad (5.1)$$

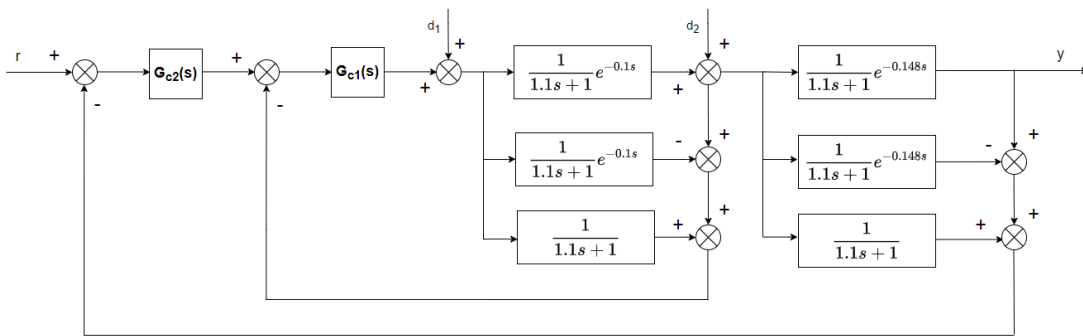
$$G_{dış}(s) = \frac{1}{6.4 \cdot 10^{-6} s^4 + 0.008198 s^3 + 0.249 s^2 + 1.241 s + 1} \quad (5.2)$$

şeklinde. Yüksek mertebeden iç ve dış çevrimdeki sistemlerin birinci mertebeden ölü zamanlı modelleri sırasıyla,

$$G_{iç-ölü}(s) = \frac{1}{1.1s+1} e^{-0.1s} \quad (5.3)$$

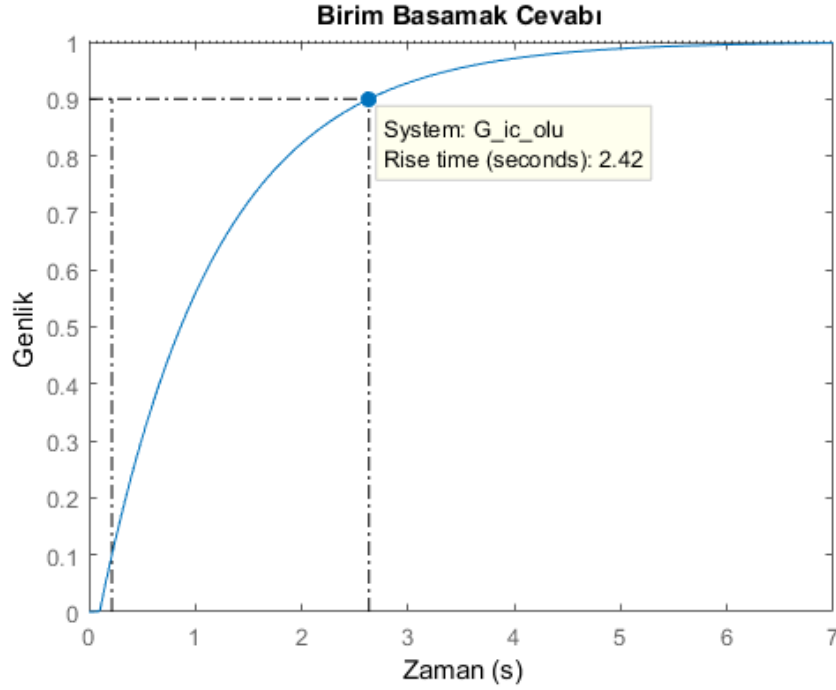
$$G_{dış-ölü}(s) = \frac{1}{1.1s+1} e^{-0.148s} \quad (5.4)$$

şeklinde elde edilir [39]. MAT kaskad kontrol yapısına ait blok diyagram Şekil 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1 : Kaskad Model 1 için MAT kaskad kontrol blok diyagramı.

$G_{iç-ölü}(s)$ transfer fonksiyonun açık çevrim birim basamak cevabı Şekil 5.2’deki gibidir.



Şekil 5.2 : $G_{iç-ölü}(s)$ sisteminin birim basamak cevabı.

Şekil 5.2’den görüldüğü üzere sistem cevabı aşım yapmamakta ve sistemin yükselme zamanı 2.42 saniyedir. Tasarlanacak kontrolörle birlikte kapalı çevrim sistem cevabında yükselme zamanını kısaltarak sistem cevabı hızlandırılacak ve aşısız bir sistem cevabı elde edilecek kontrolör tasarımı yapılacaktır. Denklem (4.3)’teki genel iç çevrim transfer ölü zamanlı transfer fonksiyonu ile $G_{iç-ölü}(s)$ ’i birbirine eşitlersek;

$$G_{iç-ölü}(s) = \frac{1}{1.1s + 1} e^{-0.1s} = \frac{K_{1m}}{T_{1m}s + 1} e^{-L_{1m}s} \quad (5.5)$$

K_{1m} , T_{1m} ve L_{1m} sırasıyla;

$$K_{1m} = 1 \quad (5.6)$$

$$T_{1m} = 1.1 \quad (5.7)$$

$$L_{1m} = 0.1 \quad (5.8)$$

olarak bulunur. Tasarlanan kontrolör kutup-sıfır götürmesini yöntemine dayalı olarak yapılmaktadır. İç çevrim için tasarlanacak kontrolör PI tipi kontrolör olacaktır. $G_{c1}(s)$ PI tipi kontrolörü;

$$G_{c1}(s) = K_{c1} \frac{T_{1m}s + 1}{s} = K_{c1} \frac{1.1s + 1}{s} \quad (5.9)$$

şeklinde gösterilebilir. K_{c1} kontrolör kazancı ise denklem (5.10)’daki gibi hesaplanabilir.

$$K_{c1} = \frac{1}{(\gamma_1 + \gamma_2)L_{1m}K_{1m}} \quad (5.10)$$

γ_1 parametresinin seçimi için $\frac{T_{1m}}{L_{1m}}$ oranına bakılır. Bu orana bakıldığı zaman,

$$\frac{T_{1m}}{L_{1m}} = \frac{1.1}{0.1} = 11 \quad (5.11)$$

olarak bulunur. Bu oran 1’de büyük olduğu için γ_1 parametresi 0.1 ile 0.5 arasında seçilmelidir. γ_2 parametresinin seçimi ise denklem (5.12)’deki eşitsizliğe göre yapılır.

$$2(\gamma_1 + \gamma_2) > 1 \quad (5.12)$$

$G_{c1}(s)$ kontrolörünün tasarımı için γ_1 ve γ_2 parametreleri sırasıyla;

$$\gamma_1 = 0.1 \quad (5.13)$$

$$\gamma_2 = 4 \quad (5.14)$$

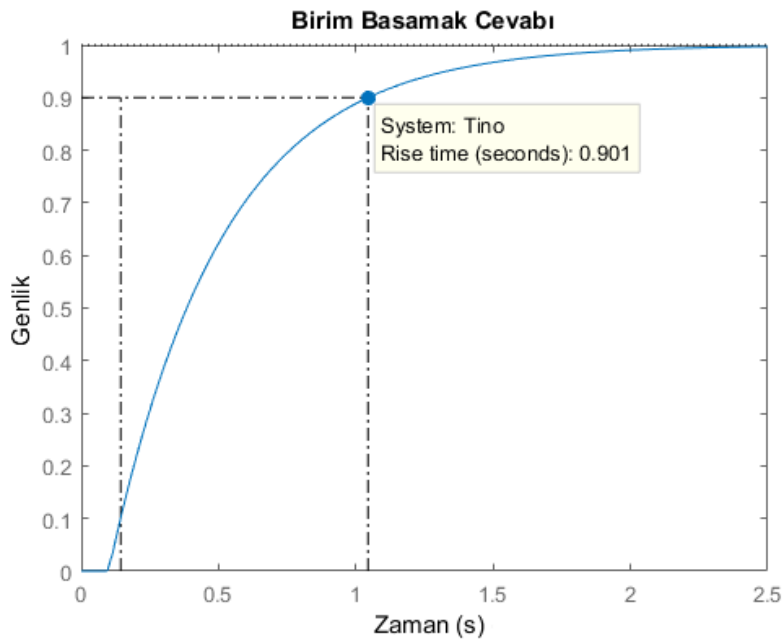
olarak seçilmiştir. Parametrelerin seçiminden sonra $G_{c1}(s)$ PI tipi kontrolörü;

$$G_{c1}(s) = 2.4390 \frac{1.1s + 1}{s} = \frac{2.683s + 2.439}{s} \quad (5.15)$$

olarak bulunur. Bu durum iç çevrim kapalı çevrim transfer fonksiyonu $T_{iç}(s)$;

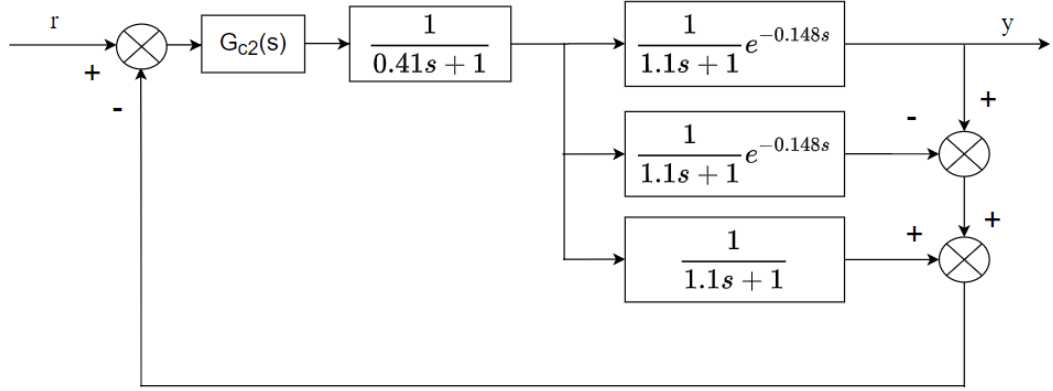
$$T_{iç}(s) = \frac{1}{0.41s + 1} e^{-0.1s} \quad (5.16)$$

şeklini alır. İç çevrime ait kapalı çevrim sistemin birim basamak cevabı Şekil 5.3’de verilmiştir.



Şekil 5.3 : İç çevrime ait kapalı çevrim sistemin birim basamak cevabı.

Şekil 5.3'den görüldüğü üzere kapalı çevrim sistem birim basamak cevabı aşırı ve yükselme zamanı ise 0.901 saniye olmuştur. İç çevrim için kontrolör tasarımı yapıldıktan sonra Şekil 5.1'deki kaskad sistem Şekil 5.4'deki gibi indirgenebilir.

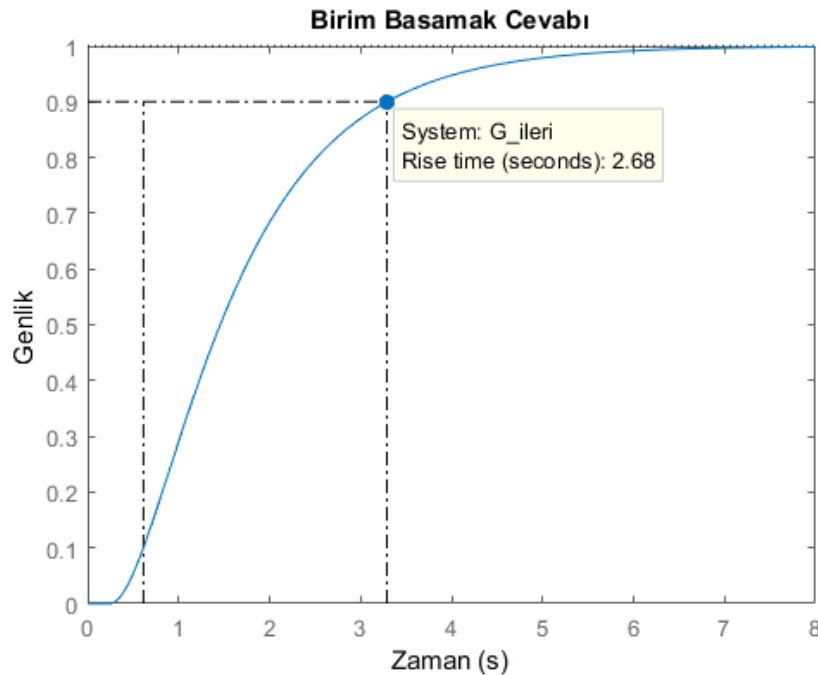


Şekil 5.4 : Dış çevrim için indirgenmiş blok diyagramı.

Şekil 5.4'deki indirgenmiş blok diyagramındaki ileri yoldaki ölü zamansız transfer fonksiyonu;

$$G_{\text{ileri-ölü zamansız}} = \frac{1}{0.451s^2 + 1.51s + 1} \quad (5.17)$$

şeklindedir. $G_{\text{ileri}}(s)$ transfer fonksiyonun birim basamak cevabı Şekil 5.5'de verilmiştir.



Şekil 5.5 : $G_{\text{ileri}}(s)$ sisteminin birim basamak cevabı.

Şekil 5.5'den görüldüğü üzere sistem cevabı aşım yapmamakta ve sistemin yükselme zamanı 2.68 saniyedir. Tasarlanacak kontrolörle birlikte kapalı çevrim sistem cevabında aşımsız bir sistem cevabı elde edilecek kontrolör tasarımı yapılacaktır. Dış çevrim için denklem (4.19)'daki genel birinci mertebeden transfer ölü zamanlı transfer fonksiyonu ile $G_{dış-ölü}(s)$ 'i birbirine eşitlersek;

$$G_{dış-ölü}(s) = \frac{1}{1.1s + 1} e^{-0.148s} = \frac{K_{2m}}{T_{2m}s + 1} e^{-L_{2m}s} \quad (5.18)$$

K_{2m} , T_{2m} ve L_{2m} sırasıyla;

$$K_{2m} = 1 \quad (5.19)$$

$$T_{2m} = 1.1 \quad (5.20)$$

$$L_{2m} = 0.148 \quad (5.21)$$

olarak bulunur. Tasarlanan kontrolör kutup-sıfır götürmesini yöntemine dayalı olarak yapılmaktadır. İç çevrim için tasarlanacak kontrolör PI tipi kontrolör olacaktır. $G_{c2}(s)$ PI tipi kontrolörü;

$$G_{c2}(s) = K_{c2} \frac{T_{2m}s + 1}{s} = K_{c2} \frac{1.1s + 1}{s} \quad (5.22)$$

şeklinde gösterilebilir. K_{c2} kontrolör kazancı ise denklem (5.23)'daki gibi hesaplanabilir.

$$K_{c2} = \frac{1}{4\zeta^2(\gamma_1 + \gamma_2)L_{m1}K_{2m}} \quad (5.23)$$

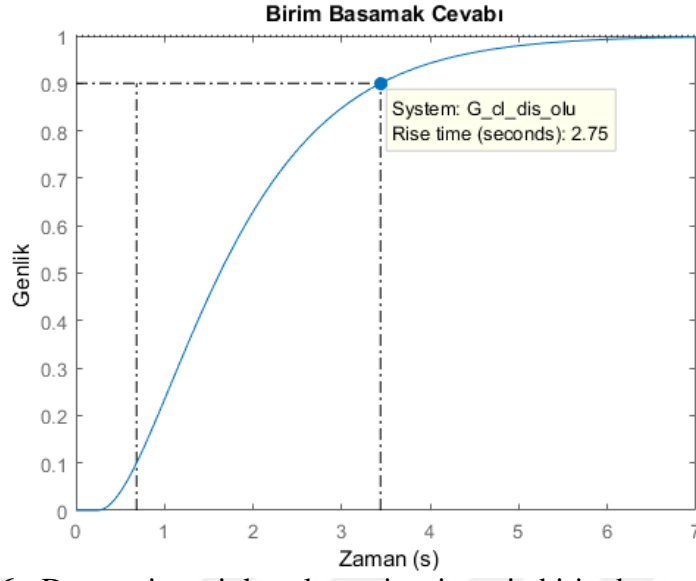
Aşımsız bir sistem cevabı istenildiği için $\zeta = 1$ olarak seçilir. Parametrelerin seçiminden sonra $G_{c2}(s)$ PI tipi kontrolörü;

$$G_{c2}(s) = 0.6098 \frac{1.1s + 1}{s} = \frac{0.6707s + 0.6098}{s} \quad (5.24)$$

olarak bulunur. Bu durum dış çevrime ait ölü zamanlı kapalı çevrim transfer fonksiyonu;

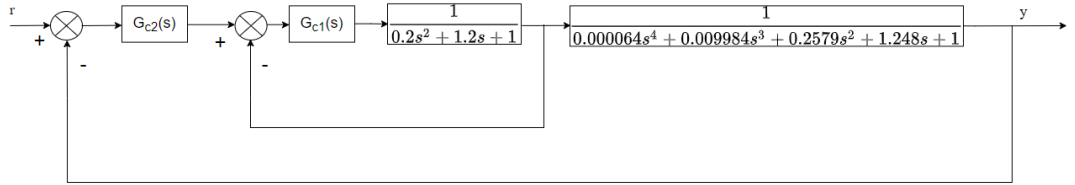
$$G_{cl-dış-ölü}(s) = \frac{0.6707s + 0.6098}{0.451s^3 + 1.51s^2 + 1.671s + 0.6098} e^{-0.248s} \quad (5.25)$$

şeklini alır. Dış çevrime ait kapalı çevrim sistemin birim basamak cevabı Şekil 5.6'da verilmiştir.



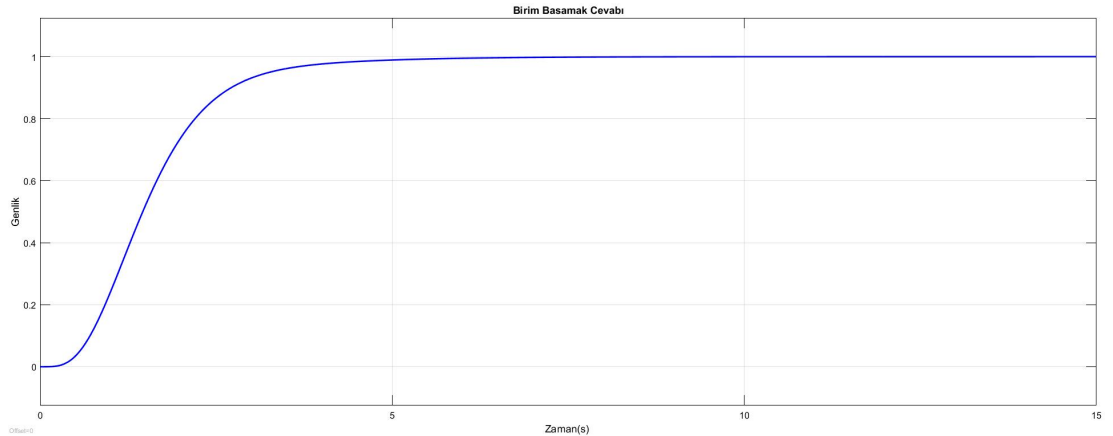
Şekil 5.6 : Dış çevrime ait kapalı çevrim sistemin birim basamak cevabı.

Şekil 5.6'dan görüldüğü üzere kapalı çevrim sistem birim basamak cevabı aşırı ve yükselme zamanı ise 2.75 saniye olmuştur. Tasarlanan $G_{c1}(s)$ ve $G_{c2}(s)$ kontrolörleri, Kaskad Model 1'deki yapıya Şekil 5.7'deki gibi uygulanmıştır.



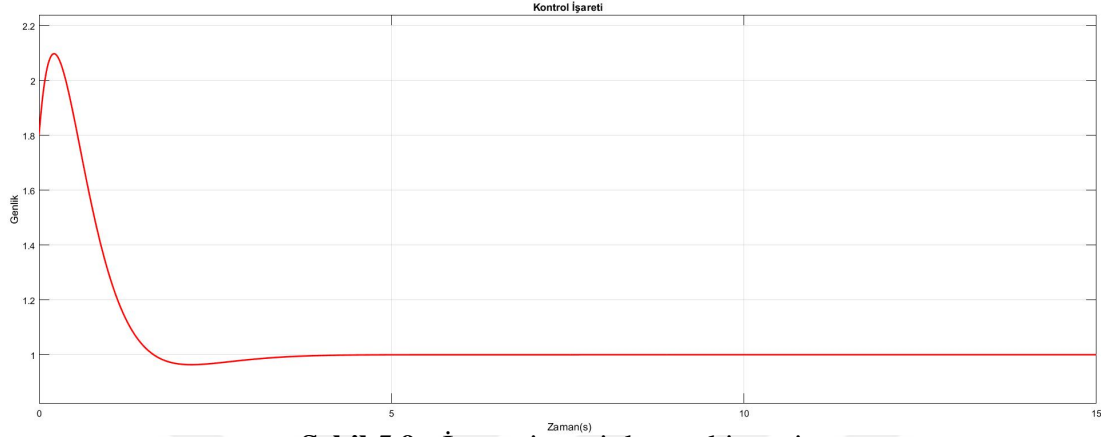
Şekil 5.7 : Kaskad Model 1 için oluşturulan kaskad kontrol yapısı.

Şekil 5.7'deki blok diyagramında gösterilen kaskad sisteme ait birim basamak cevabı Şekil 5.8'de verilmiştir.



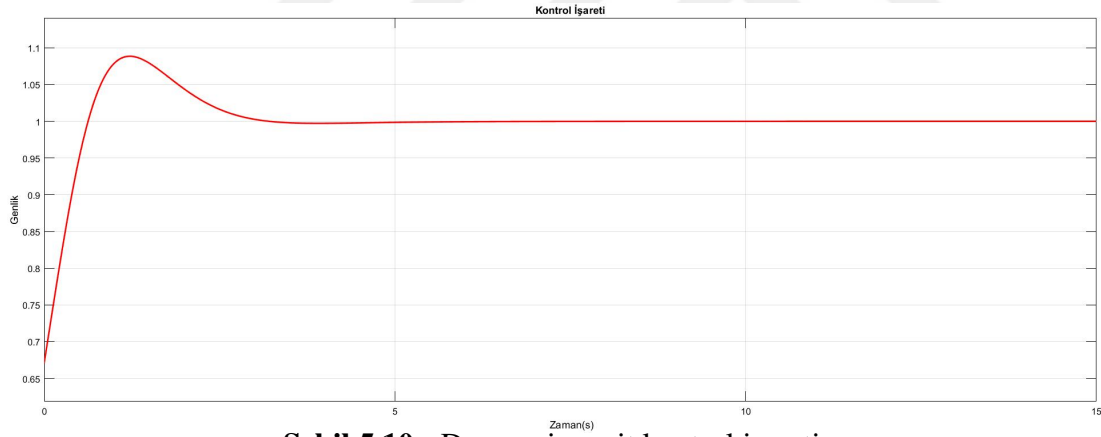
Şekil 5.8 : Kaskad sisteme ait birim basamak cevabı.

Şekil 5.8'den görüldüğü üzere sistem aşım yapmamıştır. Sistemin yükselme zamanı ise 2.0042 saniyedir. Bu değer, kapalı çevrim ölü zamanlı sistem sistemin yükselme zamanında daha düşük çıkmıştır. İç çevrime ait kontrol işareti Şekil 5.9'da verilmiştir.



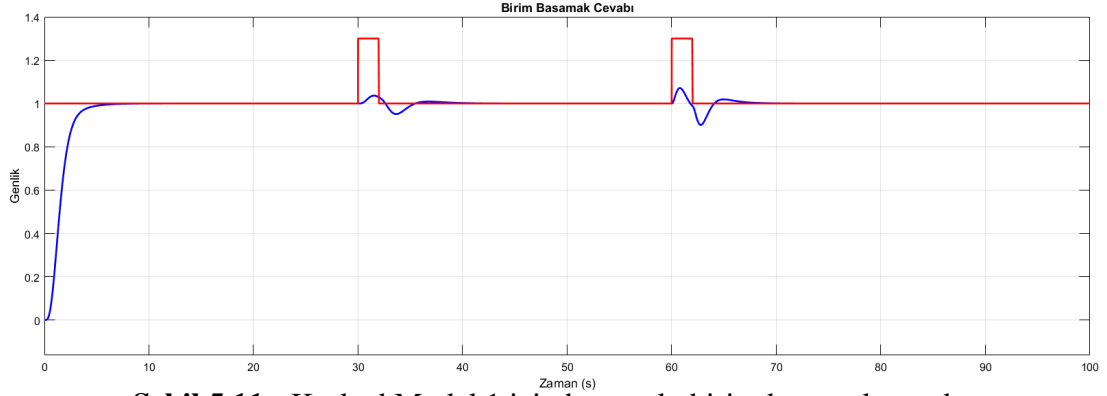
Şekil 5.9 : İç çevrime ait kontrol işareti.

Dış çevrime ait kontrol işareti Şekil 5.10'da verilmiştir.



Şekil 5.10 : Dış çevrime ait kontrol işareti.

Şekil 5.1'de gösterilen d_1 ve d_2 bozucuları sırasıyla 30. ve 60. saniyede verilmiştir. Bozucuların genlikleri 0.3 olup, 2 saniye boyunca sisteme verilmişlerdir. İç sistemdeki iç d_1 ve dış d_2 bozucuları etkisinde birim basamak cevabı Şekil 5.11'de verilmiştir.



Şekil 5.11 : Kaskad Model 1 için bozuculu birim basamak cevabı.

Şekil 5.11’den görüldüğü üzere yapı d_1 ve d_2 bozucularını bastırmıştır. d_1 bozucusu 4.72 saniyede, d_2 bozucusu 6.77 saniyede bastırılmıştır. d_1 ve d_2 bozucusuna ait ITSE hata değerleri sırasıyla;

$$ITSE_{d_1} = 0.1497$$

$$ITSE_{d_2} = 0.806$$

şeklindedir.

5.1.1.2 İç çevrimde ölü zamanlı birinci mertebeden modelin dış çevrimde ölü zamanlı ikinci mertebeden modelin kullanılması

Bu başlık altında $G_{dış-ölü}(s)$ transfer fonksiyonunun 2.mertebeden ölü zamanlı olması durumu ele alınacaktır. Dış çevrimde birinci mertebeden ölü zamanlı sistem için tasarlanan kontrolden farklı olarak sistemi iki adet birinci mertebeden sisteme ayırarak her sistem dinamiği ayrı çevrimlerde kontrol edilecektir. Yüksek mertebeden iç çevrimin birinci mertebeden ölü zamanlı modeli ve dış çevrimdeki sistemin ikinci mertebeden ölü zamanlı modelleri sırasıyla;

$$G_{iç-ölü}(s) = \frac{1}{1.1s + 1} e^{-0.1s} \quad (5.26)$$

$$G_{dış-ölü}(s) = \frac{1}{0.22s^2 + 1.22s + 1} e^{-0.028s} \quad (5.27)$$

şeklindedir [39]. $G_{dış-ölü}(s)$ ’nün ölü zamansız transfer fonksiyonu $G_{m21}(s)$ ve $G_{m22}(s)$ birinci mertebeden transfer fonksiyonlarına ayrılmalıdır. Ölü zamansız sistem;

$$G_{m21}(s) = \frac{K_{2m}^1}{(T_{m1}s + 1)} = \frac{1}{s + 1} \quad (5.28)$$

$$G_{m22}(s) = \frac{K_{2m}^2}{(T_{m2}s + 1)} = \frac{1}{0.22s + 1} \quad (5.29)$$

şeklinde iki adet birinci mertebeden sisteme ayrılabilir. Böylece 1. mertebeden iki sistemin parametreleri;

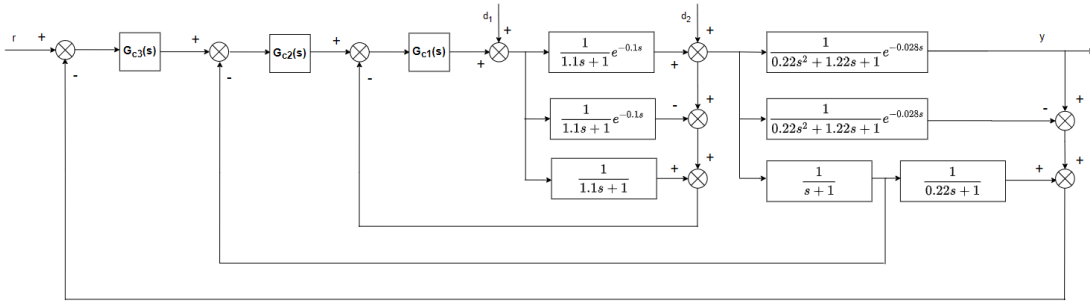
$$K_{2m}^1 = 1 \quad (5.30)$$

$$T_{m1} = 1 \quad (5.31)$$

$$K_{m2}^2 = 1 \quad (5.32)$$

$$T_{m2} = 0.22 \quad (5.33)$$

şeklinde bulunur. İkinci mertebeden sistem istenildiği gibi $G_{m21}(s)$ ve $G_{m22}(s)$ birinci mertebeden transfer fonksiyonlarına ayrılabilir. Bu ayırma işleminin hiçbir şekilde sistemin birim basamak cevabına etkisi olmamaktadır. Kaskad Model 1 için kaskad indirgenmiş MAT kaskad kontrolör yapısına ait blok diyagramı Şekil 5.12’de verilmiştir



Şekil 5.12 : Kaskad Model 1 için MAT kaskad blok diyagramı.

$G_{c1}(s)$ kontrolörünün tasarımı için γ_1 ve γ_2 parametreleri sırasıyla;

$$\gamma_1 = 0.4 \quad (5.34)$$

$$\gamma_2 = 1 \quad (5.35)$$

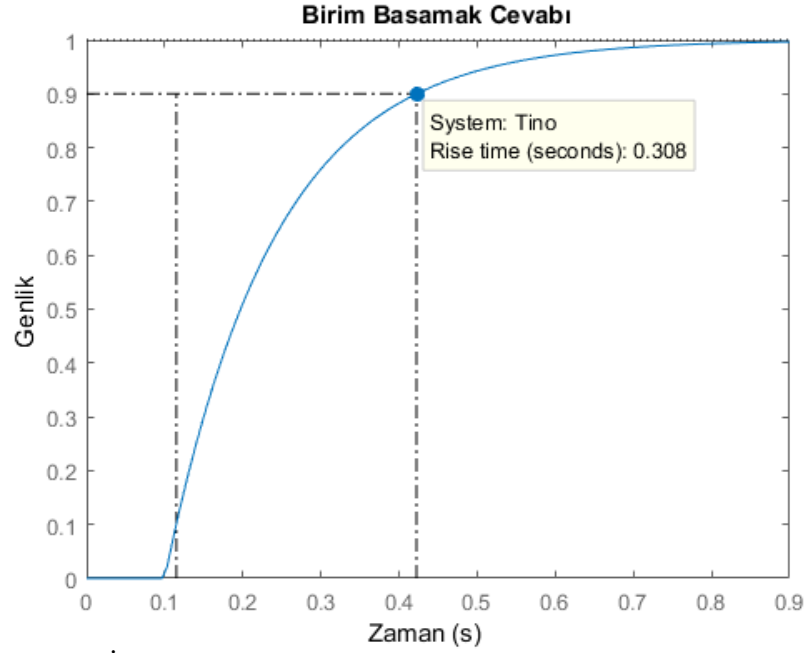
olarak seçilmiştir. Parametrelerin seçiminden sonra $G_{c1}(s)$ PI tipi kontrolörü;

$$G_{c1}(s) = 7.143 \frac{1.1s + 1}{s} = \frac{7.857s + 7.143}{s} \quad (5.36)$$

olarak bulunur. Bu durum iç çevrim kapalı çevrim transfer fonksiyonu $T_{iç}(s)$;

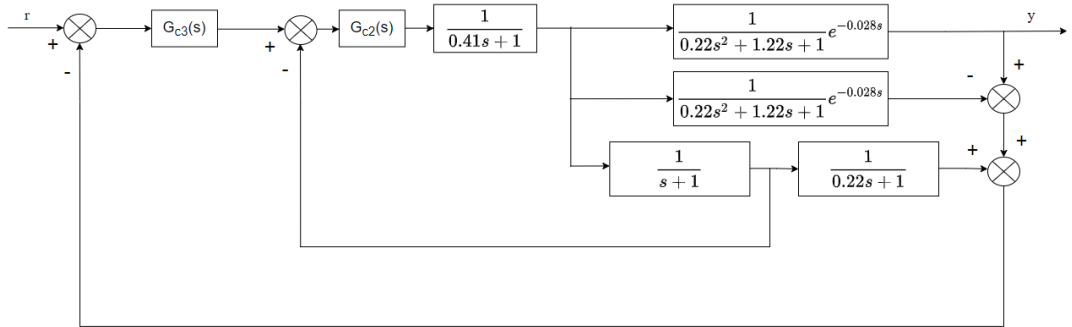
$$T_{iç}(s) = \frac{1}{0.14s + 1} e^{-0.1s} \quad (5.37)$$

şeklini alır. İç çevrime ait kapalı çevrim sistemin birim basamak cevabı Şekil 5.13’de verilmiştir.



Şekil 5.13 : İç çevrime ait kapalı çevrim sistemin birim basamak cevabı.

Şekil 5.13'den görüldüğü üzere kapalı çevrim sistem birim basamak cevabı aşısız ve yükselme zamanı ise 0.308 saniye olmuştur. İç çevrim için kontrolör tasarımı yapıldıktan sonra Şekil 5.12'deki kaskad sistem Şekil 5.14'deki gibi indirgenebilir.

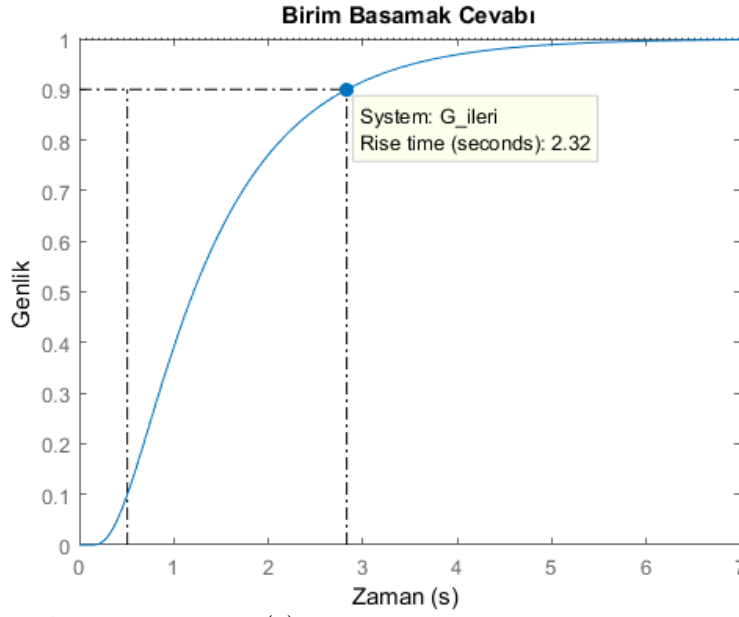


Şekil 5.14 : Dış çevrim için indirgenmiş blok diyagramı.

Şekil 5.14'deki indirgenmiş blok diyagramındaki ileri yoldaki ölü zamansız transfer fonksiyonu;

$$G_{\text{ileri-ölü zamansız}}(s) = \frac{1}{0.0308 s^3 + 0.3908 s^2 + 1.36 s + 1} \quad (5.38)$$

şeklindedir. $G_{\text{ileri}}(s)$ transfer fonksiyonun birim basamak cevabı Şekil 5.15'de verilmiştir.



Şekil 5.15 : $G_{ileri}(s)$ sisteminin birim basamak cevabı.

Şekil 5.15’den görüldüğü üzere sistem cevabı aşım yapmamakta ve sistemin yükselme zamanı 2.32 saniyedir. Tasarlanacak kontrolörle birlikte kapalı çevrim sistem cevabında yükselme zamanını kısaltarak sistem cevabı hızlandırılacak ve dış çevrimdeki sistem için amaçlanan aşısız bir sistem cevabı elde edilecek kontrolör tasarımı yapılacaktır. İlk olarak $G_{m21}(s)$ sistemi için $G_{c2}(s)$ kontrolörü tasarlanacaktır. Tasarlanan kontrolör kutup-sıfır götürmesini yöntemine dayalı olarak yapılmaktadır. $G_{m21}(s)$ için tasarlanacak kontrolör PI tipi kontrolör olacaktır. $G_{c2}(s)$ PI tipi kontrolörü;

$$G_{c2}(s) = K_{c2} \frac{T_{m1}s + 1}{s} = K_{c2} \frac{s + 1}{s} \quad (5.39)$$

şeklinde gösterilebilir. K_{c2} kontrolör kazancı ise denklem (5.40)’deki gibi hesaplanabilir.

$$K_{c2} = \frac{1}{4\zeta^2(\gamma_1 + \gamma_2)L_{m1}K_{2m}} \quad (5.40)$$

Aşısız bir sistem cevabı istenildiği için $\zeta = 1$ olarak seçilir. Parametrelerin seçiminden sonra $G_{c2}(s)$ PI tipi kontrolörü;

$$G_{c2}(s) = 1.786 \frac{s + 1}{s} = \frac{1.786s + 1.786}{s} \quad (5.41)$$

olarak bulunur. $G_{c2}(s)$ kontrolörü tasarlandıktan sonraki adım $G_{m22}(s)$ için $G_{c3}(s)$ kontrolörü tasarlamaktır. Tasarlanan kontrolör kutup-sıfır götürmesini yöntemine dayalı olarak yapılmaktadır. $G_{m22}(s)$ için tasarlanacak kontrolör PI tipi kontrolör

olacaktır. $G_{c3}(s)$ PI tipi kontrolörü;

$$G_{c3}(s) = K_{c3} \frac{T_{m2}s + 1}{s} = K_{c3} \frac{0.22s + 1}{s} \quad (5.42)$$

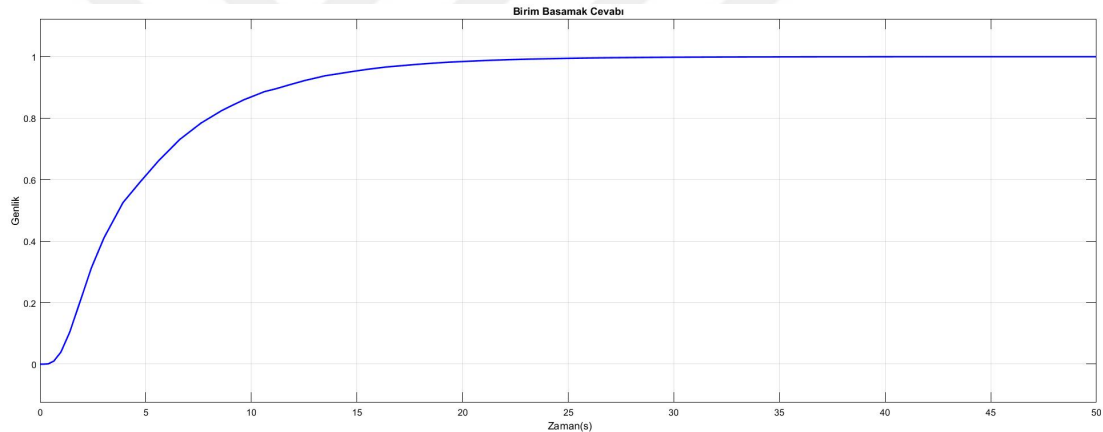
şeklinde gösterilebilir. K_{c3} kontrolör kazancı ise denklem (5.43)'teki gibi hesaplanabilir.

$$K_{c3} = \frac{1}{8\zeta^4 K_{m2}^2 \gamma_3 (\gamma_1 + \gamma_2)} \quad (5.43)$$

Aşırımsız bir sistem cevabı istenildiği için $\zeta = 1$ olarak seçilir. $\gamma_3 \geq 1$ şartına uygun olacak şekilde 1.6 seçilmiştir. Parametrelerin seçiminden sonra $G_{c3}(s)$ PI tipi kontrolörü;

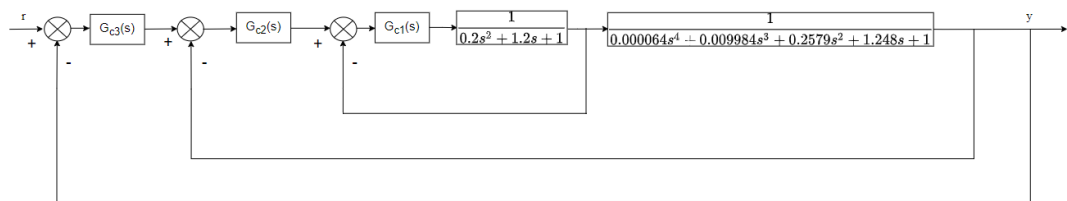
$$G_{c3}(s) = 0.558 \frac{0.22s + 1}{s} = \frac{0.1228s + 0.558}{s} \quad (5.44)$$

olarak bulunur. $G_{c3}(s)$ kontrolörü tasarlandıktan sonra oluşan dış çevrime ait kapalı çevrim sistemin birim basamak cevabı Şekil 5.16'da verilmiştir.



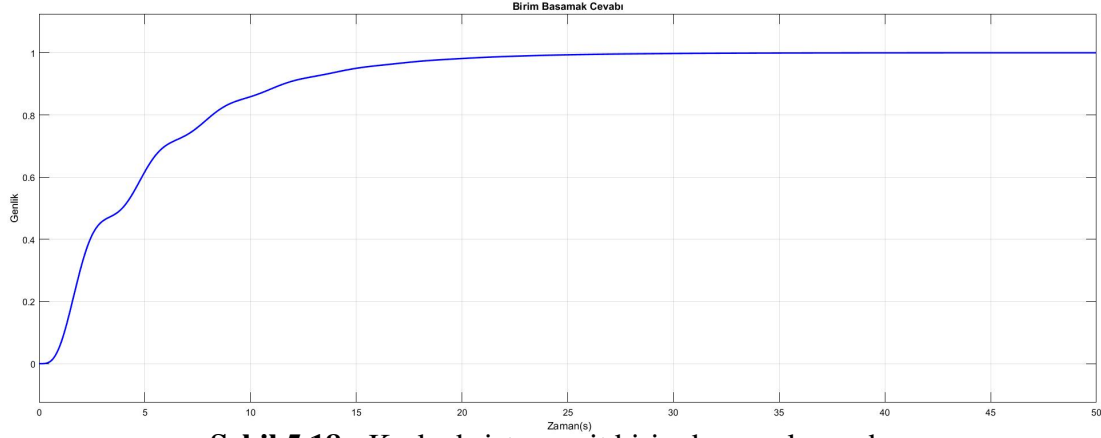
Şekil 5.16 : Dış çevrime ait kapalı çevrim sistemin birim basamak cevabı.

Kapalı çevrim sistem birim basamak cevabı aşırımsız ve yükselme zamanı ise 10.001 saniye olmuştur. Karşılaştırma yapabilmek adına tasarlanan $G_{c1}(s)$, $G_{c2}(s)$ ve $G_{c3}(s)$ kontrolörleriyle birlikte yüksek mertebeden sistemlere Şekil 5.17'deki gibi uygulanmıştır.



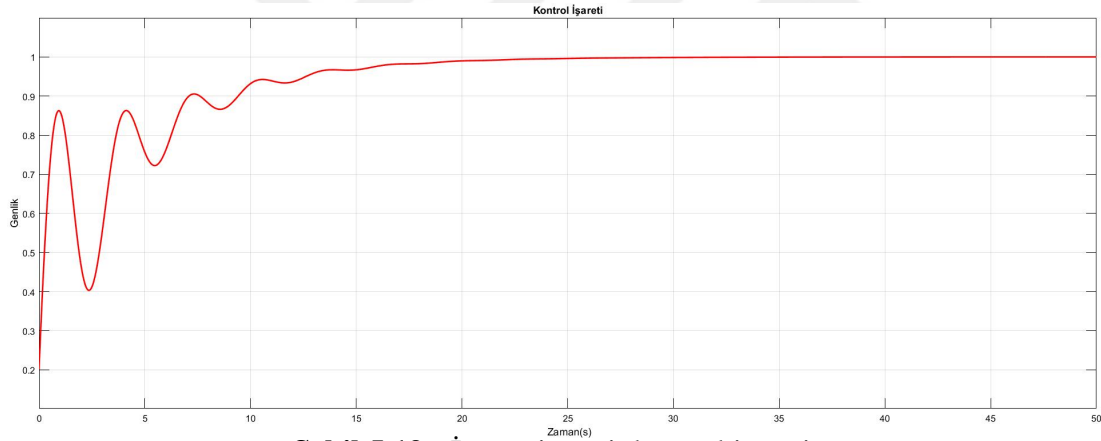
Şekil 5.17 : Kaskad Model 1 için oluşturulan ikinci kaskad kontrol yapısı.

Şekil 5.17'deki blok diyagramında gösterilen kaskad sisteme ait birim basamak cevabı Şekil 5.18'de verilmiştir.



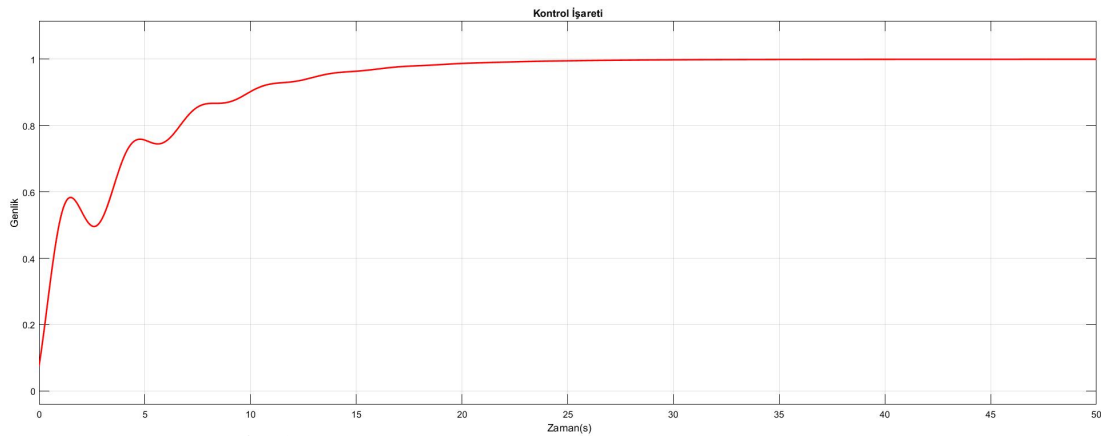
Şekil 5.18 : Kaskad sisteme ait birim basamak cevabı.

Şekil 5.18’den görüldüğü üzere sistem aşım yapmamıştır. Sistemin yükselme zamanı ise 10.3864 saniyedir. Bu değer, kapalı çevrim ölü zamanlı sistem sistemin yükselme zamanında daha yüksek çıkmıştır. İç çevrime ait kontrol işareti Şekil 5.19’da verilmiştir.



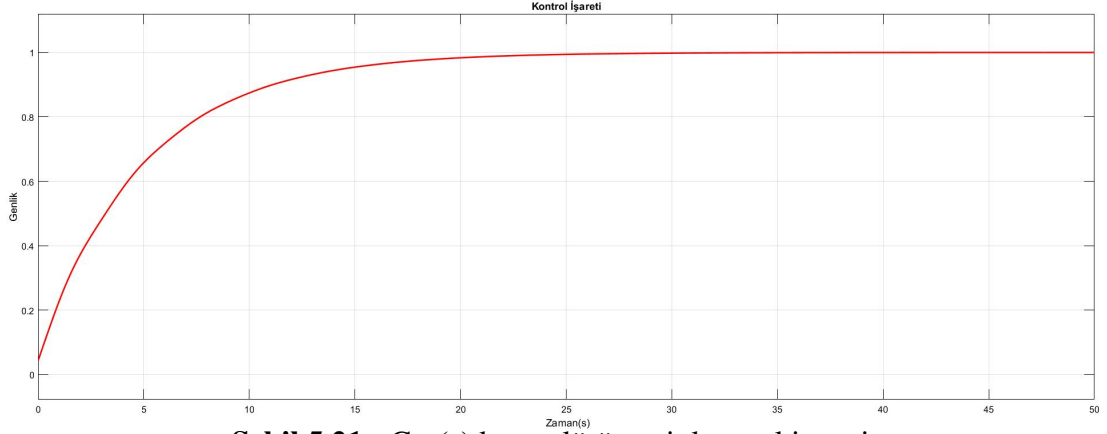
Şekil 5.19 : İç çevrime ait kontrol işareti.

$G_{c2}(s)$ kontrolörüne ait kontrol işareti Şekil 5.20’de verilmiştir.



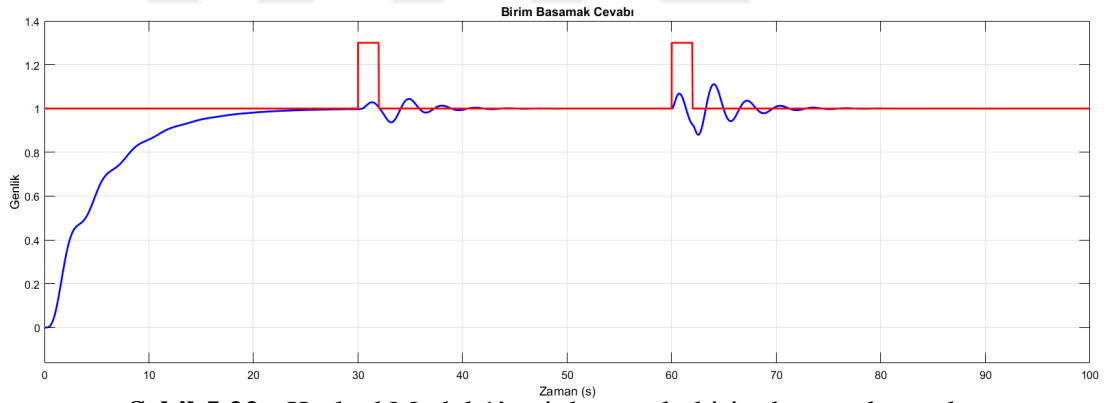
Şekil 5.20 : $G_{c2}(s)$ kontrolörüne ait kontrol işareti.

$G_{c3}(s)$ kontrolörüne ait kontrol işareti Şekil 5.21’de verilmiştir.



Şekil 5.21 : $G_{c3}(s)$ kontrolörüne ait kontrol işareti.

Şekil 5.12’de gösterilen d_1 ve d_2 bozucuları sırasıyla 30. ve 60. saniyede verilmiştir. Bozucuların genlikleri 0.3 olup, 2 saniye boyunca sisteme verilmişlerdir. Kaskad Model 1 için d_1 ve d_2 bozucuları etkisinde birim basamak cevabı Şekil 5.22’de verilmiştir.



Şekil 5.22 : Kaskad Model 1’e ait bozuculu birim basamak cevabı.

Şekil 5.22’den görüldüğü üzere sistem d_1 ve d_2 bozucularını bastırmıştır. Sistem d_1 bozucusunu 5.51 saniyede bastırırken, d_2 bozucusunu 8.97 saniyede bastırmıştır. d_1 ve d_2 bozucusuna ait ITSE hata değerleri sırasıyla;

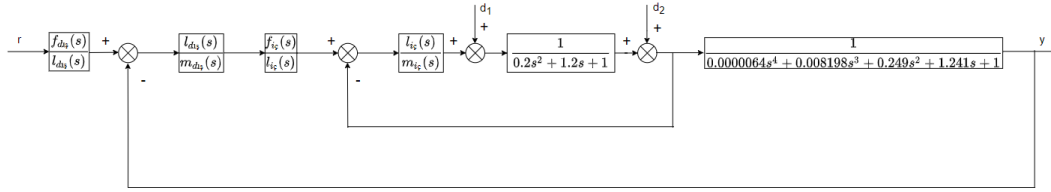
$$ITSE_{d_1} = 0.2157$$

$$ITSE_{d_2} = 1.85$$

şeklindedir.

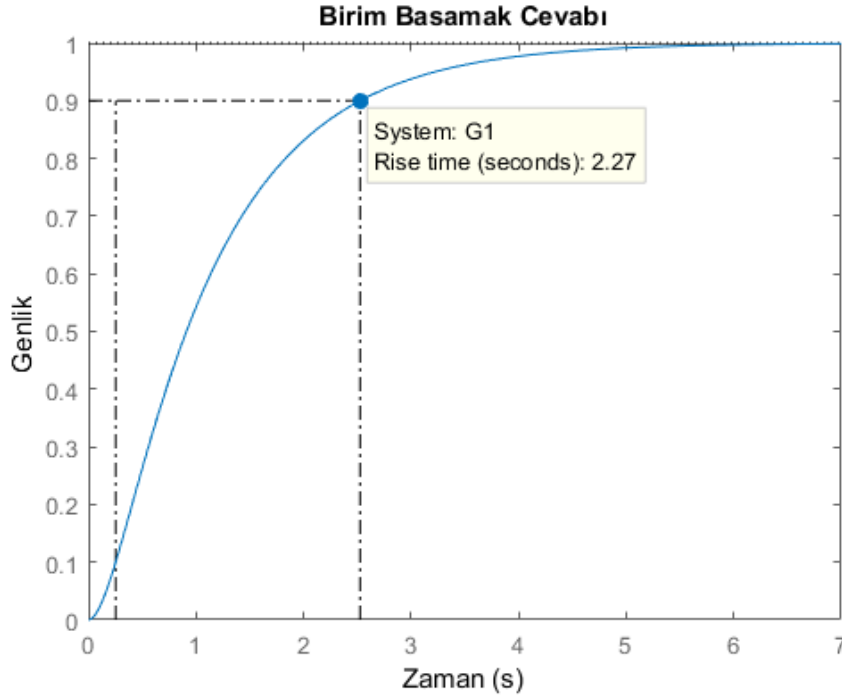
5.1.2 Kaskad model 1 için karakteristik oran atama yöntemiyle kaskad kontrolör tasarımı

Kaskad Model 1 için kaskad indirgenmiş Rİİ kontrolör yapısına ait blok diyagramı Şekil 5.23’de verilmiştir.



Şekil 5.23 : Kaskad Model 1 için kaskad indirgenmiş Rİİ kontrolör yapısına ait blok diyagramı.

$G_{iç}(s)$ transfer fonksiyonunun açık çevrim birim basamak cevabı Şekil 5.24’de verilmiştir.



Şekil 5.24 : $G_{iç}(s)$ sisteminin birim basamak cevabı.

Şekil 5.24’den görüldüğü üzere sistem cevabı aşım yapmamakta ve sistemin yükselme zamanı 2.27 saniyedir. Tasarlanacak kontrolörle birlikte kapalı çevrim sistem cevabında yükselme zamanını kısaltarak sistem cevabı hızlandırılacak ve aşısız bir sistem cevabı elde edilecek kontrolör tasarımı yapılacaktır. Sistem 2. mertebeden bir sistem olduğu için tasarlanacak kontrolör 1. mertebeden olacaktır. Böylece kapalı

çevrim karakteristik polinomun mertebesi 3 olacaktır. Bu duruma göre kapalı çevrim karakteristik polinomu,

$$m_{iç}(s) = (m_1s + m_0) \quad (5.45)$$

$$d_{iç}(s) = (0.2s^2 + 1.2s + 1) \quad (5.46)$$

$$l_{iç}(s) = (l_1s + l_0) \quad (5.47)$$

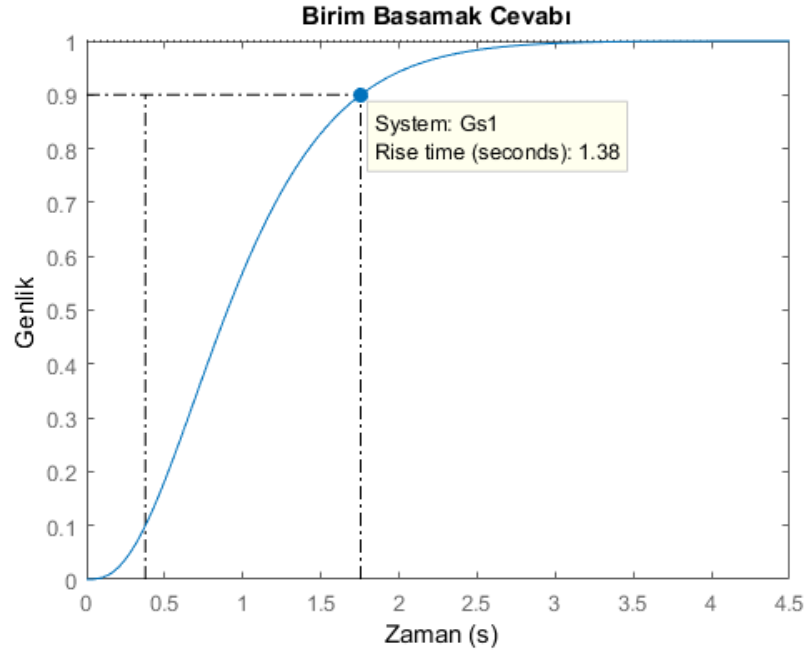
$$n_{iç}(s) = (1) \quad (5.48)$$

olmak üzere

$$p_{iç}(s) = m_{iç}(s) d_{iç}(s) + l_{iç}(s) n_{iç}(s) \quad (5.49)$$

şeklinde ifade edilebilir.

$\tau=1$ ve aşısız bir sistem cevap için $\alpha_1 = 2.9$ seçildiği durumda, kapalı çevrim sistemin birim basamak cevabı Şekil 5.25’de verilmiştir.



Şekil 5.25 : $\tau=1$ ve $\alpha_1 = 2.9$ durumunda kapalı çevrim birim basamak cevabı.

Şekil 5.25’den görüldüğü üzere kapalı çevrim sistem birim basamak cevabı aşısız ve yükselme zamanı ise 1.38 saniye olmuştur. İç çevrim için tasarlanan kontrolör sonucunda oluşan kapalı çevrim transfer fonksiyonu;

$$G_{cl-iç}(s) = \frac{1}{0.041 s^3 + 0.3448 s^2 + s + 1} \quad (5.50)$$

olarak bulunur. Kapalı çevrim transfer karakteristik polinomu ise;

$$p_{iç}(s) = 0.041 s^3 + 0.3448 s^2 + s + 1 \quad (5.51)$$

şeklinde. Bu kapalı çevrimi sağlayacak $m_{iç}(s)$ ve $l_{iç}(s)$ polinomları ise;

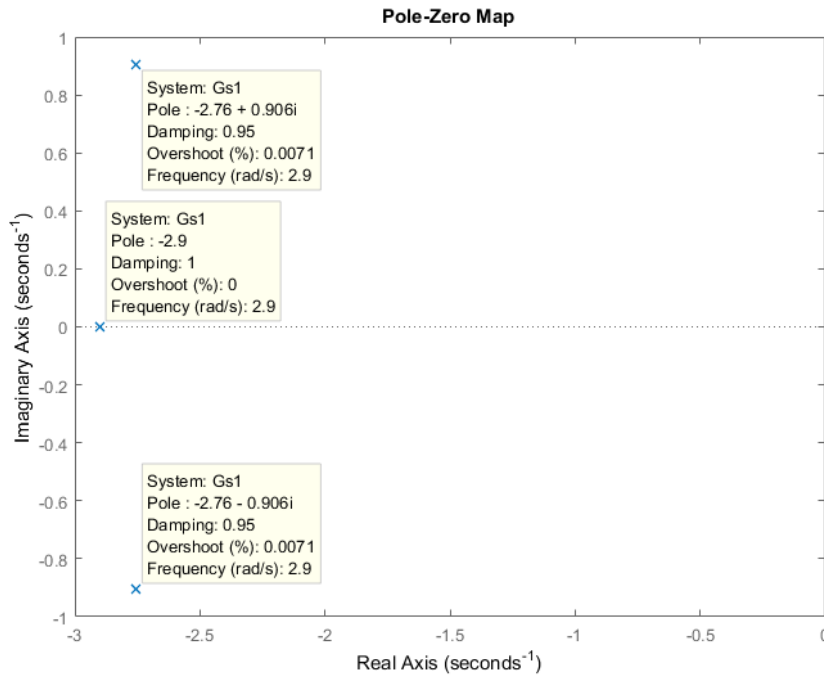
$$m_{iç}(s) = 0.205 s + 0.4941 \quad (5.52)$$

$$l_{iç}(s) = 0.2021 s + 0.5059 \quad (5.53)$$

olarak bulunur. Kapalı çevrim birim basamak değerinin son değeri 1'e yerleştiği için

$$f_{iç}(s) = 1 \quad (5.54)$$

şeklinde bulunur. İç çevrime ait kapalı çevrim transfer fonksiyonunun kutup-sıfır dağılımı Şekil 5.26'da verilmiştir.



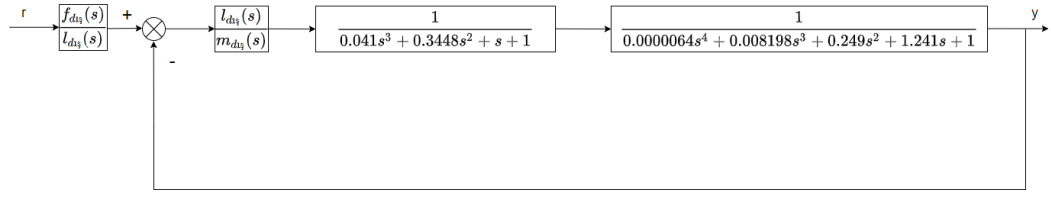
Şekil 5.26 : $G_{cl-iç}(s)$ sisteminin kutup-sıfır dağılımı.

$G_{cl-iç}(s)$ sisteminin kutupları;

$$s_{1,2} = -2.7550 \pm j0.9055 \quad (5.55)$$

$$s_3 = -2.9000 \quad (5.56)$$

şeklinde olup, $s_{1,2}$ kutuplarında imajiner kısım bulunmaktadır. Bu $s_{1,2}$ kutuplarının amortisman oranları $0.95(\sim 1)$ $\zeta=1$ kritik sönüm oranına çok yakın olmasından dolayı sistem cevabında aşım gözlenmemiştir. İç çevrim için kontrolör tasarımı yapıldıktan sonra Şekil 5.23'deki kaskad sistem Şekil 5.27'deki gibi indirgenebilir.

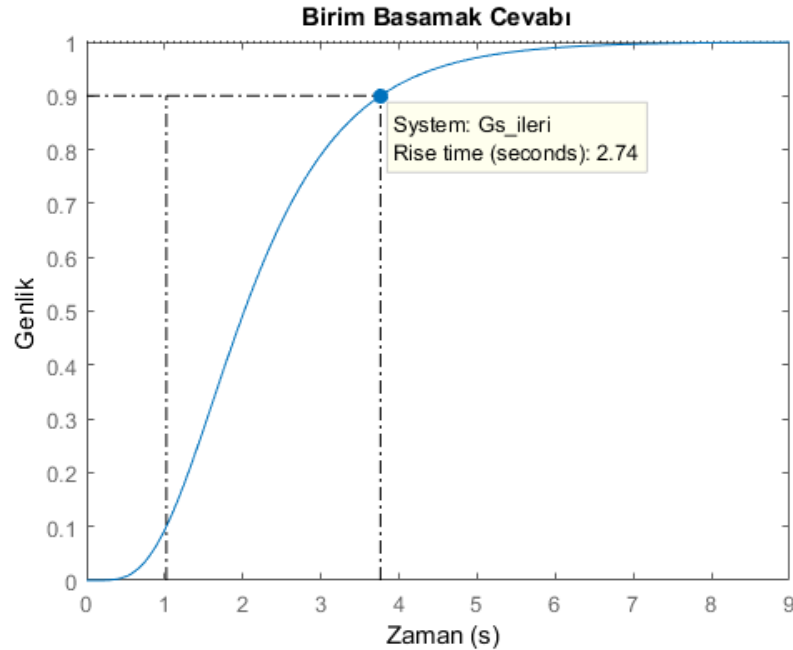


Şekil 5.27 : İndirgenmiş kaskad blok diyagramı.

Şekil 5.27’deki indirgenmiş blok diyagramındaki ileri yoldaki transfer fonksiyonu;

$$G_{ileri}(s) = \frac{1}{2.624 \cdot 10^{-6} s^7 + 0.0004314 s^6 + 0.01408 s^5 + 0.1502 s^4 + 0.7393 s^3 + 1.851 s^2 + 2.248 s + 1} \quad (5.57)$$

şeklindedir. $G_{ileri}(s)$ transfer fonksiyonunda 7. mertebenin katsayısı çok küçük olduğu için ihmal edilerek sistem 6. mertebeden sisteme indirgenebilir. 6. mertebeden $G_{ileri}(s)$ transfer fonksiyonun birim basamak cevabı Şekil 5.28’de verilmiştir.



Şekil 5.28 : $G_{ileri}(s)$ sisteminin birim basamak cevabı.

Şekil 5.28’den görüldüğü üzere sistem cevabı aşım yapmamakta ve sistemin yükselme zamanı 2.74 saniyedir. Tasarlanacak kontrolörle birlikte kapalı çevrim sistem cevabında yükselme zamanını kısaltarak sistem cevabı hızlandırılacak ve dış çevrimdeki sistem için amaçlanan aşısız bir sistem cevabı elde edilecek kontrolör tasarımı yapılacaktır. İleri yoldaki sistem 6. mertebeden bir sistem olduğu için tasarlanacak kontrolör 5. mertebeden olacaktır. Böylece dış çevrim ait kapalı çevrim

karakteristik polinomun mertebesi 11 olacaktır. $G_{cl-dış}(s)$ transfer fonksiyonunda 11. ve 10. mertebenin katsayıları ihmal edilerek sistem 9. mertebeden sisteme indirgenecektir. Bu duruma göre kapalı çevrim karakteristik polinomu,

$$m_{dış}(s) = (m_3 s^3 + m_2 s^2 + m_1 s + m_0) \quad (5.58)$$

$$d_{dış}(s) = (0.0004314 s^6 + 0.01408 s^5 + 0.1502 s^4 + 0.7393 s^3 + 1.851 s^2 + 2.248 s + 1) \quad (5.59)$$

$$l_{iç}(s) = (l_3 s^3 + l_2 s^2 + l_1 s + l_0) \quad (5.60)$$

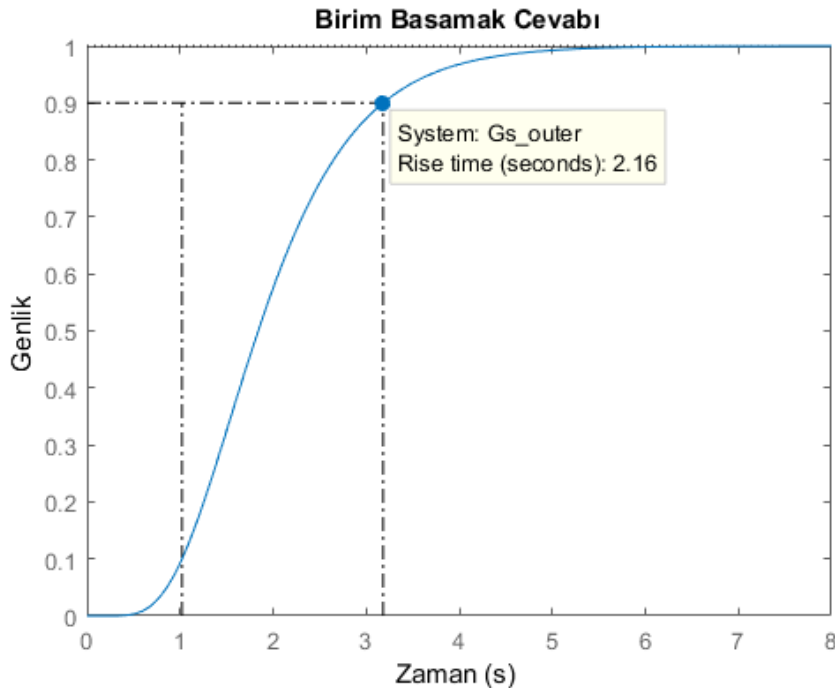
$$n_{dış}(s) = (1) \quad (5.61)$$

olmak üzere

$$p_{dış}(s) = m_{dış}(s) d_{dış}(s) + l_{iç}(s) n_{dış}(s) \quad (5.62)$$

şeklinde ifade edilebilir.

$\tau=5$ ve aşısız bir sistem cevap için $\alpha_1 = 2.5$ seçildiği durumda, kapalı çevrim sistemin birim basamak cevabı Şekil 5.29'da verilmiştir.



Şekil 5.29 : $\tau=5$ ve $\alpha_1 = 2.5$ durumunda kapalı çevrim birim basamak cevabı.

Şekil 5.29'dan görüldüğü üzere kapalı çevrim sistem birim basamak cevabı aşısız ve yükselme zamanı ise 2.16 saniye olmuştur. Dış çevrim için tasarlanan kontrolör sonucunda oluşan kapalı çevrim transfer fonksiyonu;

$$G_{cl-dış}(s) = \frac{1}{0.0003747 s^9 + 0.00725 s^8 + 0.08174 s^7 + 0.5629 s^6 + 2.414 s^5 + 6.448 s^4 + 10.52 s^3 + 10 s^2 + 5 s + 1} \quad (5.63)$$

olarak bulunur. Kapalı çevrim transfer karakteristik polinomu ise;

$$p_{dış}(s) = 0.0003747 s^9 + 0.00725 s^8 + 0.08174 s^7 + 0.5629 s^6 + 2.414 s^5 + 6.448 s^4 + 10.52 s^3 + 10 s^2 + 5 s + 1 \quad (5.64)$$

şeklindedir. Bu kapalı çevrimi sağlayacak $m_{dış}(s)$ ve $l_{dış}(s)$ polinomları ise;

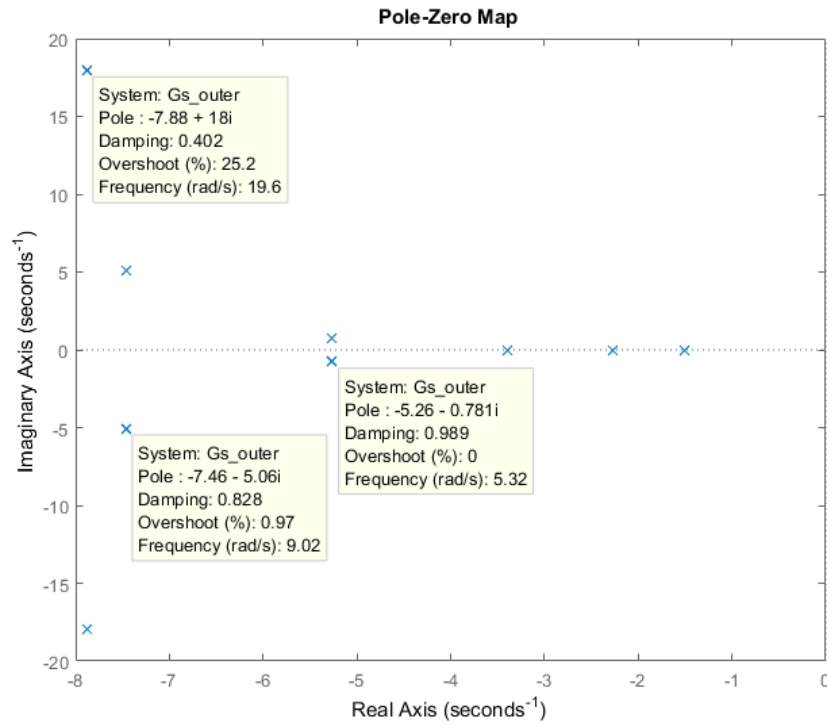
$$m_{dış}(s) = 0.0002277 s^3 + 0.005764 s^2 + 0.06939 s + 0.683 \quad (5.65)$$

$$l_{dış}(s) = 0.02665 s^3 + 0.1741 s^2 + 0.3953 s + 0.317 \quad (5.66)$$

olarak bulunur. Kapalı çevrim birim basamak değerinin son değeri 1'e yerleştiği için

$$f_{dış}(s) = 1 \quad (5.67)$$

şeklinde bulunur. Dış çevrime ait kapalı çevrim transfer fonksiyonunun kutup-sıfır dağılımı Şekil 5.30'da verilmiştir.



Şekil 5.30 : $G_{cl-dış}(s)$ sisteminin kutup-sıfır dağılımı.

$G_{cl-dış}(s)$ sisteminin kutupları;

$$s_1 = -1.49929 \quad (5.68)$$

$$s_2 = -2.26568 \quad (5.69)$$

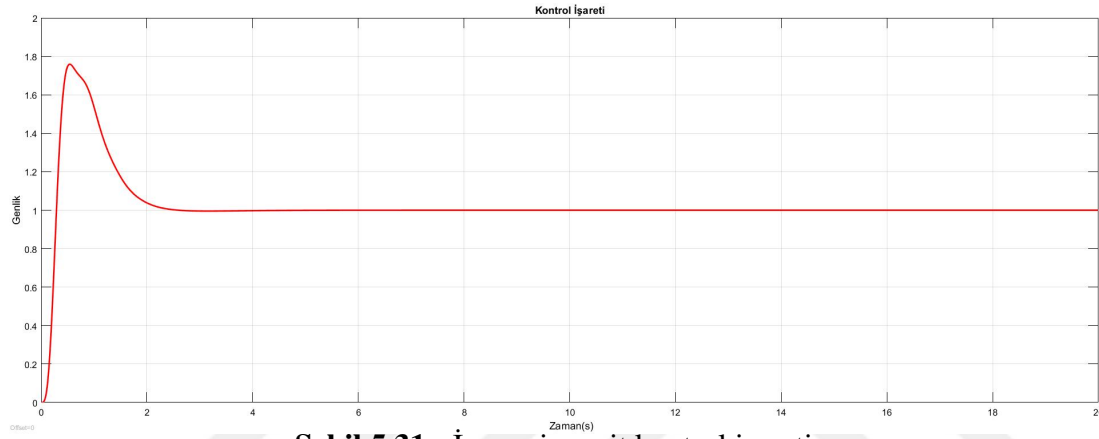
$$s_3 = -3.38853 \quad (5.70)$$

$$s_{4,5} = - 5.2617 \pm j 0.780574 \quad (5.71)$$

$$s_{6,7} = - 7.46408 \pm j 5.05856 \quad (5.72)$$

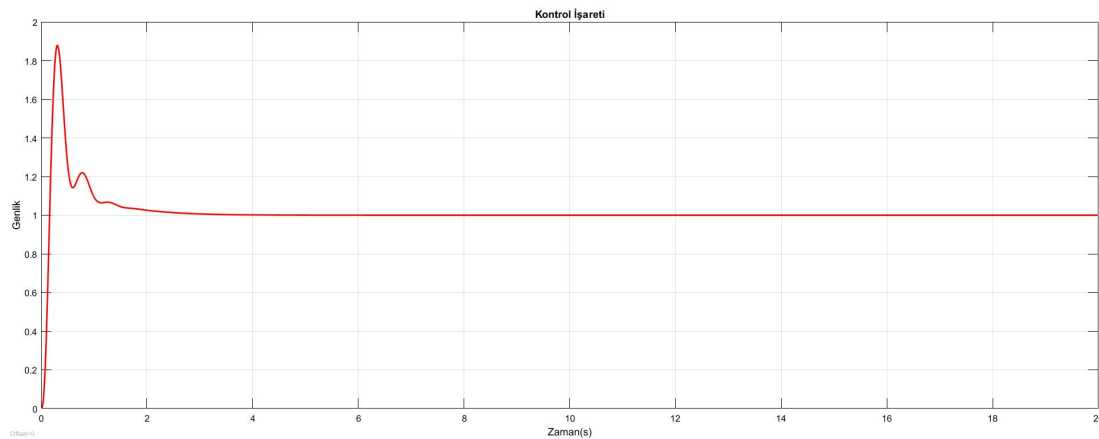
$$s_{8,9} = - 7.88155 \pm j 17.9543 \quad (5.73)$$

şeklindedir. $s_{4,5}$, $s_{6,7}$ ve $s_{8,9}$ kutuplarında sanal kısım bulunmaktadır. $s_{4,5}$ kutupların sönüm oranları 0.989(~ 1) $\zeta=1$ kritik sönüm oranına çok yakın olması ve diğer kutupların baskın bölgede olmamasından dolayı sistem cevabında aşım gözlenmemiştir. İç çevrime ait kontrol işareti Şekil 5.31’de verilmiştir.



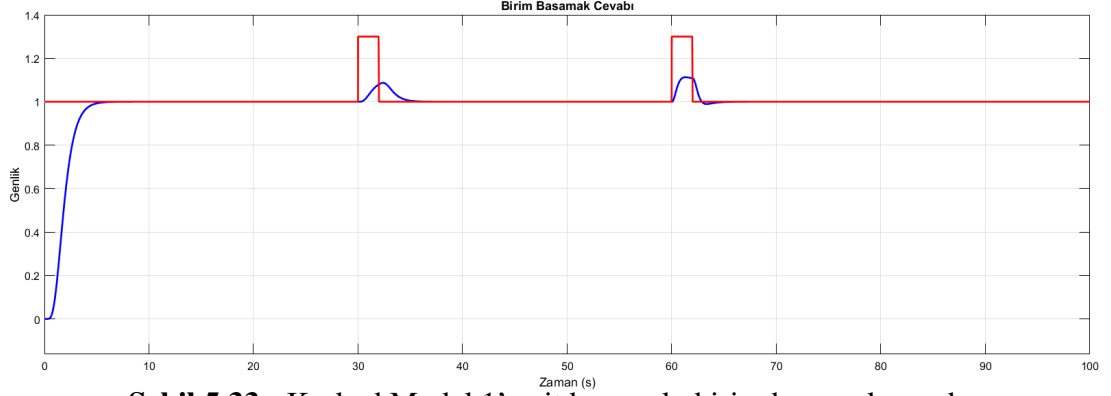
Şekil 5.31 : İç çevrime ait kontrol işareti.

Dış çevrime ait kontrol işareti Şekil 5.32’de verilmiştir.



Şekil 5.32 : Dış çevrime ait kontrol işareti.

Şekil 5.23’de gösterilen d_1 ve d_2 bozucuları sırasıyla 30. ve 60. saniyede verilmiştir. Bozucuların genlikleri 0.3 olup, 2 saniye boyunca sisteme verilmişlerdir. Kaskad Model 1’in d_1 ve d_2 bozucuları etkisinde birim basamak cevabı Şekil 5.33’de verilmiştir.



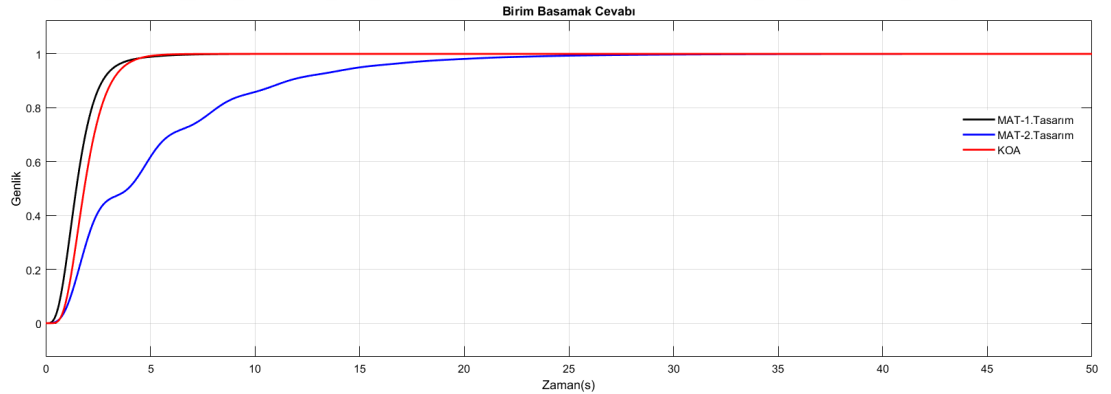
Şekil 5.33 : Kaskad Model 1'e ait bozuculu birim basamak cevabı.

Şekil 5.33'den görüldüğü üzere sistem d_1 ve d_2 bozucusunu bastırmıştır. Sistem d_1 bozucusunu 4 saniyede bastırırken, d_2 bozucusunu 2.65 saniyede bastırmıştır. d_1 ve d_2 bozucusuna ait ITSE hata değerleri sırasıyla;

$$ITSE_{d_1} = 0.3397$$

$$ITSE_{d_2} = 1.285$$

şeklinde. Kaskad Model 1 için tasarlanan kontrolör elde edilen kapalı çevrim basamakları Şekil 5.34'de toplu olarak verilmiştir.



Şekil 5.34 : Kaskad Model 1'e ait birim basamak cevapları.

Sistemin referans takip başarımı için ITSE kriteri kullanılmıştır. Tasarlanan kontrolörlere ait ITSE hata değerleri sırasıyla;

$$ITSE_{MAT-1.Tasarım} = 0.8165$$

$$ITSE_{MAT-2.Tasarım} = 6.834$$

$$ITSE_{KOA} = 1.311$$

şeklinde. Hata değerlerinden görüldüğü üzere en az hata değeri MAT dış çevrimdeki sistemin birinci mertebeden ölü zamanlı sistem olması durumunda

tasarlanan kontrolörle elde edilmiştir. Tasarlanan 3 kontrolör için sistemin zaman bölgesi karakteristiklerinin karşılaştırılması Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2 : Kaskad Model 1 için zaman bölgesi karakteristiklerinin karşılaştırılması

	MAT-1.Tasarım	MAT-2.Tasarım	KOA
Yükselme Zamanı (s)	2.0042	10.3864	2.1613
Aşım (%)	0	0	0
Yerleşme Zamanı (s)	4.1956	19.6314	4.3336

Çizelge 5.2’den görüldüğü üzere sistemlerin hiçbirisi aşım yapmamış, en düşük yükselme zamanı ve yerleşme zamanı MAT 1. kontrolör tasarımı elde edilmiştir. Tasarlanan 3 kontrolör de 1. kaskad sisteme verilen d_1 ve d_2 bozucularını bastırmıştır. Kaskad Model 1 için bozucu bastırma süreleri ve ITSE hata değerleri Çizelge 5.3’de verilmiştir.

Çizelge 5.3 : Kaskad Model 1 için bozucu bastırma başarımları

	MAT-1.Tasarım		MAT-2.Tasarım		KOA	
Kriterler	Bastırma Süresi (s)	ITSE	Bastırma Süresi (s)	ITSE	Bastırma Süresi (s)	ITSE
d_1 bozucusu	4.72	0.1497	5.51	0.2157	4	0.3997
d_2 bozucusu	6.77	0.806	8.97	1.85	2.65	1.285

Çizelge 5.3’e bakıldığında zaman en az ITSE değerleri MAT 1. kontrolör tasarımı elde edilirken, d_1 ve d_2 bozucuları ise en hızlı KOA yöntemiyle tasarlanan kontrolörle bastırılmıştır.

5.2 “Kaskad Model 2” için Kaskad Kontrolör Tasarımı

5.2.1 Model ayrıştırma temelli kaskad kontrolör tasarımı

5.2.1.1 İç ve dış çevrimde ölü zamanlı birinci mertebeden modellerin kullanılması

Kaskad Model 2’de bulunan iç ve dış çevrimdeki sistemlerin transfer fonksiyonları sırasıyla;

$$G_{iç}(s) = \frac{1}{(s+1)(0.2s+1)} = \frac{1}{0.2s^2 + 1.2s + 1} \quad (5.74)$$

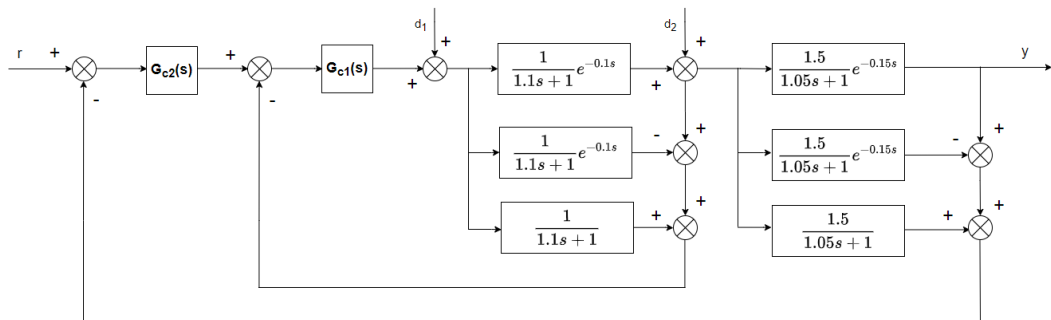
$$G_{dış}(s) = \frac{30s + 2}{0.2s^4 + 4.21s^3 + 24.21s^2 + 21.2s + 1} \quad (5.75)$$

şeklinde dir. Yüksek mertebeden iç ve dış çevrimdeki sistemlerin birinci mertebeden ölü zamanlı modelleri sırasıyla,

$$G_{i\zeta-\delta l\ddot{u}}(s) = \frac{1}{1.1s+1}e^{-0.1s} \quad (5.76)$$

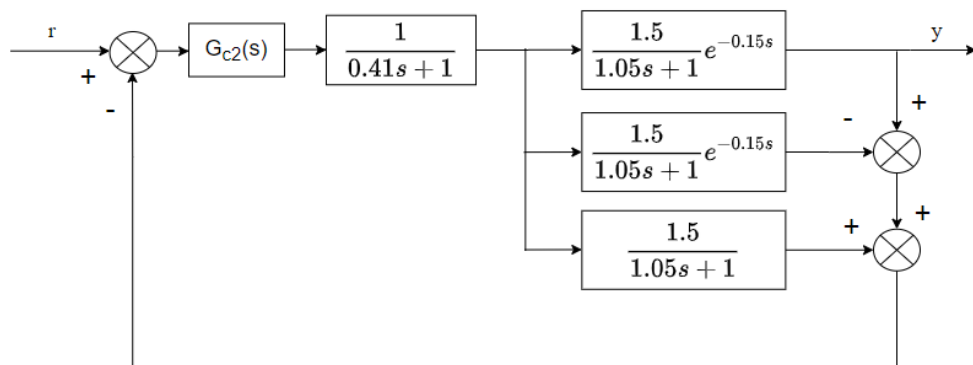
$$G_{d_{I\mathfrak{S}}-\text{ölü}}(s) = \frac{1.5}{1.05s + 1} e^{-0.15s} \quad (5.77)$$

şeklinde [39]. MAT kaskad kontrol yapısına ait blok diyagram Şekil 5.35’de verilmiştir.



Şekil 5.35 : Kaskad Model 2 için MAT kaskad kontrol blok diyagramı.

Kaskad Model 1'in iç çevrimi ile Kaskad Model 2'nin iç çevrimi aynı olduğu için iç çevrim için kontrolör tasarımına ait adımlar tekrarlanmamıştır. İç çevrim için kontrolör tasarımı yapıldıktan sonra Şekil 5.35'deki kaskad sistem Şekil 5.36'daki gibi indirgenebilir.

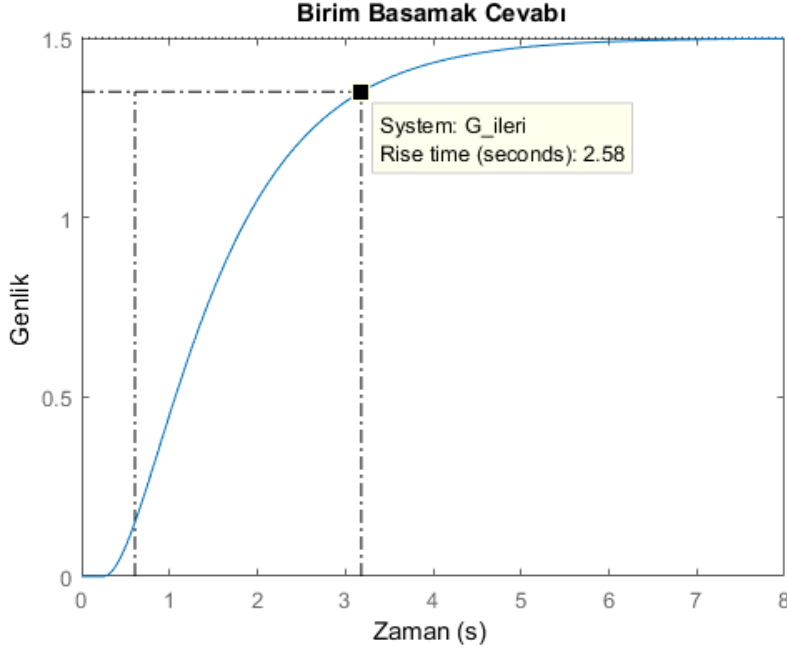


Şekil 5.36 : Dış çevrim için indirgenmiş blok diyagramı.

Şekil 5.36'daki indirgenmiş blok diyagramındaki ileri yoldaki ölü zamansız transfer fonksiyonu;

$$G_{\text{ileri-ölü zamansız}}(s) = \frac{1.5}{0.4305 s^2 + 1.46s + 1} \quad (5.78)$$

şeklindedir. $G_{ileri}(s)$ transfer fonksiyonunun birim basamak cevabı Şekil 5.37’de verilmiştir.



Şekil 5.37 : $G_{ileri}(s)$ sisteminin birim basamak cevabı.

Şekil 5.37’den görüldüğü üzere sistem cevabı aşım yapmamakta ve sistemin yükselme zamanı 2.58 saniyedir. Tasarlanacak kontrolörle birlikte kapalı çevrim sistem cevabında yükselme zamanını kısaltarak sistem cevabı hızlandırılacak ve dış çevrimdeki sistem için amaçlanan aşısız bir sistem cevabı elde edilecek kontrolör tasarımı yapılacaktır. Dış çevrim için denklem (4.19)’daki genel birinci mertebeden transfer ölü zamanlı transfer fonksiyonu ile $G_{dış-ölü}(s)$ ’i birbirine eşitlersek;

$$G_{dış-ölü}(s) = \frac{1.5}{1.05s + 1} e^{-0.15s} = \frac{K_{2m}}{T_{2m}s + 1} e^{-L_{2m}s} \quad (5.79)$$

K_{2m} , T_{2m} ve L_{2m} sırasıyla;

$$K_{2m} = 1.5 \quad (5.80)$$

$$T_{2m} = 1.05 \quad (5.81)$$

$$L_{2m} = 0.15 \quad (5.82)$$

olarak bulunur. Tasarlanan kontrolör kutup-sıfır götürmesini yöntemine dayalı olarak yapılmaktadır. İç çevrim için tasarlanacak kontrolör PI tipi kontrolör olacaktır. $G_{c2}(s)$ PI tipi kontrolörü;

$$G_{c2}(s) = K_{c2} \frac{T_{2m}s + 1}{s} = K_{c2} \frac{1.05s + 1}{s} \quad (5.83)$$

şeklinde gösterilebilir. K_{c2} kontrolör kazancı ise denklem (5.84)'teki gibi hesaplanabilir.

$$K_{c2} = \frac{1}{4\zeta^2(\gamma_1 + \gamma_2)L_{m1}K_{2m}} \quad (5.84)$$

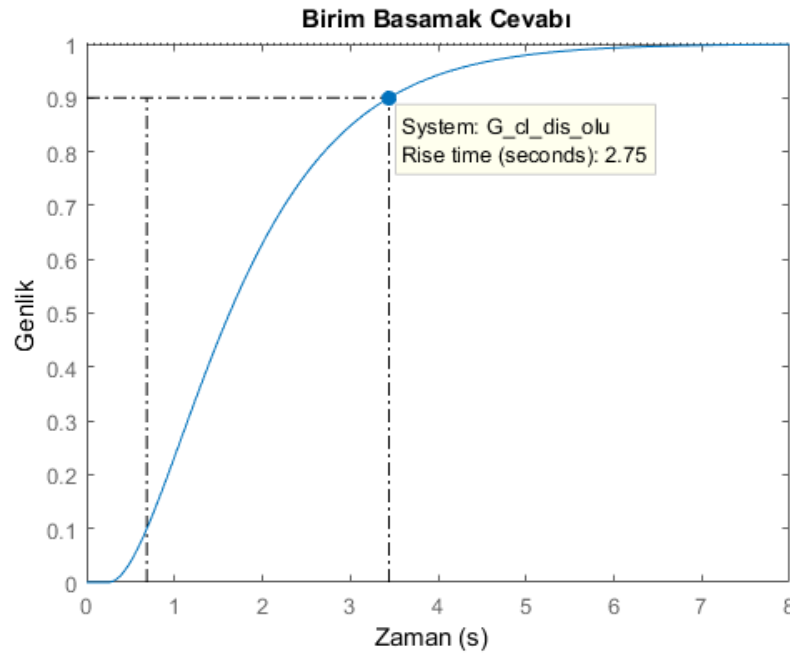
Aşırımsız bir sistem cevabı istenildiği için $\zeta = 1$ olarak seçilir. Parametrelerin seçiminden sonra $G_{c2}(s)$ PI tipi kontrolörü;

$$G_{c2}(s) = 0.4065 \frac{1.05s + 1}{s} = \frac{0.4268s + 0.4065}{s} \quad (5.85)$$

olarak bulunur. Bu durum dış çevrime ait ölü zamanlı kapalı çevrim transfer fonksiyonu;

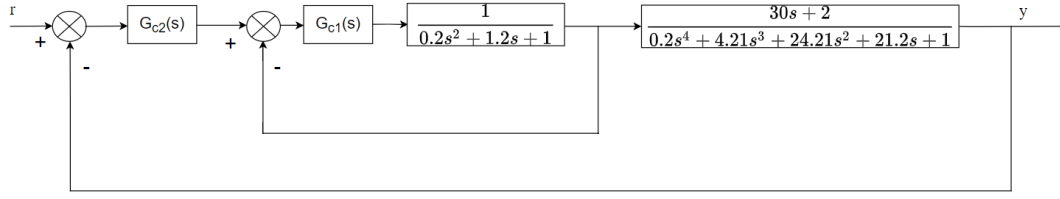
$$G_{cl-dış-ölü}(s) = \frac{0.6402s + 0.6098}{0.4305s^3 + 1.46s^2 + 1.64s + 0.6098} e^{-0.25s} \quad (5.86)$$

şeklini alır. Dış çevrime ait kapalı çevrim sistemin birim basamak cevabı Şekil 5.38'de verilmiştir.



Şekil 5.38 : Dış çevrime ait kapalı çevrim sistemin birim basamak cevabı.

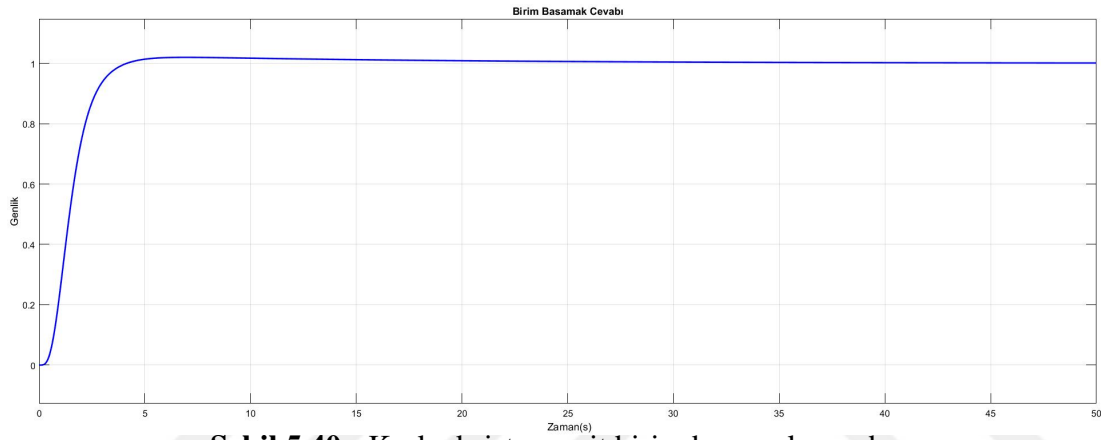
Şekil 5.38'den görüldüğü üzere kapalı çevrim sistem birim basamak cevabı aşırımsız ve yükselme zamanı ise 2.75 saniye olmuştur. Karşılaştırma yapabilmek adına tasarlanan $G_{c1}(s)$ ve $G_{c2}(s)$ kontrolörleriyle birlikte yüksek mertebeden sistemlerle oluşturulan yapı Şekil 5.39'da verilmiştir.



Şekil 5.39 : Kaskad Model 2 için oluşturulan kaskad kontrol yapısı.

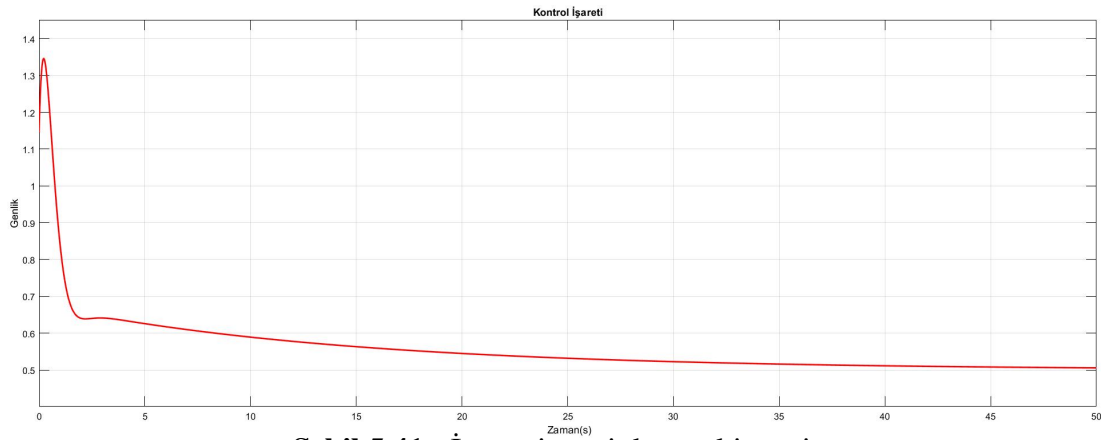
Şekil 5.39'daki blok diyagramında gösterilen kaskad sisteme ait birim basamak cevabı

Şekil 5.40'da verilmiştir.



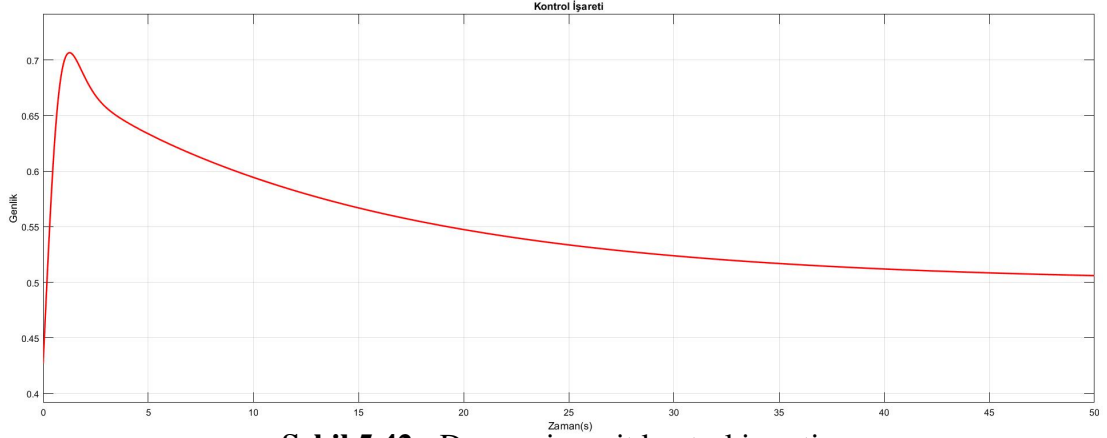
Şekil 5.40 : Kaskad sisteme ait birim basamak cevabı.

Şekil 5.40'dan görüldüğü üzere sistem aşım (%2'lik bandın içinde kalmıştır) yapmamıştır. Sistemin yükselme zamanı ise 1.8766 saniyedir. Bu değer, kapalı çevrim ölü zamanlı sistem sistemin yükselme zamanında daha düşük çıkmıştır. İç çevrime ait kontrol işareti Şekil 5.41'de verilmiştir.



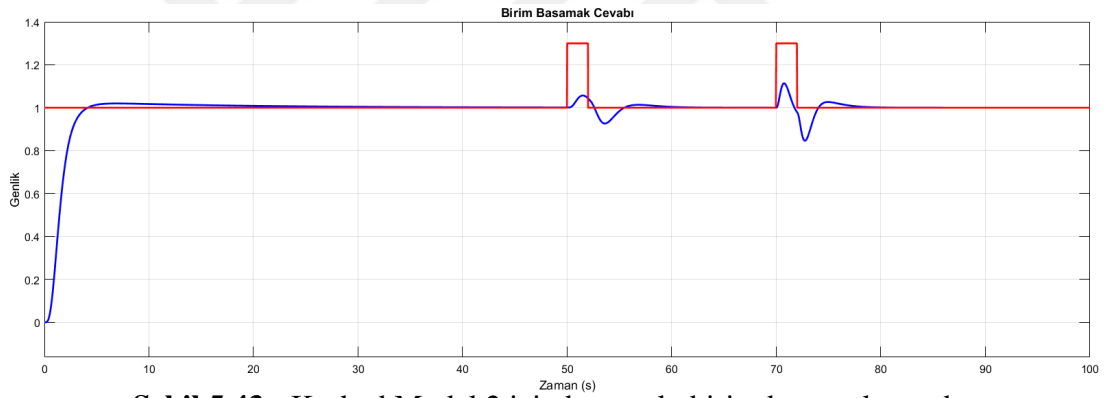
Şekil 5.41 : İç çevrime ait kontrol işareti.

Dış çevrime ait kontrol işareti Şekil 5.42'de verilmiştir.



Şekil 5.42 : Dış çevrime ait kontrol işareti.

Şekil 5.35’de gösterilen d_1 ve d_2 bozucuları sırasıyla 50. ve 70. saniyede verilmiştir. Bozucuların genlikleri 0.3 olup, 2 saniye boyunca sisteme verilmişlerdir. Kaskad Model 2 için d_1 ve d_2 bozucuları etkisinde birim basamak cevabı Şekil 5.43’de verilmiştir.



Şekil 5.43 : Kaskad Model 2 için bozuculu birim basamak cevabı.

Şekil 5.43’den görüldüğü üzere sistem d_1 ve d_2 bozucularını bastırmıştır. Sistem d_1 bozucusunu 4.89 saniyede bastırırken, d_2 bozucusunu 5.84 saniyede bastırmıştır. d_1 ve d_2 bozucusuna ait ITSE hata değerleri sırasıyla;

$$ITSE_{d_1} = 0.5581$$

$$ITSE_{d_2} = 2.198$$

şeklindedir.

5.2.1.2 İç çevrimde ölü zamanlı birinci mertebeden modelin dış çevrimde ölü zamanlı ikinci mertebeden modelin kullanılması

Yüksek mertebeden iç çevrimin birinci mertebeden ölü zamanlı modeli ve dış çevrimdeki sistemin ikinci mertebeden ölü zamanlı modelleri sırasıyla;

$$G_{iç-ölü}(s) = \frac{1}{1.1s + 1} e^{-0.1s} \quad (5.87)$$

$$G_{dış-ölü}(s) = \frac{1.5}{0.15s^2 + 1.15s + 1} e^{-0.05s} \quad (5.88)$$

şeklinde [39]. $G_{dış-ölü}(s)$ 'nün ölü zamansız transfer fonksiyonu başlık 4.1.2.3'de anlatıldığı gibi $G_{m21}(s)$ ve $G_{m22}(s)$ birinci mertebeden transfer fonksiyonlarına ayrılmalıdır. Ölü zamansız sistem;

$$G_{m21}(s) = \frac{K_{2m}^1}{(T_{m1}s + 1)} = \frac{1}{s + 1} \quad (5.89)$$

$$G_{m22}(s) = \frac{K_{2m}^2}{(T_{m2}s + 1)} = \frac{1.5}{0.15s + 1} \quad (5.90)$$

şeklinde iki tane birinci mertebeden sisteme ayrılabilir. Böylece 1. mertebeden iki sistemin parametreleri;

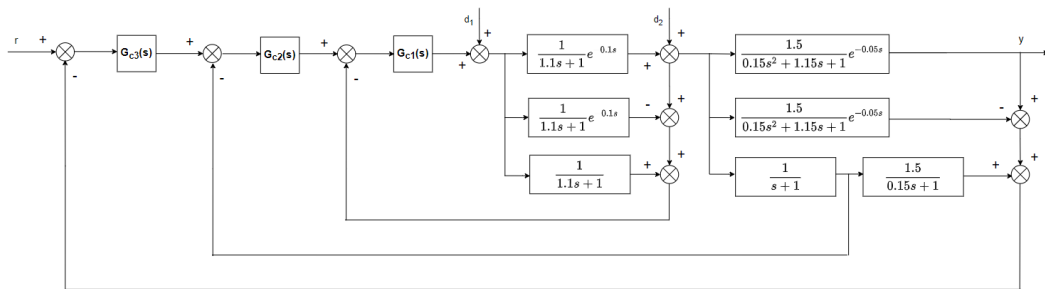
$$K_{2m}^1 = 1 \quad (5.91)$$

$$T_{m1} = 1 \quad (5.92)$$

$$K_{m2}^2 = 1.5 \quad (5.93)$$

$$T_{m2} = 0.15 \quad (5.94)$$

şeklinde bulunur. Kaskad Model 2 için kaskad indirgenmiş MAT kaskad kontrolör yapısına ait blok diyagramı Şekil 5.44'de verilmiştir.



Şekil 5.44 : Kaskad Model 2 için MAT kaskad blok diyagramı.

$G_{c1}(s)$ kontrolörünün tasarımı için γ_1 ve γ_2 parametreleri sırasıyla;

$$\gamma_1 = 0.1 \quad (5.95)$$

$$\gamma_2 = 4 \quad (5.96)$$

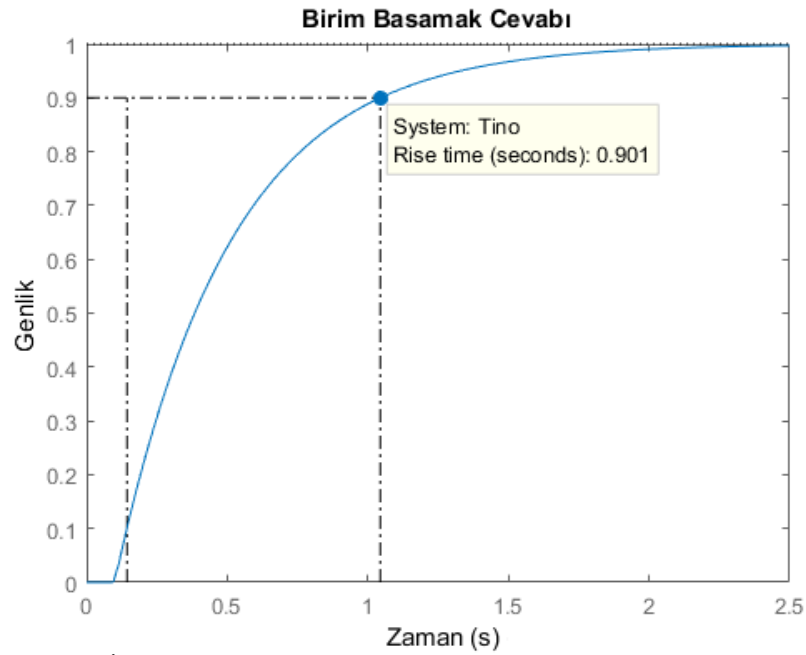
olarak seçilmiştir. Parametrelerin seçiminden sonra $G_{c1}(s)$ PI tipi kontrolörü;

$$G_{c1}(s) = 2.439 \frac{1.1s + 1}{s} = \frac{2.683s + 2.439}{s} \quad (5.97)$$

olarak bulunur. Bu durum iç çevrim kapalı çevrim transfer fonksiyonu $T_{iç}(s)$;

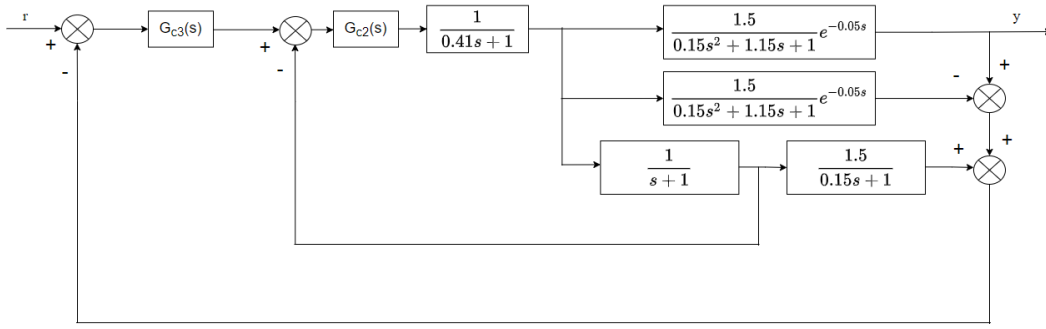
$$T_{iç}(s) = \frac{1}{0.41s + 1} e^{-0.1s} \quad (5.98)$$

şeklini alır. İç çevrime ait kapalı çevrim sistemin birim basamak cevabı Şekil 5.45'de verilmiştir.



Şekil 5.45 : İç çevrime ait kapalı çevrim sistemin birim basamak cevabı.

Şekil 5.45'den görüldüğü üzere kapalı çevrim sistem birim basamak cevabı aşırımsız ve yükselme zamanı ise 0.901 saniye olmuştur. İç çevrim için kontrolör tasarımı yapıldıktan sonra Şekil 5.44'deki kaskad sistem Şekil 5.46'daki gibi indirgenebilir.

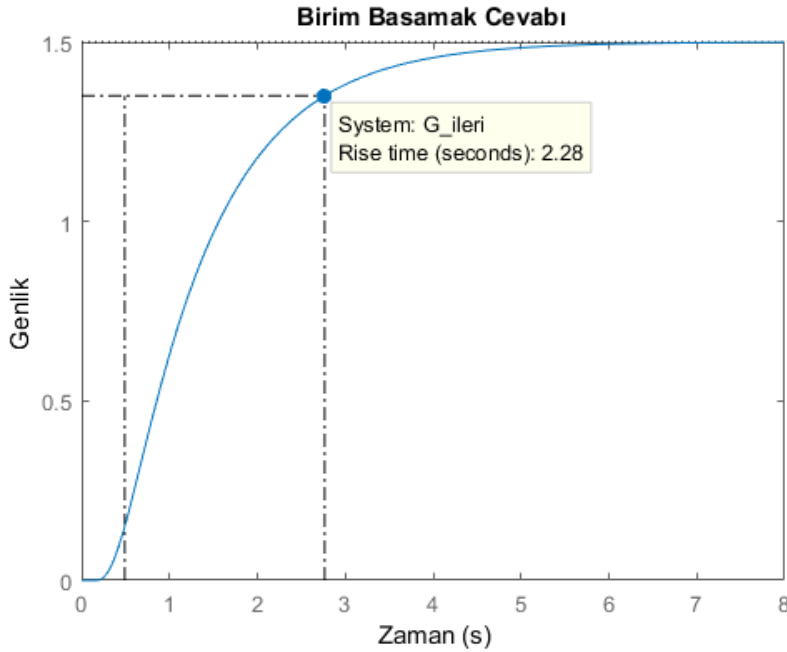


Şekil 5.46 : Dış çevrim için indirgenmiş blok diyagramı.

Şekil 5.46'daki indirgenmiş blok diyagramındaki ileri yoldaki ölü zamansız transfer fonksiyonu;

$$G_{\text{ileri-ölü zamansız}}(s) = \frac{1}{0.0308 s^3 + 0.3908 s^2 + 1.36 s + 1} \quad (5.99)$$

şeklindedir. $G_{\text{ileri}}(s)$ transfer fonksiyonunun birim basamak cevabı Şekil 5.47'de verilmiştir.



Şekil 5.47 : $G_{\text{ileri}}(s)$ sisteminin birim basamak cevabı.

Şekil 5.47'den görüldüğü üzere sistem cevabı aşım yapmamakta ve sistemin yükselme zamanı 2.28 saniyedir. Tasarlanacak kontrolörle birlikte kapalı çevrim sistem cevabında aşımsız bir sistem cevabı elde edilecek kontrolör tasarımı yapılacaktır. İlk olarak $G_{m21}(s)$ sistemi için $G_{c2}(s)$ kontrolörü tasarlanacaktır. Tasarlanan

kontrolör kutup-sıfır götürmesini yöntemine dayalı olarak yapılmaktadır. $G_{m21}(s)$ için tasarlanacak kontrolör PI tipi kontrolör olacaktır. $G_{c2}(s)$ PI tipi kontrolörü;

$$G_{c2}(s) = K_{c2} \frac{T_{m1}s + 1}{s} = K_{c2} \frac{s + 1}{s} \quad (5.100)$$

şeklinde gösterilebilir. K_{c2} kontrolör kazancı ise denklem (5.101)'deki gibi hesaplanabilir.

$$K_{c2} = \frac{1}{4\zeta^2(\gamma_1 + \gamma_2)L_{m1}K_{2m}} \quad (5.101)$$

Aşırımsız bir sistem cevabı istenildiği için $\zeta = 1$ olarak seçilir. Parametrelerin seçiminden sonra $G_{c2}(s)$ PI tipi kontrolörü;

$$G_{c2}(s) = 1.786 \frac{s + 1}{s} = \frac{1.786s + 1.786}{s} \quad (5.102)$$

olarak bulunur. $G_{c2}(s)$ kontrolörü tasarlandıktan sonraki adım $G_{m22}(s)$ için $G_{c3}(s)$ kontrolörü tasarlamaktır. Tasarlanan kontrolör kutup-sıfır götürmesini yöntemine dayalı olarak yapılmaktadır. $G_{m22}(s)$ için tasarlanacak kontrolör PI tipi kontrolör olacaktır. $G_{c3}(s)$ PI tipi kontrolörü;

$$G_{c3}(s) = K_{c3} \frac{T_{m2}s + 1}{s} = K_{c3} \frac{0.15s + 1}{s} \quad (5.103)$$

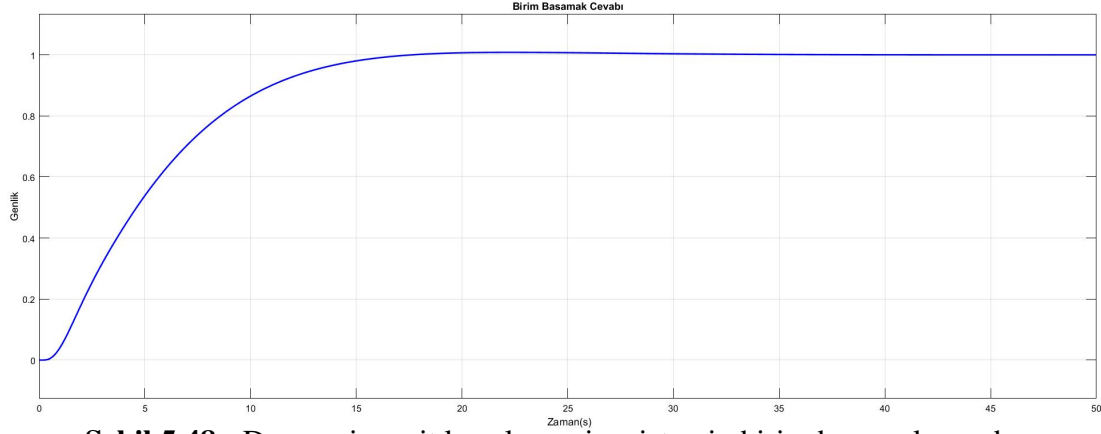
şeklinde gösterilebilir. K_{c3} kontrolör kazancı ise denklem (5.104)'deki gibi hesaplanabilir.

$$K_{c3} = \frac{1}{8\zeta^4 K_{m2}^2 \gamma_3 (\gamma_1 + \gamma_2)} \quad (5.104)$$

Aşırımsız bir sistem cevabı istenildiği için $\zeta = 1$ olarak seçilir. $\gamma_3 \geq 1$ şartına uygun olacak şekilde 1.6 seçilmiştir. Parametrelerin seçiminden sonra $G_{c3}(s)$ PI tipi kontrolörü;

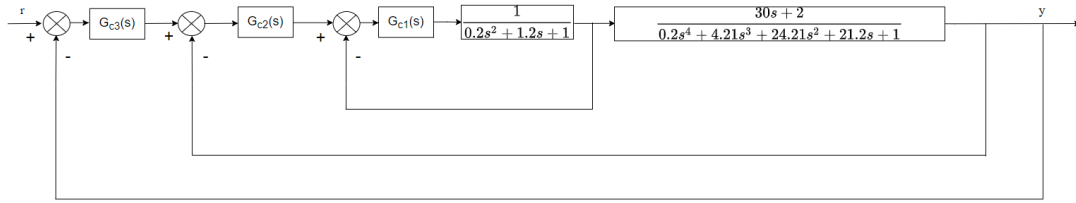
$$G_{c3}(s) = 0.127 \frac{0.15s + 1}{s} = \frac{0.01905s + 0.127}{s} \quad (5.105)$$

olarak bulunur. $G_{c3}(s)$ kontrolörü tasarlandıktan sonra oluşan dış çevrime ait kapalı çevrim sistemin birim basamak cevabı Şekil 5.48'de verilmiştir.



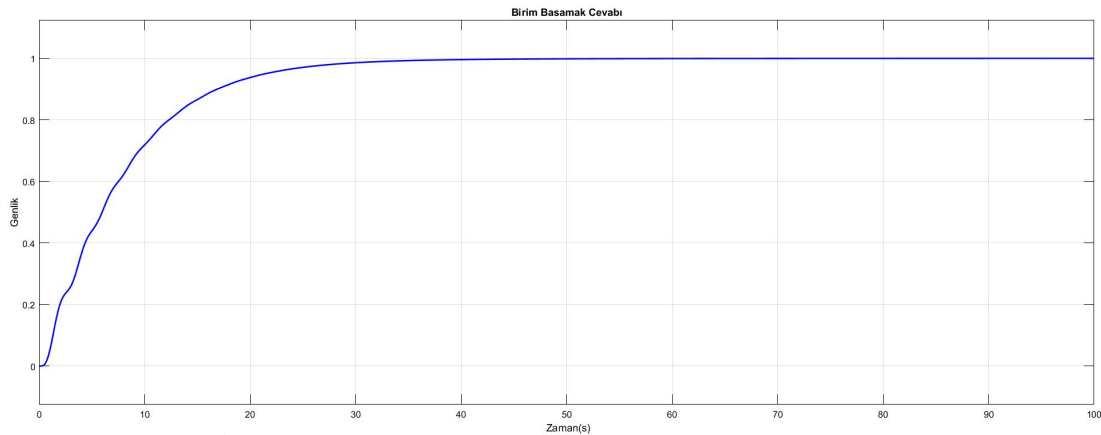
Şekil 5.48 : Dış çevrime ait kapalı çevrim sistemin birim basamak cevabı.

Kapalı çevrim sistem birim basamak cevabı aşısız (%2'lik bandın içinde kalmıştır) ve yükselme zamanı ise 9.5514 saniye olmuştur. Karşılaştırma yapabilmek adına tasarlanan $G_{c1}(s)$, $G_{c2}(s)$ ve $G_{c3}(s)$ kontrolörleriyle birlikte yüksek mertebeden sistemlerle oluşturulan yapı Şekil 5.49'da verilmiştir.



Şekil 5.49 : Kaskad Model 2 için oluşturulan ikinci kaskad kontrol yapısı.

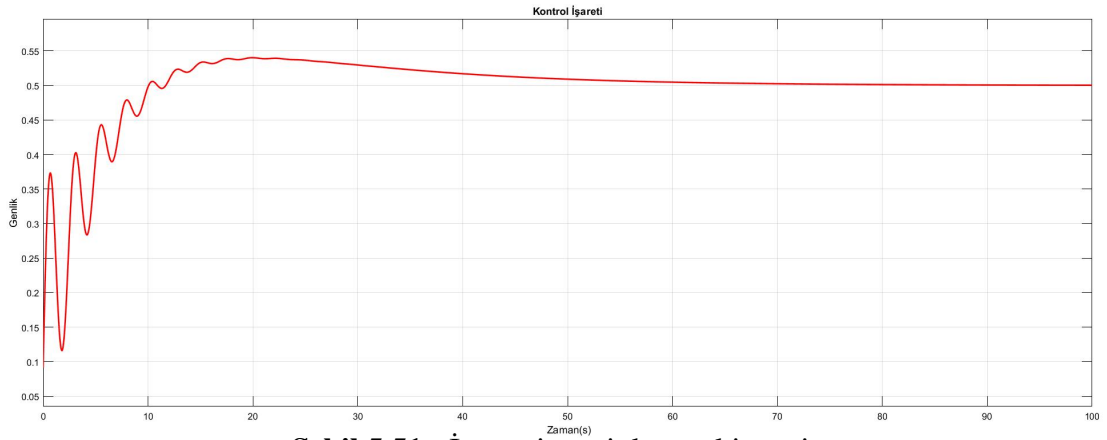
Şekil 5.49'daki blok diyagramında gösterilen kaskad sisteme ait birim basamak cevabı Şekil 5.50'de verilmiştir.



Şekil 5.50 : Kaskad sisteme ait birim basamak cevabı.

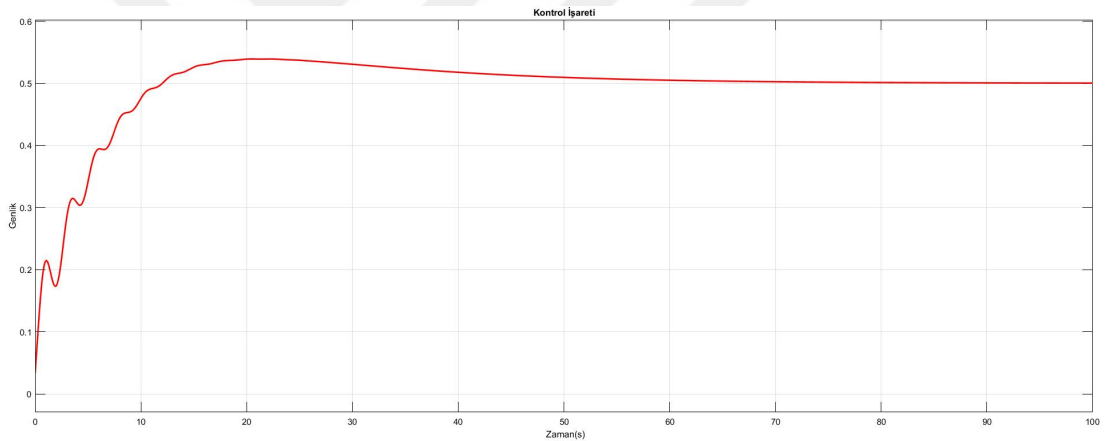
Şekil 5.50'den görüldüğü üzere sistem aşım yapmamıştır. Sistemin yükselme zamanı ise 15.5715 saniyedir. Bu değer, kapalı çevrim ölü zamanlı sistem sistemin yükselme

zamanında daha yüksek çıkmıştır. İç çevrime ait kontrol işareti Şekil 5.51’de verilmiştir.



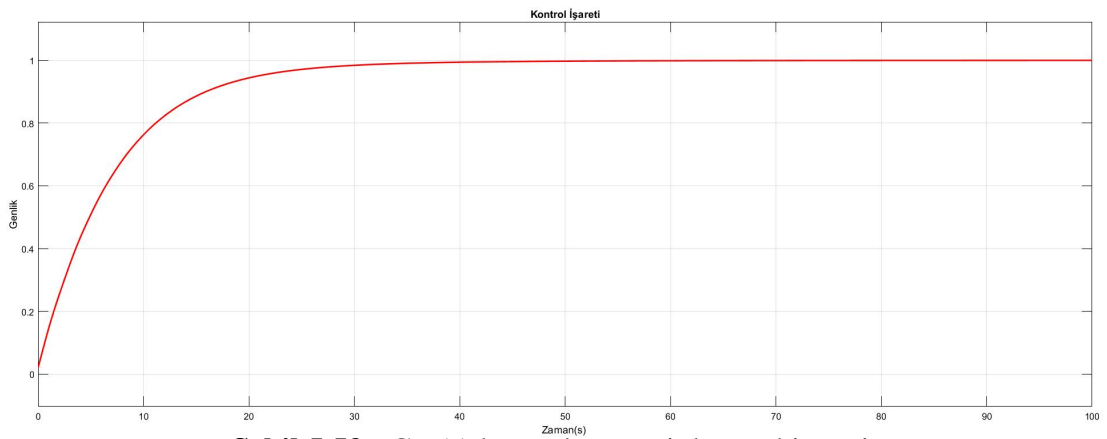
Şekil 5.51 : İç çevrime ait kontrol işareti.

$G_{c2}(s)$ kontrolörüne ait kontrol işareti Şekil 5.52’de verilmiştir.



Şekil 5.52 : $G_{c2}(s)$ kontrolörüne ait kontrol işareti.

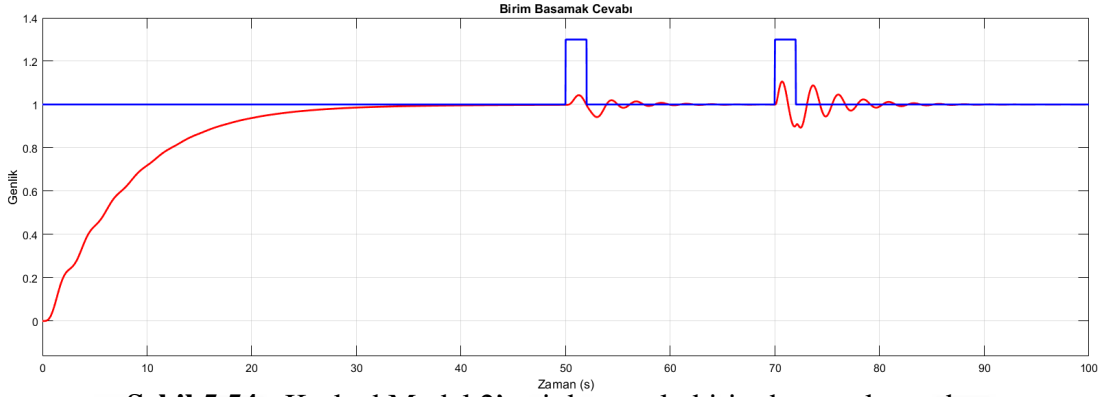
$G_{c3}(s)$ kontrolörüne ait kontrol işareti Şekil 5.53’de verilmiştir.



Şekil 5.53 : $G_{c3}(s)$ kontrolörüne ait kontrol işareti.

Şekil 5.44’de gösterilen d_1 ve d_2 bozucuları sırasıyla 50. ve 70. saniyede verilmiştir.

Bozucuların genlikleri 0.3 olup, 2 saniye boyunca sisteme verilmişlerdir. Kaskad Model 2 için d_1 ve d_2 bozucuları etkisinde birim basamak cevabı Şekil 5.54’de verilmiştir.



Şekil 5.54 : Kaskad Model 2’ e ait bozuculu birim basamak cevabı.

Şekil 5.54’den görüldüğü üzere sistem d_1 ve d_2 bozucularını bastırmıştır. Sistem d_1 bozucusunu 3.66 saniyede bastırırken, d_2 bozucusunu 8.65 saniyede bastırmıştır. d_1 ve d_2 bozucusuna ait ITSE hata değerleri sırasıyla;

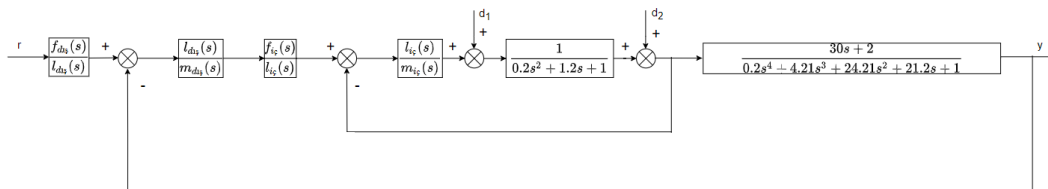
$$ITSE_{d_1} = 0.2607$$

$$ITSE_{d_2} = 1.992$$

şeklindedir.

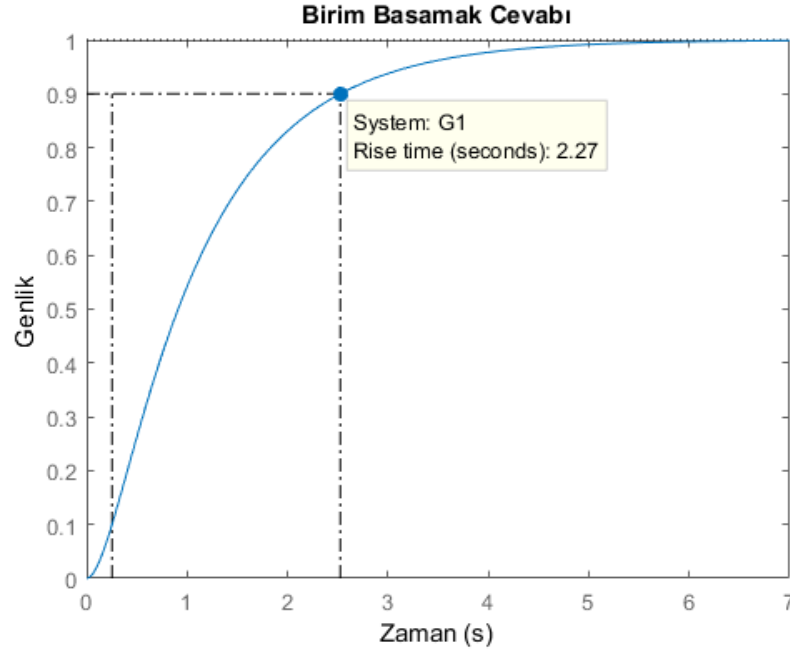
5.2.2 Kaskad model 2 için karakteristik oran atama yöntemiyle kaskad kontrolör tasarımı

Kaskad Model 2 için kaskad indirgenmiş Rİİ kontrolör yapısına ait blok diyagramı Şekil 5.55’de verilmiştir.



Şekil 5.55 : Kaskad Model 2 için kaskad indirgenmiş Rİİ kontrolör yapısına ait blok diyagramı.

$G_{iç}(s)$ transfer fonksiyonunun açık çevrim birim basamak cevabı Şekil 5.56’da verilmiştir.



Şekil 5.56 : $G_{iç}(s)$ sisteminin birim basamak cevabı.

Şekil 5.56'dan görüldüğü üzere sistem cevabı aşım yapmamakta ve sistemin yükselme zamanı 2.27 saniyedir. Tasarlanacak kontrolörle birlikte kapalı çevrim sistem cevabında yükselme zamanını kısaltarak sistem cevabı hızlandırılacak ve aşımsız bir sistem cevabı elde edilecek kontrolör tasarımı yapılacaktır. Sistem 2. mertebeden bir sistem olduğu için tasarlanacak kontrolör 1. mertebeden olacaktır. Böylece kapalı çevrim karakteristik polinomun mertebesi 3 olacaktır. Bu duruma göre kapalı çevrim karakteristik polinomu,

$$m_{iç}(s) = (m_1s + m_0) \quad (5.106)$$

$$d_{iç}(s) = (0.2s^2 + 1.2s + 1) \quad (5.107)$$

$$l_{iç}(s) = (l_1s + l_0) \quad (5.108)$$

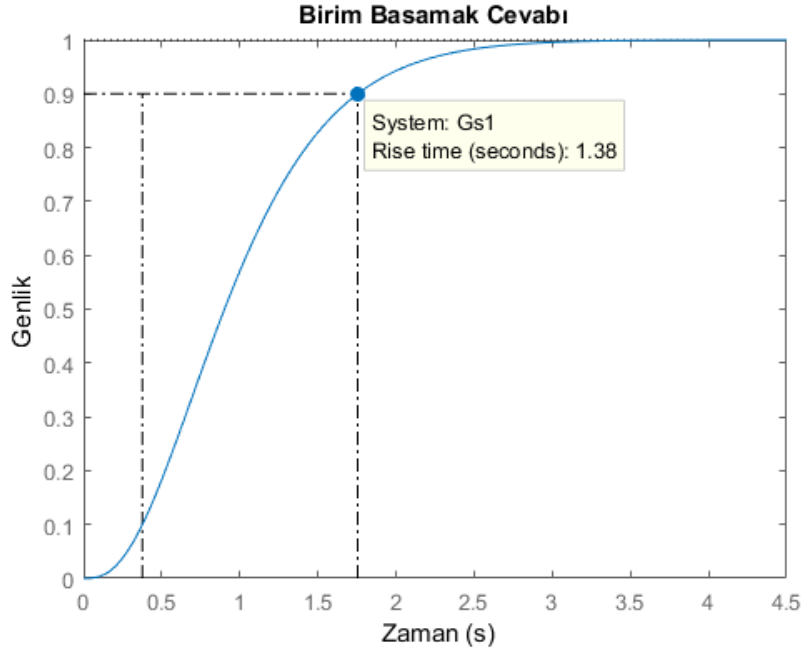
$$n_{iç}(s) = (1) \quad (5.109)$$

olmak üzere

$$p_{iç}(s) = m_{iç}(s)d_{iç}(s) + l_{iç}(s)n_{iç}(s) \quad (5.110)$$

şeklinde ifade edilebilir.

$\tau=1$ ve aşımsız bir sistem cevap için $\alpha_1 = 2.9$ seçildiği durumda, kapalı çevrim sistemin birim basamak cevabı Şekil 5.57'de verilmiştir.



Şekil 5.57 : $\tau=1$ ve $\alpha_1 = 2.9$ durumunda kapalı çevrim birim basamak cevabı.

Şekil 5.57’den görüldüğü üzere kapalı çevrim sistem birim basamak cevabı aşırımsız ve yükselme zamanı ise 1.38 saniye olmuştur. İç çevrim için tasarlanan kontrolör sonucunda oluşan kapalı çevrim transfer fonksiyonu;

$$G_{cl-i\check{c}}(s) = \frac{1}{0.041 s^3 + 0.3448 s^2 + s + 1} \quad (5.111)$$

olarak bulunur. Kapalı çevrim transfer karakteristik polinomu ise;

$$p_{i\check{c}}(s) = 0.041 s^3 + 0.3448 s^2 + s + 1 \quad (5.112)$$

şeklindedir. Bu kapalı çevrimi sağlayacak $m_{i\check{c}}(s)$ ve $l_{i\check{c}}(s)$ polinomları ise;

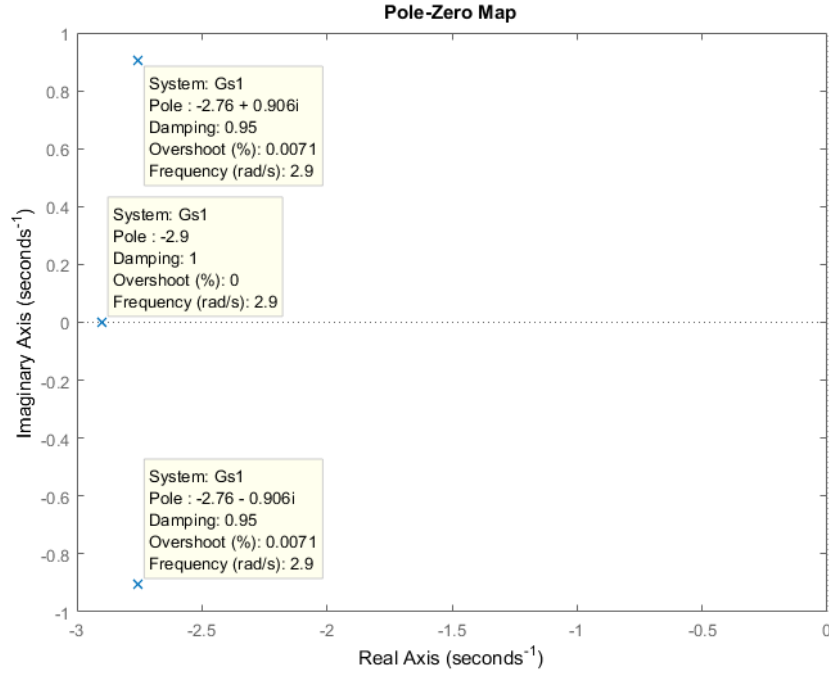
$$m_{i\check{c}}(s) = 0.205 s + 0.4941 \quad (5.113)$$

$$l_{i\check{c}}(s) = 0.2021 s + 0.5059 \quad (5.114)$$

olarak bulunur. Kapalı çevrim birim basamak değerinin son değeri 1’e yerleştiği için

$$f_{i\check{c}}(s) = 1 \quad (5.115)$$

şeklinde bulunur. İç çevrime ait kapalı çevrim transfer fonksiyonunun kutup-sıfır dağılımı Şekil 5.58’de verilmiştir.



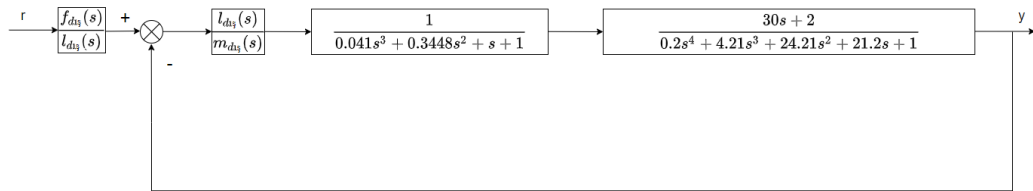
Şekil 5.58 : $G_{cl-iç}(s)$ sisteminin kutup-sıfır dağılımı.

$G_{cl-iç}(s)$ sisteminin kutupları;

$$s_{1,2} = -2.7550 \pm j0.9055 \quad (5.116)$$

$$s_3 = -2.9000 \quad (5.117)$$

şeklinde. $s_{1,2}$ kutuplarında imajiner kısım bulunmaktadır. $s_{1,2}$ kutupların amortisman oranları $0.95(\sim 1)$ $\zeta=1$ kritik sönüm oranına çok yakın olmasından dolayı sistem cevabında aşım gözlenmemiştir. İç çevrim için kontrolör tasarımı yapıldıktan sonra Şekil 5.55'deki kaskad sistem Şekil 5.59'daki gibi indirgenebilir.

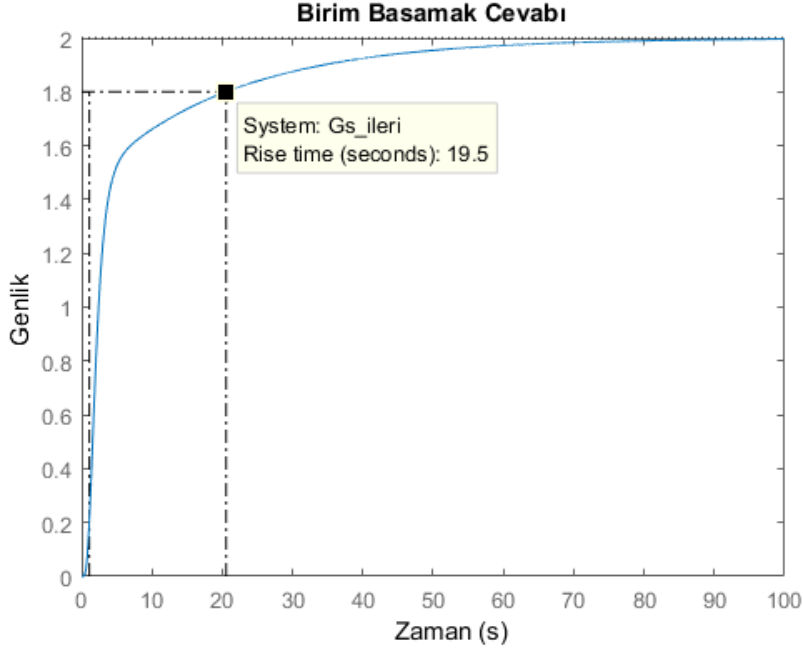


Şekil 5.59 : İndirgenmiş kaskad blok diyagramı.

Şekil 5.59'daki indirgenmiş blok diyagramındaki ileri yoldaki transfer fonksiyonu;

$$G_{ileri}(s) = \frac{30s + 2}{0.0082s^7 + 0.2416s^6 + 2.644s^5 + 13.63s^4 + 35.77s^3 + 45.75s^2 + 22.2s + 1} \quad (5.118)$$

şeklindedir. $G_{ileri}(s)$ transfer fonksiyonunun birim basamak cevabı Şekil 5.60'da verilmiştir.



Şekil 5.60 : $G_{ileri}(s)$ sisteminin birim basamak cevabı.

Şekil 5.60'dan görüldüğü üzere sistem cevabı aşım yapmamakta ve sistemin yükselme zamanı 19.5 saniyedir. Tasarlanacak kontrolörle birlikte kapalı çevrim sistem cevabında yükselme zamanını kısaltarak sistem cevabı hızlandırılacak ve dış çevrimdeki sistem için amaçlanan aşısız bir sistem cevabı elde edilecek kontrolör tasarımı yapılacaktır. İleri yoldaki sistem 7. mertebeden bir sistem olduğu için tasarlanacak kontrolör 6. mertebeden olacaktır. Böylece dış çevrim ait kapalı çevrim karakteristik polinomun mertebesi 13 olacaktır. Sistemin $s=-0.0667$ 'de bir sıfırı olduğu için $m(s)$, $n(s)$ polinomları

$$m_{dış}(s) = \overline{m}_{dış}(s)(30s+2); \overline{m}_{dış}(s) = m_5s^5 + m_4s^4 + m_3s^3 + m_2s^2 + m_1s + m_0 \quad (5.119)$$

$$d_{dış}(s) = (0.0082 s^7 + 0.2416 s^6 + 2.644 s^5 + 13.63 s^4 + 35.77 s^3 + 45.75 s^2 + 22.2 s + 1) \quad (5.120)$$

$$n_{dış}(s) = \overline{n}_{dış}(s)(30s+2); \overline{n}_{dış}(s) = 1 \quad (5.121)$$

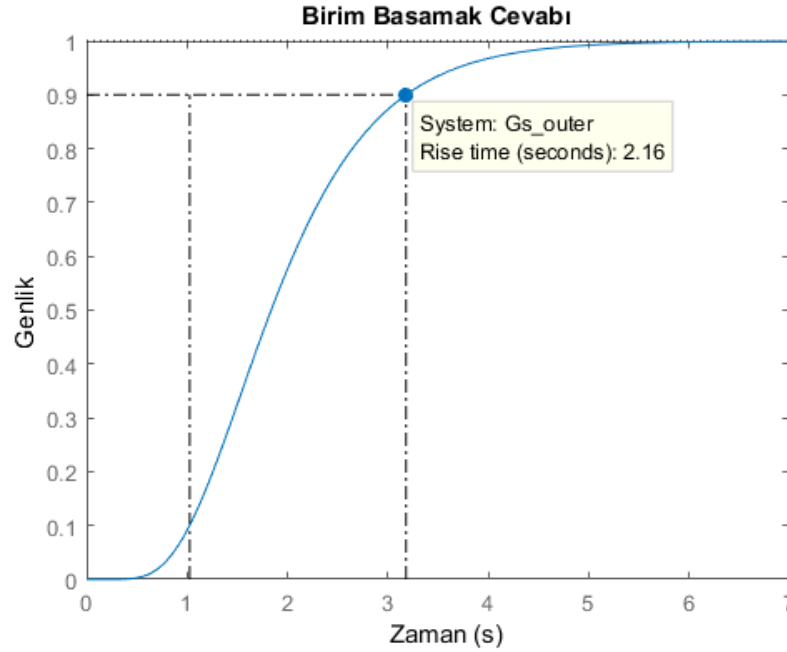
$$l_{dış}(s) = l_6s^6 + l_5s^5 + l_4s^4 + l_3s^3 + l_2s^2 + l_1s + l_0 \quad (5.122)$$

olmak üzere

$$p_{dış}(s) = \overline{p}(s)(30s+2) = \overline{m}(s)(30s+2)d_{dış}(s) + \overline{l}_{dış}(s)\overline{n}(s)(30s+2) \quad (5.123)$$

şeklinde ifade edilebilir.

$\tau=2$ ve aşırıdır bir sistem cevap için $\alpha_1 = 2.5$ seçildiği durumda, kapalı çevrim sistemin birim basamak cevabı Şekil 5.61’de verilmiştir.



Şekil 5.61 : $\tau=2$ ve $\alpha_1 = 2.5$ durumunda kapalı çevrim birim basamak cevabı.

Şekil 5.61’den görüldüğü üzere kapalı çevrim sistem birim basamak cevabı aşırıdır ve yükselme zamanı ise 2.16 saniye olmuştur. Dış çevrim için tasarlanan kontrolör sonucunda oluşan kapalı çevrim transfer fonksiyonu;

$$G_{cl-dış}(s) = \frac{30s + 2}{3.852 \cdot 10^{-12} s^{13} + 7.719 \cdot 10^{-10} s^{12} + 8.168 \cdot 10^{-8} s^{11} + 5.081 \cdot 10^{-6} s^{10} + 0.000196 s^9 + 0.004815 s^8 + 0.07631 s^7 + 0.7801 s^6 + 5.087 s^5 + 20.61 s^4 + 49.35 s^3 + 63.2 s^2 + 34 s + 2} \quad (5.124)$$

olarak bulunur. Kapalı çevrim transfer karakteristik polinomu ise;

$$p_{dış}(s) = 3.852 \cdot 10^{-12} s^{13} + 7.719 \cdot 10^{-10} s^{12} + 8.168 \cdot 10^{-8} s^{11} + 5.081 \cdot 10^{-6} s^{10} + 0.000196 s^9 + 0.004815 s^8 + 0.07631 s^7 + 0.7801 s^6 + 5.087 s^5 + 20.61 s^4 + 49.35 s^3 + 63.2 s^2 + 34 s + 2 \quad (5.125)$$

şeklindeir. Bu kapalı çevrimi sağlayacak $m_{dış}(s)$ ve $l_{dış}(s)$ polinomları ise;

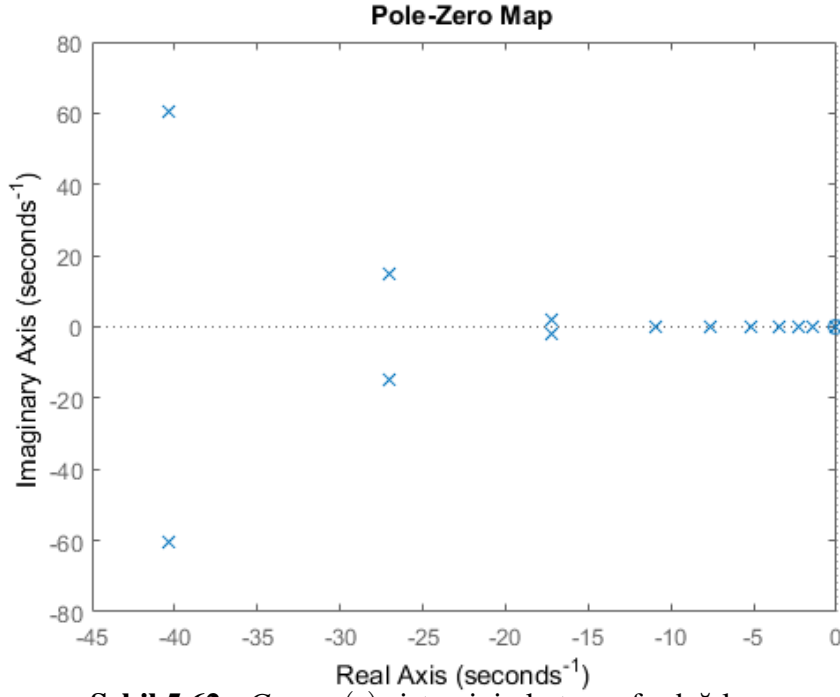
$$m_{dış}(s) = 4.7 \cdot 10^{-10} s^6 + 8.03 \cdot 10^{-8} s^5 + 7.44 \cdot 10^{-6} s^4 + 3.74 \cdot 10^{-4} s^3 + 0.0104 s^2 + 0.149 s + 0.00989 \quad (5.126)$$

$$l_{dış}(s) = 2.5 \cdot 10^{-4} s^6 + 0.00762 s^5 + 0.0876 s^4 + 0.483 s^3 + 1.37 s^2 + 1.89 s + 0.995 \quad (5.127)$$

olarak bulunur. Kapalı çevrim birim basamak değeri 1'e yerleştiği için

$$f_{dış}(s) = 1 \quad (5.128)$$

şeklinde bulunur. Dış çevrime ait kapalı çevrim transfer fonksiyonunun kutup-sıfır dağılımı Şekil 5.62'de verilmiştir.



Şekil 5.62 : $G_{cl-dış}(s)$ sisteminin kutup-sıfır dağılımı.

$G_{cl-dış}(s)$ sisteminin kutupları;

$$s_1 = -0.066667 \quad (5.129)$$

$$s_2 = -1.47265 \quad (5.130)$$

$$s_3 = -2.31322 \quad (5.131)$$

$$s_4 = -3.50338 \quad (5.132)$$

$$s_5 = -5.18487 \quad (5.133)$$

$$s_6 = -7.57129 \quad (5.134)$$

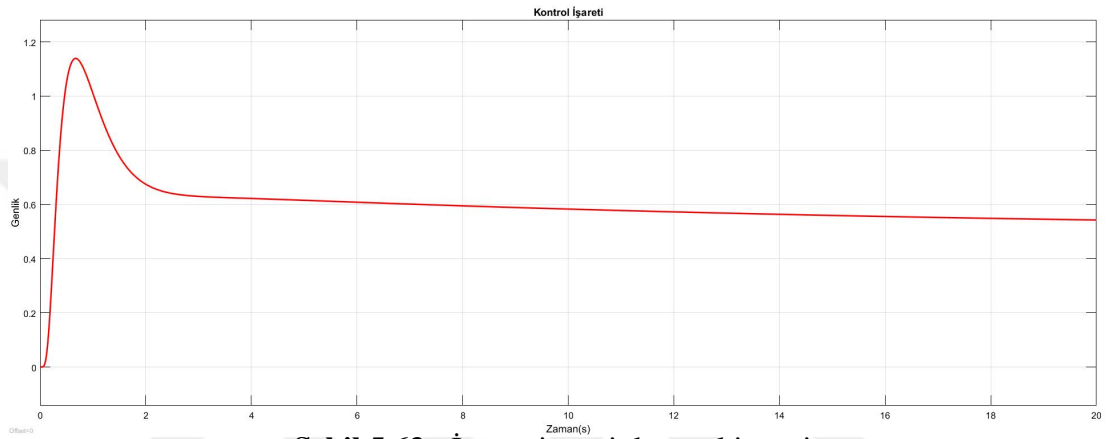
$$s_7 = -10.9051 \quad (5.135)$$

$$s_{8,9} = -17.2267 \pm j1.74039 \quad (5.136)$$

$$s_{10,11} = -27.047 \pm j15.0865 \quad (5.137)$$

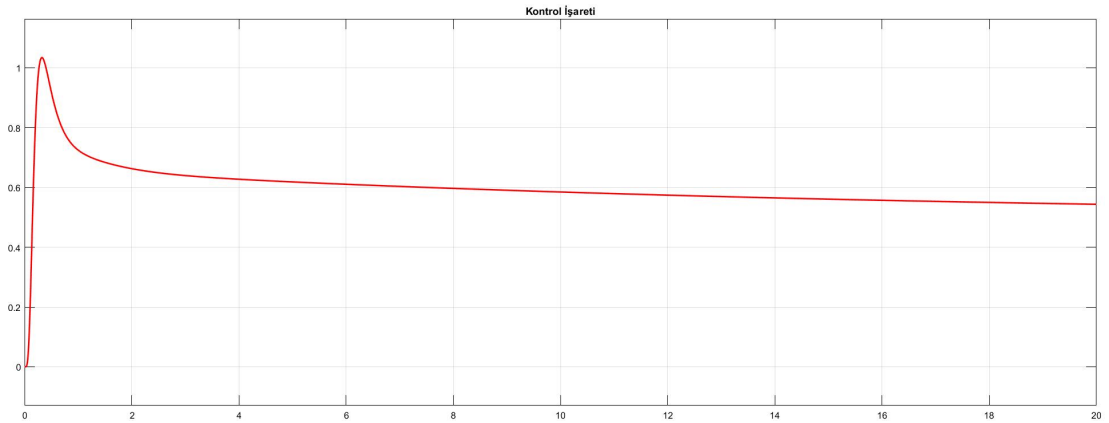
$$s_{12,13} = -40.4082 \pm j 60.5648 \quad (5.138)$$

şeklindedir. Bunlara ek olarak dış sistemden gelen $s = -0.0666667$ 'deki sol-yarı düzlemde sıfırı bulunmaktadır. $s_{8,9}$, $s_{10,11}$ ve $s_{12,13}$ kutuplarında sanal kısım bulunmaktadır. $s_{8,9}$ kutupların sönüm oranları $0.995(\sim 1) = 1$ kritik sönüm oranına çok yakın olması ve diğer kutupların baskın bölgede olmamasından dolayı sistem cevabında aşım gözlenmemiştir. İç çevrime ait kontrol işareti Şekil 5.63'de verilmiştir.



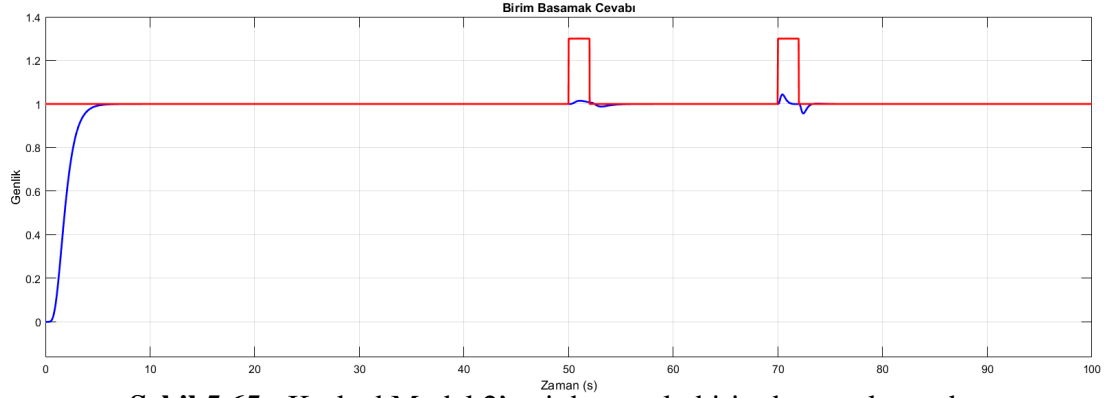
Şekil 5.63 : İç çevrime ait kontrol işareti.

Dış çevrime ait kontrol işareti Şekil 5.64'de verilmiştir.



Şekil 5.64 : Dış çevrime ait kontrol işareti.

Şekil 5.55'de gösterilen d_1 ve d_2 bozucuları sırasıyla 50. ve 70. saniyede verilmiştir. Bozucuların genlikleri 0.3 olup, 2 saniye boyunca sisteme verilmişlerdir. Kaskad Model 2'nin d_1 ve d_2 bozucuları etkisinde birim basamak cevabı Şekil 5.65'de verilmiştir.



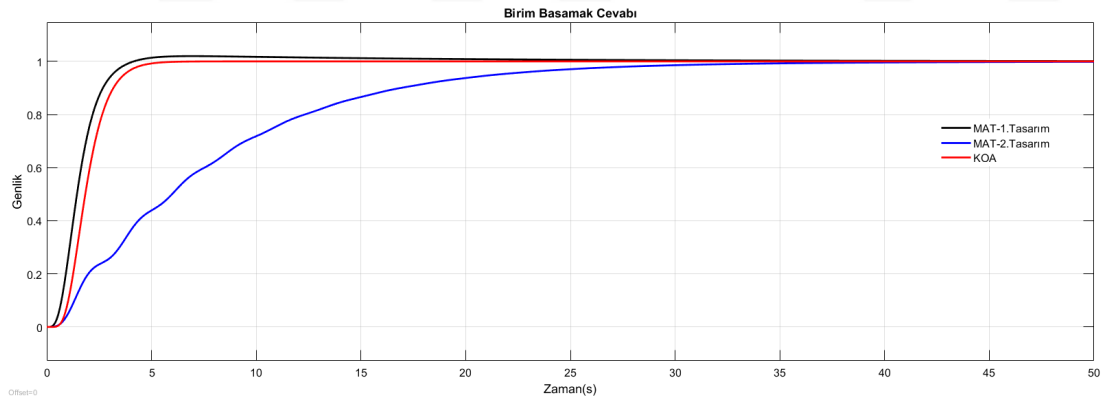
Şekil 5.65 : Kaskad Model 2'e ait bozuculu birim basamak cevabı.

Şekil 5.65'den görüldüğü üzere sistem d_1 ve d_2 bozucusunu bastırmıştır. Sistem d_1 bozucusunu hemen bastırırken, d_2 bozucusunu 2.78 saniyede bastırmıştır. d_1 ve d_2 bozucusuna ait ITSE hata değerleri sırasıyla;

$$ITSE_{d_1} = 0.01921$$

$$ITSE_{d_2} = 0.113$$

şeklinde dir. Kaskad Model 2'e için tasarlanan kontrolör sonucundaki kapalı çevrim basamakları Şekil 5.66'da toplu olarak verilmiştir.



Şekil 5.66 : Kaskad Model 2'e ait birim basamak cevapları.

Sistemin referans takip başarımı için ITSE kriteri kullanılmıştır. Tasarlanan kontrolörlere göre ait ITSE hata değerleri sırasıyla;

$$ITSE_{MAT-1.Tasarım} = 0.8432$$

$$ITSE_{MAT-2.Tasarım} = 15.9$$

$$ITSE_{KOA} = 1.31$$

şeklinde dir. Hata değerlerinden görüldüğü üzere en az hata değeri MAT yöntemiyle dış çevrimdeki sistemin birinci mertebeden ölü zamanlı sistem olması durumunda

tasarlanan kontrolörle elde edilmiştir. Tasarlanan 3 kontrolör için sistemin zaman bölgesi karakteristiklerinin karşılaştırılması Çizelge 5.4’de verilmiştir.

Çizelge 5.4 : Kaskad Model 2 için zaman bölgesi karakteristiklerinin karşılaştırılması

	MAT-1.Tasarım	MAT-2.Tasarım	KOA
Yükselme Zamanı (s)	1.9863	15.5715	2.1552
Aşım (%)	0	0	0
Yerleşme Zamanı (s)	3.6083	27.6188	4.34

Çizelge 5.4’den görüldüğü üzere sistemlerin hiçbiri aşım yapmamış, en düşük yükselme zamanı ve yerleşme zamanı MAT 1. kontrolör tasarımı elde edilmiştir. Tasarlanan 3 kontrolör de 1. kaskad sistem d_1 ve d_2 bozucularını bastırmıştır. Kaskad Model 2 için bozucu bastırma süreleri ve ITSE hata değerleri Çizelge 5.5’de verilmiştir.

Çizelge 5.5 : Kaskad Model 2 için bozucu bastırma başarımları

	MAT-1.Tasarım		MAT-2.Tasarım		KOA	
Kriterler	Bastırma Süresi (s)	ITSE	Bastırma Süresi (s)	ITSE	Bastırma Süresi (s)	ITSE
d_1 bozucusu	4.89	0.5581	3.36	0.2607	-	0.01921
d_2 bozucusu	5.84	2.198	8.65	1.992	2.78	0.113

Çizelge 5.5’e bakıldığı zaman en az ITSE değerleri KOA yöntemiyle elde edilirken, d_1 ve d_2 bozucularını en hızlı yine KOA yöntemiyle tasarlanan kontrolörle bastırılmıştır.

5.3 “Kaskad Model 3” için Kaskad Kontrolör Tasarımı

5.3.1 Model ayrıştırma temelli kaskad kontrolör tasarımı

5.3.1.1 İç ve dış çevrimde ölü zamanlı birinci mertebeden modellerin kullanılması

Kaskad Model 3’de bulunan iç ve dış çevrimdeki sistemlerin transfer fonksiyonları sırasıyla;

$$G_{iç}(s) = \frac{1}{6.4 \cdot 10^{-6} s^4 + 0.008198 s^3 + 0.249 s^2 + 1.241 s + 1} \quad (5.139)$$

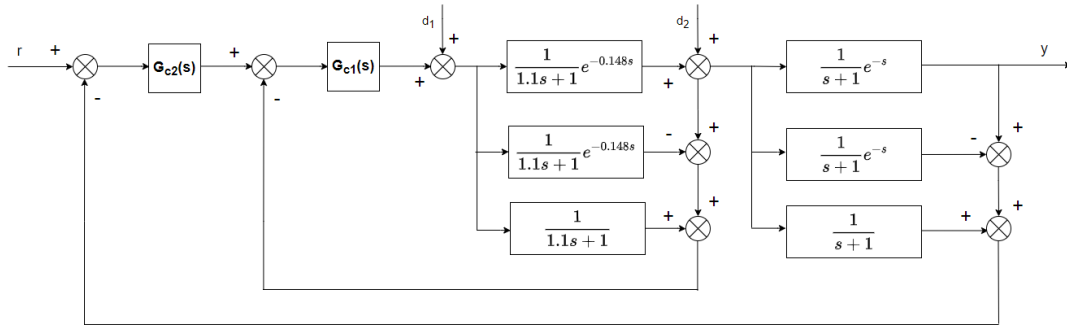
$$G_{dış}(s) = \frac{-s + 1}{s + 1} \quad (5.140)$$

şeklindedir. Yüksek mertebeden iç ve dış çevrimdeki sistemlerin birinci mertebeden ölü zamanlı modelleri sırasıyla,

$$G_{iç-ölü}(s) = \frac{1}{1.1s + 1} e^{-0.148s} \quad (5.141)$$

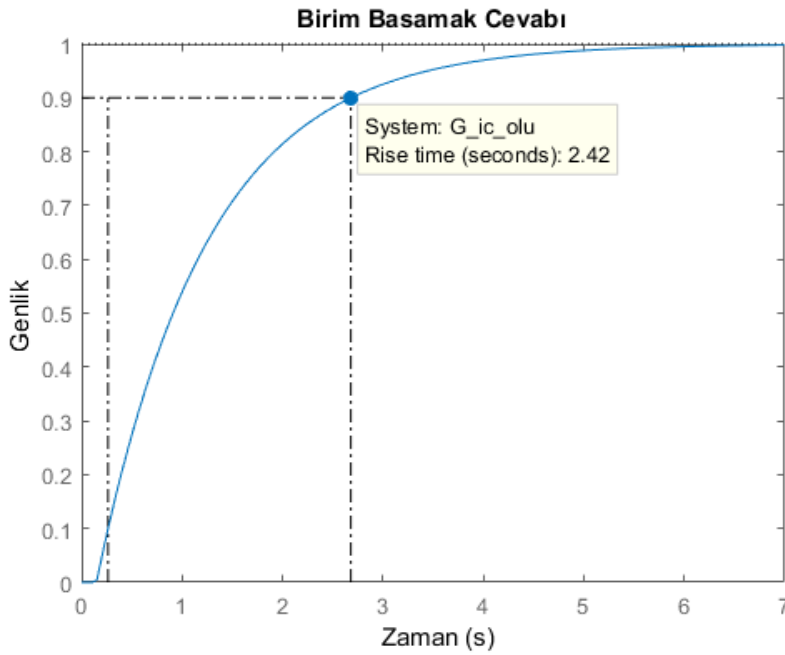
$$G_{dış-ölü}(s) = \frac{1}{s + 1} e^{-s} \quad (5.142)$$

şeklindedir [39]. MAT kaskad kontrolör yapısına ait blok diyagramı Şekil 5.67’de verilmiştir.



Şekil 5.67 : Kaskad Model 3 için MAT kaskad blok diyagramı.

$G_{iç-ölü}(s)$ transfer fonksiyonunun açık çevrim birim basamak cevabı Şekil 5.68’de verilmiştir.



Şekil 5.68 : $G_{iç-ölü}(s)$ sisteminin birim basamak cevabı.

Şekil 5.68’den görüldüğü üzere sistem cevabı aşım yapmamakta ve sistemin yükselme

zamanı 2.42 saniyedir. Tasarlanacak kontrolörle birlikte kapalı çevrim sistem cevabında yükselme zamanını kısaltarak sistem cevabı hızlandırılacak ve aşırımsız bir sistem cevabı elde edilecek kontrolör tasarımı yapılacaktır. Denklem (4.3)'deki genel iç çevrim transfer ölü zamanlı transfer fonksiyonu ile $G_{iç-ölü}(s)$ 'i birbirine eşitlersek;

$$G_{iç-ölü}(s) = \frac{1}{1.1s+1}e^{-0.148s} = \frac{K_{1m}}{T_{1m}s+1}e^{-L_{1m}s} \quad (5.143)$$

K_{1m} , T_{1m} ve L_{1m} sırasıyla;

$$K_{1m} = 1 \quad (5.144)$$

$$T_{1m} = 1.1 \quad (5.145)$$

$$L_{1m} = 0.148 \quad (5.146)$$

olarak bulunur. Tasarlanan kontrolör kutup-sıfır götürmesini yöntemine dayalı olarak yapılmaktadır. İç çevrim için tasarlanacak kontrolör PI tipi kontrolör olacaktır. $G_{c1}(s)$ PI tipi kontrolörü;

$$G_{c1}(s) = K_{c1} \frac{T_{1m}s+1}{s} = K_{c1} \frac{1.1s+1}{s} \quad (5.147)$$

şeklinde gösterilebilir. K_{c1} kontrolör kazancı ise denklem (5.148)'daki gibi hesaplanabilir.

$$K_{c1} = \frac{1}{(\gamma_1 + \gamma_2)L_{1m}K_{1m}} \quad (5.148)$$

γ_1 parametresinin seçimi için $\frac{T_{1m}}{L_{1m}}$ oranına bakılır. Bu orana bakıldığı zaman,

$$\frac{T_{1m}}{L_{1m}} = \frac{1.1}{0.148} = 7.4324 \quad (5.149)$$

olarak bulunur. Bu oran 1'de büyük olduğu için γ_1 parametresi 0.1 ile 0.5 arasında seçilmelidir. γ_2 parametresinin seçimi ise denklem (5.150)'deki eşitsizliğe göre yapılır.

$$2(\gamma_1 + \gamma_2) > 1 \quad (5.150)$$

$G_{c1}(s)$ kontrolörünün tasarımı için γ_1 ve γ_2 parametreleri sırasıyla;

$$\gamma_1 = 0.4 \quad (5.151)$$

$$\gamma_2 = 5.5 \quad (5.152)$$

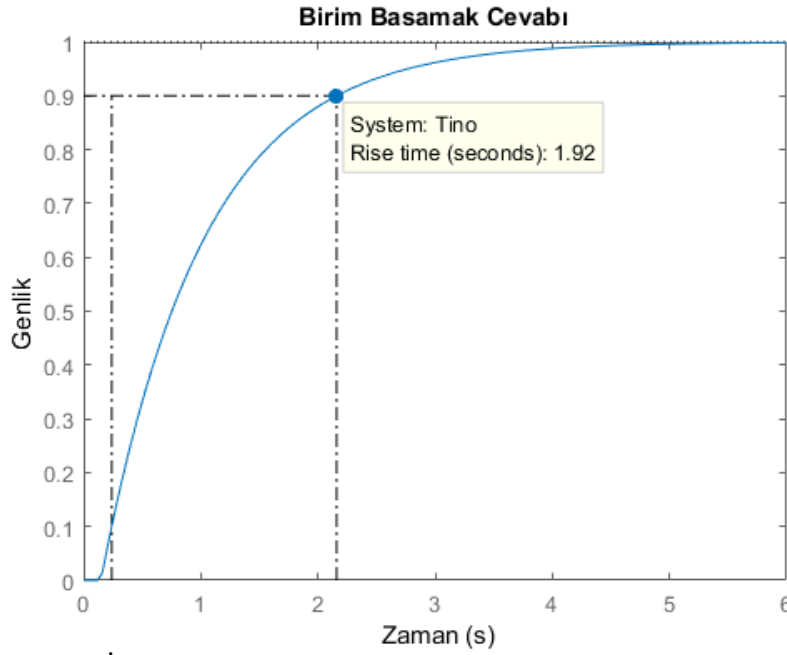
olarak seçilmiştir. Parametrelerin seçiminden sonra $G_{c1}(s)$ PI tipi kontrolörü;

$$G_{c1}(s) = 1.145 \frac{1.1s+1}{s} = \frac{1.26s+1.145}{s} \quad (5.153)$$

olarak bulunur. Bu durum iç çevrim kapalı çevrim transfer fonksiyonu $T_{iç}(s)$;

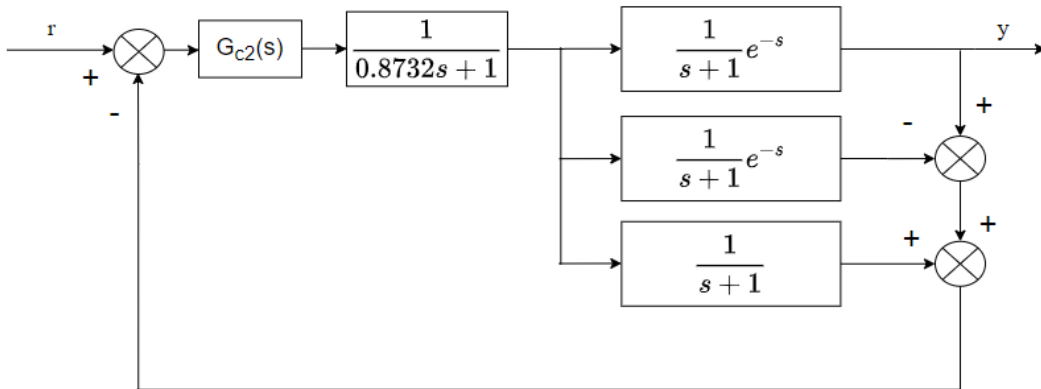
$$T_{iç}(s) = \frac{1}{0.8732s + 1} e^{-0.148s} \quad (5.154)$$

şeklini alır. İç çevrime ait kapalı çevrim sistemin birim basamak cevabı Şekil 5.69’da verilmiştir.



Şekil 5.69 : İç çevrime ait kapalı çevrim sistemin birim basamak cevabı.

Şekil 5.69’den görüldüğü üzere kapalı çevrim sistem birim basamak cevabı aşırımsız ve yükselme zamanı ise 1.92 saniye olmuştur. İç çevrim için kontrolör tasarımı yapıldıktan sonra Şekil 5.67’deki kaskad sistem Şekil 5.70’deki gibi indirgenebilir.

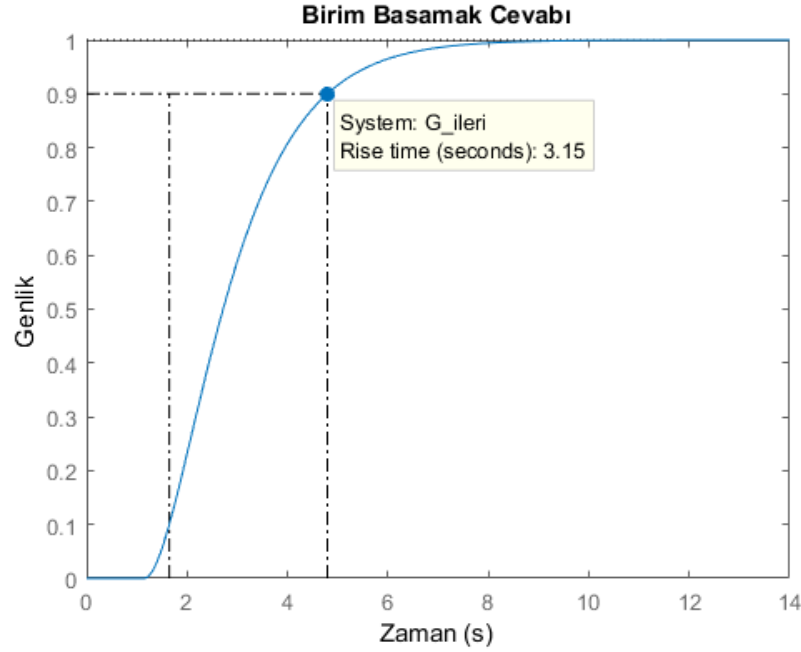


Şekil 5.70 : Dış çevrim için indirgenmiş blok diyagramı.

Şekil 5.70'deki indirgenmiş blok diyagramındaki ileri yoldaki ölü zamansız transfer fonksiyonu;

$$G_{ileri-ölü\ zamansız}(s) = \frac{1}{0.8732 s^2 + 1.873s + 1} \quad (5.155)$$

şeklindedir. $G_{ileri}(s)$ transfer fonksiyonunun birim basamak cevabı Şekil 5.71'de verilmiştir.



Şekil 5.71 : $G_{ileri}(s)$ sisteminin birim basamak cevabı.

Şekil 5.71'den görüldüğü üzere sistem cevabı aşım yapmamakta ve sistemin yükselme zamanı 3.15 saniyedir. Tasarlanacak kontrolörle birlikte kapalı çevrim sistem cevabında aşımsız bir sistem cevabı elde edilecek kontrolör tasarımı yapılacaktır. Dış çevrim için denklem (4.19)'daki genel birinci mertebeden transfer ölü zamanlı transfer fonksiyonu ile $G_{dış-ölü}(s)$ 'i birbirine eşitlersek;

$$G_{dış-ölü}(s) = \frac{1}{s+1}e^{-s} = \frac{K_{2m}}{T_{2m}s+1}e^{-L_{2m}s} \quad (5.156)$$

K_{2m} , T_{2m} ve L_{2m} sırasıyla;

$$K_{2m} = 1 \quad (5.157)$$

$$T_{2m} = 1 \quad (5.158)$$

$$L_{2m} = 1 \quad (5.159)$$

olarak bulunur. Tasarlanan kontrolör kutup-sıfır götürmesini yöntemine dayalı olarak yapılmaktadır. Dış çevrim için tasarlanacak kontrolör PI tipi kontrolör olacaktır. $G_{c2}(s)$

PI tipi kontrolörü;

$$G_{c2}(s) = K_{c2} \frac{T_{2m}s + 1}{s} = K_{c2} \frac{s + 1}{s} \quad (5.160)$$

şeklinde gösterilebilir. K_{c2} kontrolör kazancı ise denklem (5.162)'deki gibi hesaplanabilir.

$$K_{c2} = \frac{1}{4\zeta^2(\gamma_1 + \gamma_2)L_{m1}K_{2m}} \quad (5.161)$$

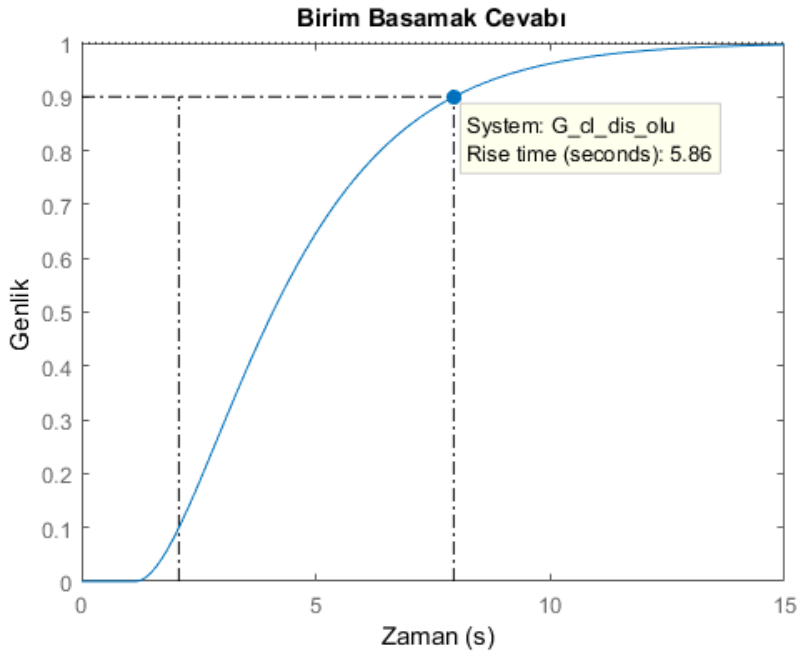
Aşırıdır bir sistem cevabı istenildiği için $\zeta = 1$ olarak seçilir. Parametrelerin seçiminden sonra $G_{c2}(s)$ PI tipi kontrolörü;

$$G_{c2}(s) = 0.2863 \frac{s + 1}{s} = \frac{0.2863s + 0.2863}{s} \quad (5.162)$$

olarak bulunur. Bu durum dış çevrime ait ölü zamanlı kapalı çevrim transfer fonksiyonu;

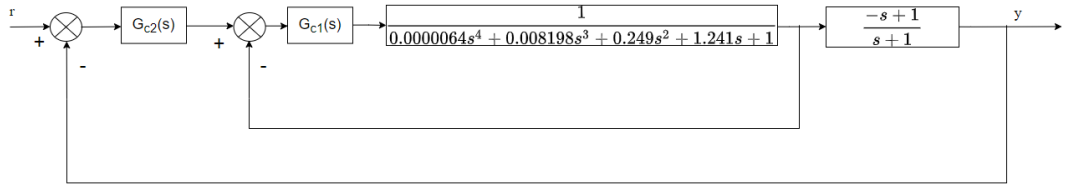
$$G_{cl-dis-ölü}(s) = \frac{0.2863s + 0.2863}{0.8732s^3 + 1.873s^2 + 1.286s + 0.2863} e^{-1.148s} \quad (5.163)$$

şeklini alır. Dış çevrime ait kapalı çevrim sistemin birim basamak cevabı Şekil 5.72'de verilmiştir.



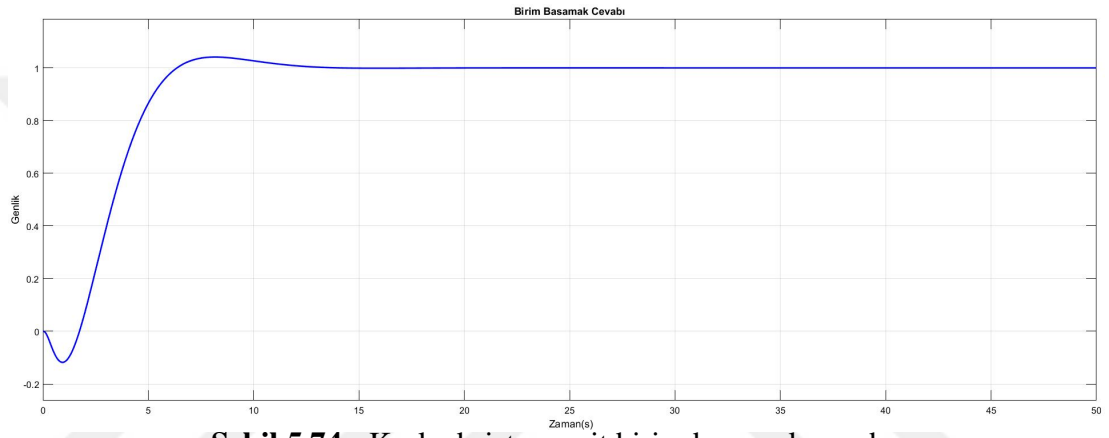
Şekil 5.72 : Dış çevrime ait kapalı çevrim sistemin birim basamak cevabı.

Şekil 5.72'den görüldüğü üzere kapalı çevrim sistem birim basamak cevabı aşırıdır ve yükselme zamanı ise 5.86 saniye olmuştur. Karşılaştırma yapabilmek adına tasarlanan $G_{c1}(s)$ ve $G_{c2}(s)$ kontrolörleriyle birlikte yüksek mertebeden sistemlerle oluşturulan yapı Şekil 5.73'de verilmiştir.



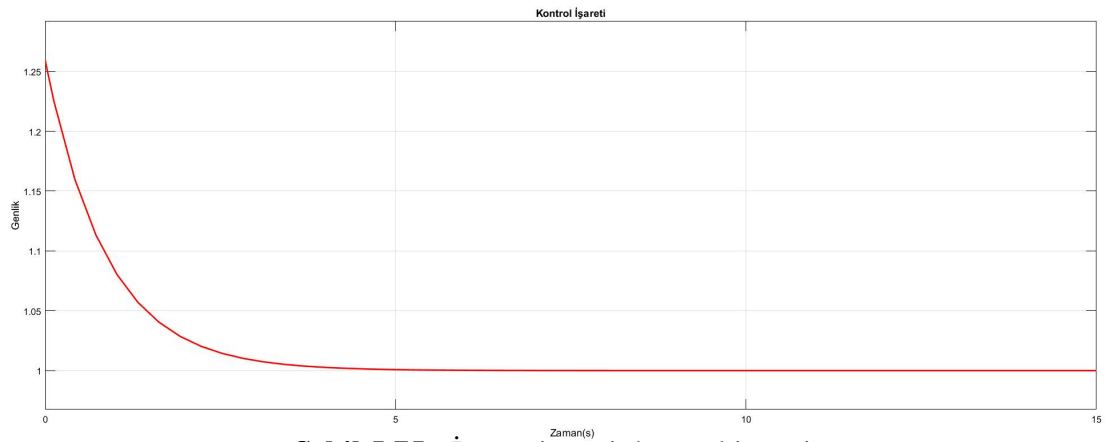
Şekil 5.73 : Yüksek mertebeden sistemler için oluşturulan yapı.

Şekil 5.73’deki blok diyagramında gösterilen kaskad sisteme ait birim basamak cevabı Şekil 5.74’de verilmiştir.



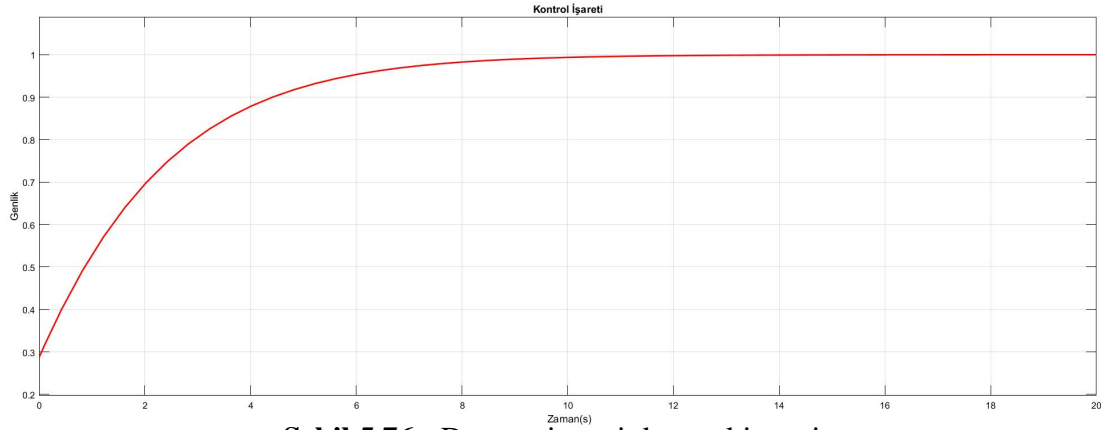
Şekil 5.74 : Kaskad sisteme ait birim basamak cevabı.

Şekil 5.74’den görüldüğü üzere sistem %4.12’lik bir aşım ve %11.81’li bir ters aşım yapmıştır. Sistemin yükselme zamanı ise 3.1637 saniyedir. Bu değer, kapalı çevrim ölü zamanlı sistem sistemin yükselme zamanında daha düşük çıkmıştır. İç çevrime ait kontrol işareti Şekil 5.75’de verilmiştir.



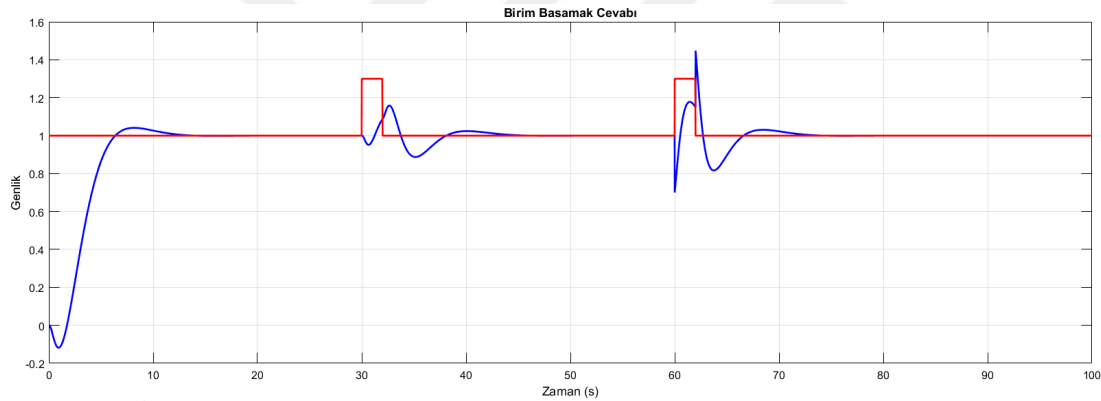
Şekil 5.75 : İç çevrime ait kontrol işareti.

Dış çevrime ait kontrol işareti Şekil 5.76’da verilmiştir.



Şekil 5.76 : Dış çevrime ait kontrol işareti.

Şekil 5.67’de gösterilen d_1 ve d_2 bozucuları sırasıyla 30. ve 60. saniyede verilmiştir. Bozucuların genlikleri 0.3 olup, 2 saniye boyunca sisteme verilmişlerdir. Kaskad Model 3 için d_1 ve d_2 bozucuları etkisinde birim basamak cevabı Şekil 5.77’de verilmiştir.



Şekil 5.77 : Kaskad Model 3’e ait bozuculu birim basamak cevabı.

Şekil 5.77’den görüldüğü üzere sistem d_1 ve d_2 bozucularını bastırmıştır. Sistem d_1 bozucusunu 11.34 saniyede bastırırken, d_2 bozucusunu 9.276 saniyede bastırmıştır. d_1 ve d_2 bozucusuna ait ITSE hata değerleri sırasıyla;

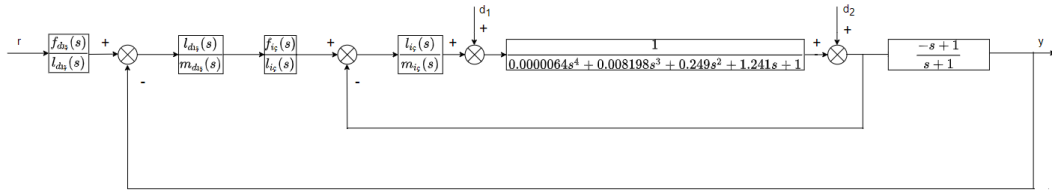
$$ITSE_{d_1} = 1.807$$

$$ITSE_{d_2} = 9.276$$

şeklindedir.

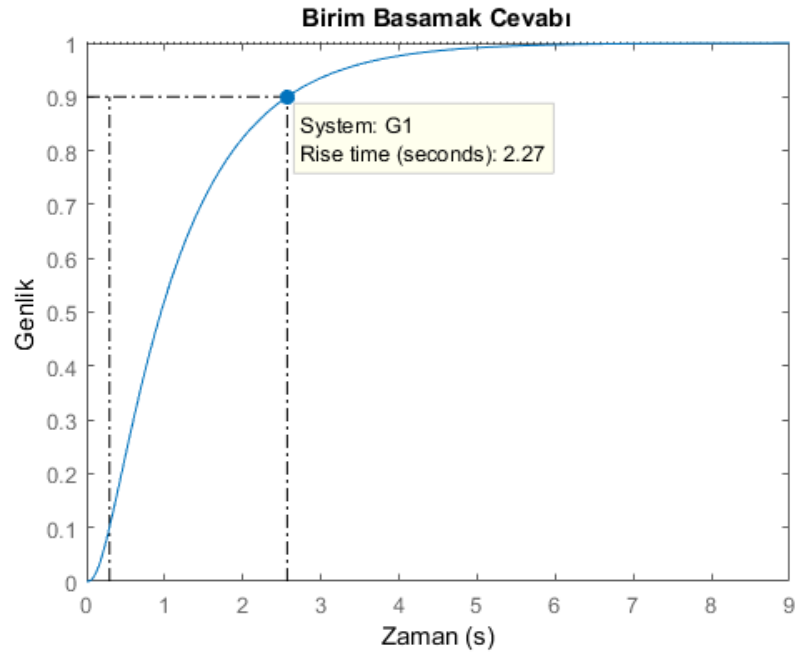
5.3.2 Kaskad model 3 için karakteristik oran atama yöntemiyle kaskad kontrolör tasarımı

Kaskad Model 3 için kaskad indirgenmiş Rİİ kontrolör yapısına ait blok diyagramı Şekil 5.78’de verilmiştir.



Şekil 5.78 : Kaskad Model 3 için kaskad indirgenmiş Rİİ kontrolör yapısına ait blok diyagramı.

$G_{iç}(s)$ transfer fonksiyonunun açık çevrim birim basamak cevabı Şekil 5.79’da verilmiştir.



Şekil 5.79 : $G_{iç}(s)$ sisteminin birim basamak cevabı.

Şekil 5.79’den görüldüğü üzere sistem cevabı aşım yapmamakta ve sistemin yükselme zamanı 2.27 saniyedir. Tasarlanacak kontrolörle birlikte kapalı çevrim sistem cevabında yükselme zamanını kısaltarak sistem cevabı hızlandırılacak ve aşımsız bir sistem cevabı elde edilecek kontrolör tasarımı yapılacaktır. $G_{iç}(s)$ sisteminin mertebesi 4 olmasına rağmen s^4 ’lü terimin katsayısı çok küçük olduğu için ihmal edilebilir. Böylece $G_{iç}(s)$;

$$G_{iç}(s) = \frac{1}{0.008198 s^3 + 0.249 s^2 + 1.241 s + 1} \quad (5.164)$$

şeklinde ifade edilebilir. İndirgenmiş $G_{iç}(s)$ 3.mertebeden bir transfer fonksiyonu olduğu için tasarlanacak kontrolör 2. mertebeden olacaktır. Böylece kapalı çevrim

karakteristik polinomun mertebesi 5 olacaktır. Bu duruma göre kapalı çevrim karakteristik polinomu,

$$m_{iç}(s) = (m_2 s^2 + m_1 s + m_0) \quad (5.165)$$

$$d_{iç}(s) = (0.008198 s^3 + 0.249 s^2 + 1.241 s + 1) \quad (5.166)$$

$$l_{iç}(s) = (l_2 s^2 + l_1 s + l_0) \quad (5.167)$$

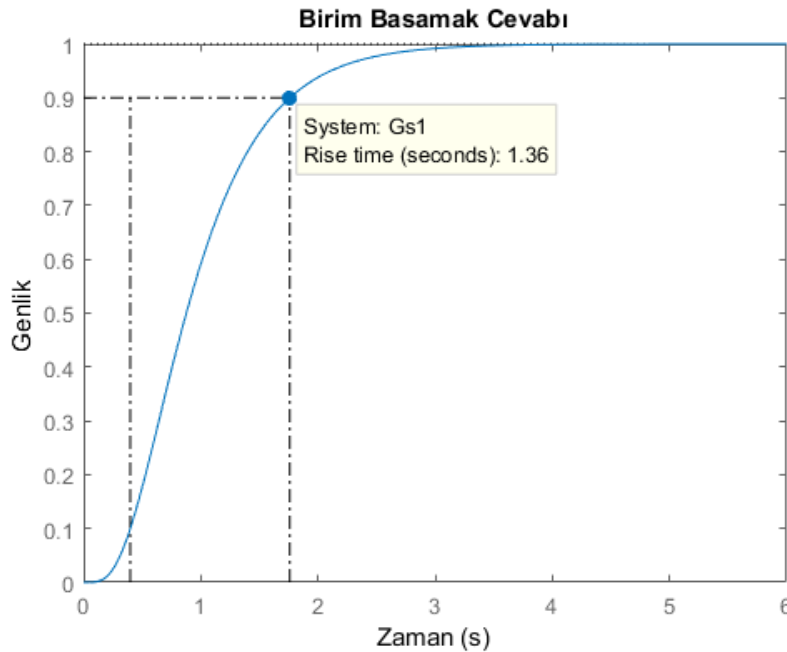
$$n_{iç}(s) = (1) \quad (5.168)$$

olmak üzere

$$p_{iç}(s) = m_{iç}(s) d_{iç}(s) + l_{iç}(s) n_{iç}(s) \quad (5.169)$$

şeklinde ifade edilebilir.

$\tau=1$ ve aşısız bir sistem cevap için $\alpha_1 = 3$ seçildiği durumda, kapalı çevrim sistemin birim basamak cevabı Şekil 5.80’de verilmiştir.



Şekil 5.80 : $\tau=1$ ve $\alpha_1 = 3$ durumunda kapalı çevrim birim basamak cevabı.

Şekil 5.80’den görüldüğü üzere kapalı çevrim sistem birim basamak cevabı aşısız ve yükselme zamanı ise 1.36 saniye olmuştur. İç çevrim için tasarlanan kontrolör sonucunda oluşan kapalı çevrim transfer fonksiyonu;

$$G_{cl-iç}(s) = \frac{1}{4.887 \cdot 10^{-5} s^5 + 0.002591 s^4 + 0.04578 s^3 + 0.3333 s^2 + s + 1} \quad (5.170)$$

olarak bulunur. Kapalı çevrim transfer karakteristik polinomu ise;

$$p_{iç}(s) = 4.887 \cdot 10^{-5} s^5 + 0.002591 s^4 + 0.04578 s^3 + 0.3333 s^2 + s + 1 \quad (5.171)$$

şeklindedir. Bu kapalı çevrimi sağlayacak $m_{iç}(s)$ ve $l_{iç}(s)$ polinomları ise;

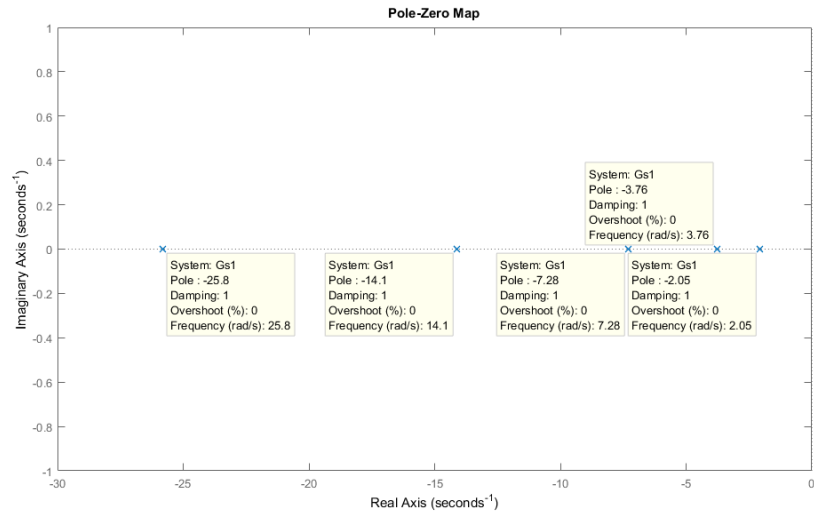
$$m_{iç}(s) = 0.005961 s^2 + 0.135 s + 0.5828 \quad (5.172)$$

$$l_{iç}(s) = 0.01476 s^2 + 0.1417 s + 0.4172 \quad (5.173)$$

olarak bulunur. Kapalı çevrim birim basamak değerinin son değeri 1'e yerleştiği için

$$f_{iç}(s) = 1 \quad (5.174)$$

şeklinde bulunur. İç çevrime ait kapalı çevrim transfer fonksiyonunun kutup-sıfır dağılımı Şekil 5.81'de verilmiştir.



Şekil 5.81 : $G_{cl-iç}(s)$ sisteminin kutup-sıfır dağılımı.

$G_{cl-iç}(s)$ sisteminin kutupları;

$$s_1 = -2.0533 \quad (5.175)$$

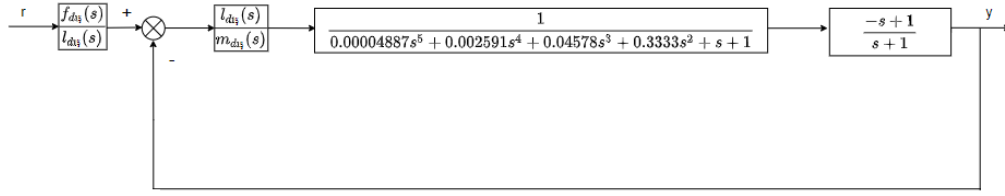
$$s_2 = -3.7595 \quad (5.176)$$

$$s_3 = -7.2812 \quad (5.177)$$

$$s_4 = -14.1018 \quad (5.178)$$

$$s_5 = -25.8194 \quad (5.179)$$

şeklindedir. İç çevrim için kontrolör tasarımı yapıldıktan sonra Şekil 5.78'deki kaskad sistem Şekil 5.82'deki gibi indirgenebilir.

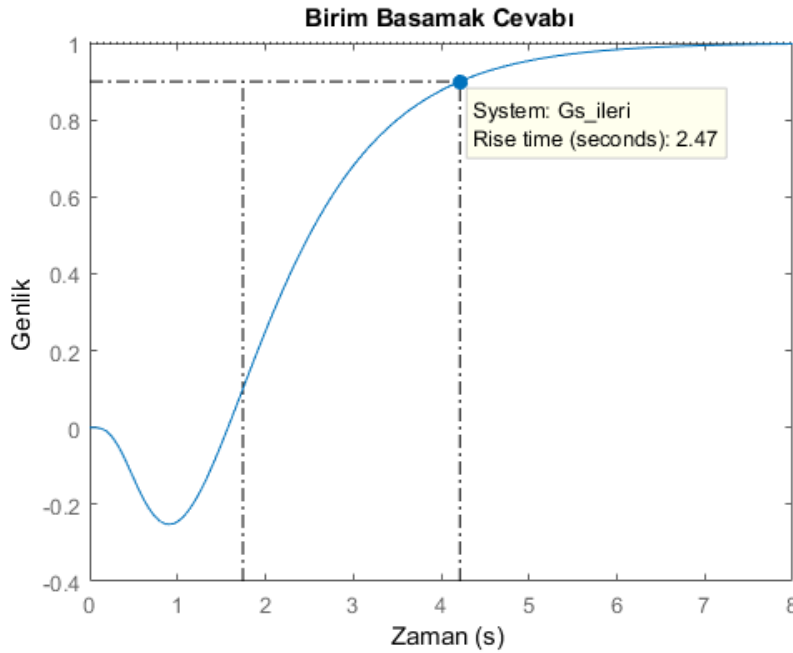


Şekil 5.82 : İndirgenmiş kaskad blok diyagramı.

Şekil 5.82’deki indirgenmiş blok diyagramındaki ileri yoldaki transfer fonksiyonu;

$$G_{ileri}(s) = \frac{-s + 1}{4.887 \cdot 10^{-5} s^6 + 0.002639 s^5 + 0.04837 s^4 + 0.3791 s^3 + 1.333 s^2 + 2 s + 1} \quad (5.180)$$

şeklindedir. $G_{ileri}(s)$ transfer fonksiyonunda 6. mertebenin katsayısı ihmal edilerek sistem 5. mertebeden sisteme indirgenebilir. 5. mertebeden $G_{ileri}(s)$ transfer fonksiyonun birim basamak cevabı Şekil 5.83’de verilmiştir.



Şekil 5.83 : $G_{ileri}(s)$ sisteminin birim basamak cevabı.

Şekil 5.83’den görüldüğü üzere sistem cevabı aşım yapmamaktadır. $G_{ileri}(s)$ sisteminin $s=1$ ’deki sağ-yarı düzlemdeki sıfırı olması nedeniyle sistem %25.18’lik bir ters aşım yapmaktadır. Buna ek olarak sistemin yükselme zamanı 2.47 saniyedir. Tasarlanacak kontrolörle birlikte kapalı çevrim sistem cevabında yükselme zamanını artırarak ters aşımın azalacağı bir sistem cevabı elde edilecek kontrolör tasarımı

yapılacaktır. İleri yoldaki sistem 5. mertebeden bir sistem olduğu için tasarlanacak kontrolör 4. mertebeden olacaktır. Böylece dış çevrim ait kapalı çevrim karakteristik polinomun mertebesi 9 olacaktır. Bu duruma göre kapalı çevrim karakteristik polinomu,

$$m_{dış}(s) = (m_4s^4 + m_3s^3 + m_2s^2 + m_1s + m_0) \quad (5.181)$$

$$d_{dış}(s) = (0.002639 s^5 + 0.04837 s^4 + 0.3791 s^3 + 1.333 s^2 + 2 s + 1) \quad (5.182)$$

$$l_{iç}(s) = (l_4s^4 + l_3s^3 + l_2s^2 + l_1s + l_0) \quad (5.183)$$

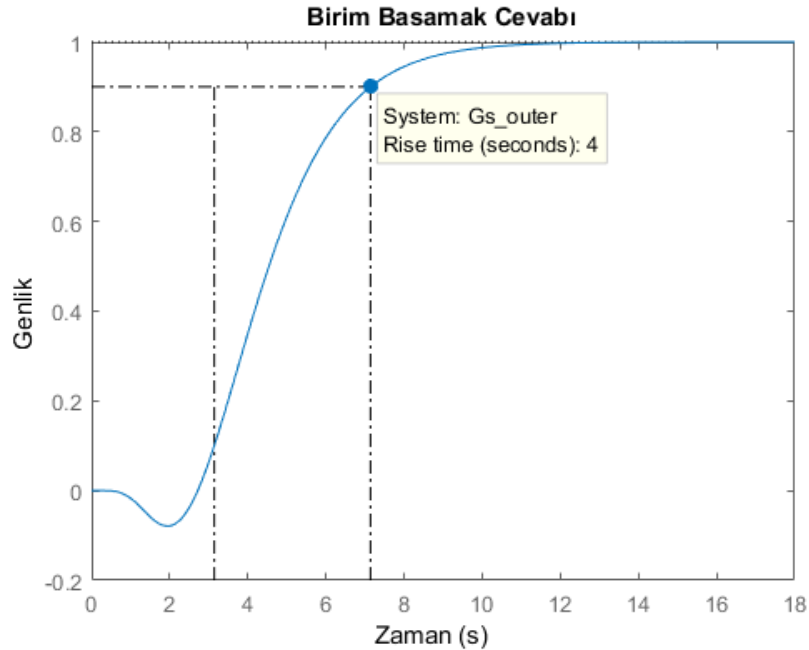
$$n_{dış}(s) = (-s + 1) \quad (5.184)$$

olmak üzere

$$p_{dış}(s) = m_{dış}(s) d_{dış}(s) + l_{dış}(s) n_{dış}(s) \quad (5.185)$$

şeklinde ifade edilebilir.

$\tau=4$ ve aşısız bir sistem cevap için $\alpha_1 = 2.5$ seçildiği durumda, kapalı çevrim sistemin birim basamak cevabı Şekil 5.84’de verilmiştir.



Şekil 5.84 : $\tau=4$ ve $\alpha_1 = 2.5$ durumunda kapalı çevrim birim basamak cevabı.

Şekil 5.84’den görüldüğü üzere kapalı çevrim sistem birim basamak cevabının ters aşımı %7.9’a düşürülmüş, buna ek olarak aşısız ve yükselme zamanı ise 4 saniye olan bir sistem cevabı elde edilmiştir. Dış çevrim için tasarlanan kontrolör sonucunda

oluşan kapalı çevrim transfer fonksiyonu;

$$G_{cl-dış}(s) = \frac{-s + 1}{1.221 \cdot 10^{-5} s^9 + 0.0006035 s^8 + 0.01193 s^7 + 0.1231 s^6 + 0.7289 s^5 + 2.562 s^4 + 5.347 s^3 + 6.4 s^2 + 4 s + 1} \quad (5.186)$$

olarak bulunur. Kapalı çevrim transfer karakteristik polinomu ise;

$$p_{dış}(s) = 1.221 \cdot 10^{-5} s^9 + 0.0006035 s^8 + 0.01193 s^7 + 0.1231 s^6 + 0.7289 s^5 + 2.562 s^4 + 5.347 s^3 + 6.4 s^2 + 4 s + 1 \quad (5.187)$$

şeklindedir. Bu kapalı çevrimi sağlayacak $m_{dış}(s)$ ve $l_{dış}(s)$ polinomları ise;

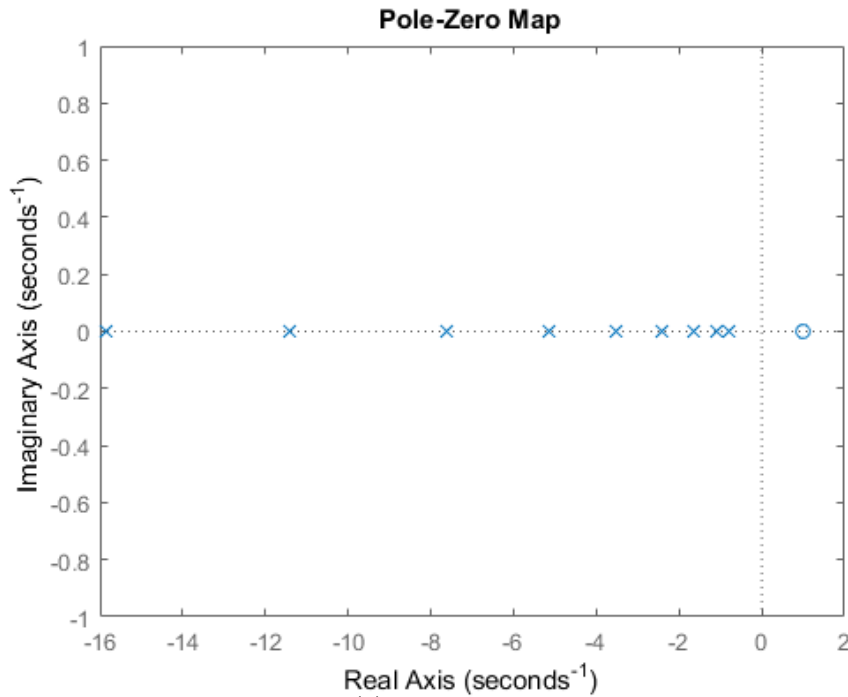
$$m_{dış}(s) = 0.00463 s^4 + 0.144 s^3 + 1.22 s^2 + 1.32 s + 1.55 \quad (5.188)$$

$$l_{dış}(s) = 0.00191 s^4 - 0.0692 s^3 - 0.493 s^2 - 0.973 s - 0.553 \quad (5.189)$$

olarak bulunur. Kapalı çevrim birim basamak değerinin son değeri 1'e yerleştiği için

$$f_{dış}(s) = 1 \quad (5.190)$$

şeklinde bulunur. Dış çevrime ait kapalı çevrim transfer fonksiyonunun kutup-sıfır dağılımı Şekil 5.85'de verilmiştir.



Şekil 5.85 : $G_{cl-dış}(s)$ sisteminin kutup-sıfır dağılımı.

$G_{cl-dış}(s)$ sisteminin kutupları;

$$s_1 = -0.778984 \quad (5.191)$$

$$s_2 = -1.0834 \quad (5.192)$$

$$s_3 = -1.62573 \quad (5.193)$$

$$s_4 = -2.39595 \quad (5.194)$$

$$s_5 = -3.51487 \quad (5.195)$$

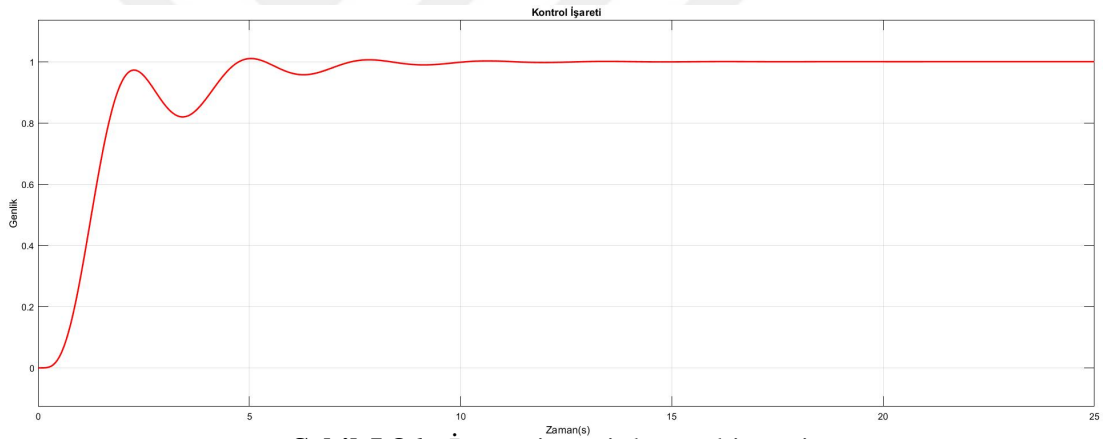
$$s_6 = -5.15634 \quad (5.196)$$

$$s_7 = -7.59924 \quad (5.197)$$

$$s_8 = -11.4033 \quad (5.198)$$

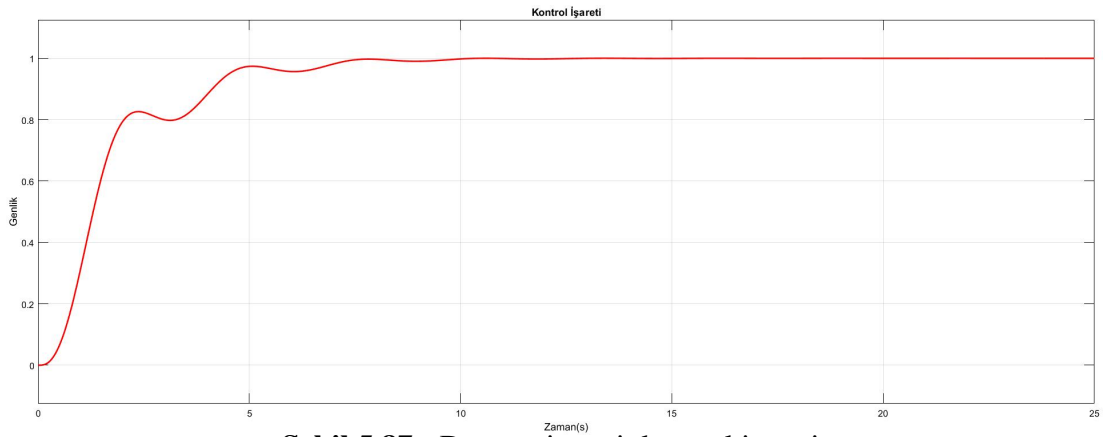
$$s_9 = -15.8596 \quad (5.199)$$

şeklindedir. Bunlara ek olarak dış sistemden gelen $s=1$ 'deki sağ-yarı düzlemde sıfırı bulunmaktadır. İç çevrime ait kontrol işareti Şekil 5.86'da verilmiştir.



Şekil 5.86 : İç çevrime ait kontrol işareti.

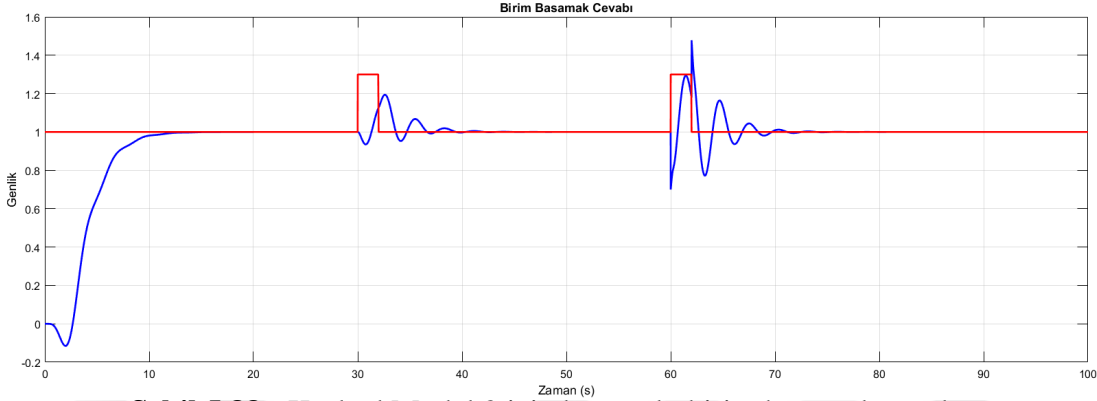
Dış çevrime ait kontrol işareti Şekil 5.87'de verilmiştir.



Şekil 5.87 : Dış çevrime ait kontrol işareti.

Şekil 5.78'de gösterilen d_1 ve d_2 bozucuları sırasıyla 30. ve 60. saniyede verilmiştir.

Bozucuların genlikleri 0.3 olup, 2 saniye boyunca sisteme verilmişlerdir. Kaskad Model 3 için d_1 ve d_2 bozucuları etkisinde birim basamak cevabı Şekil 5.88’de verilmiştir.



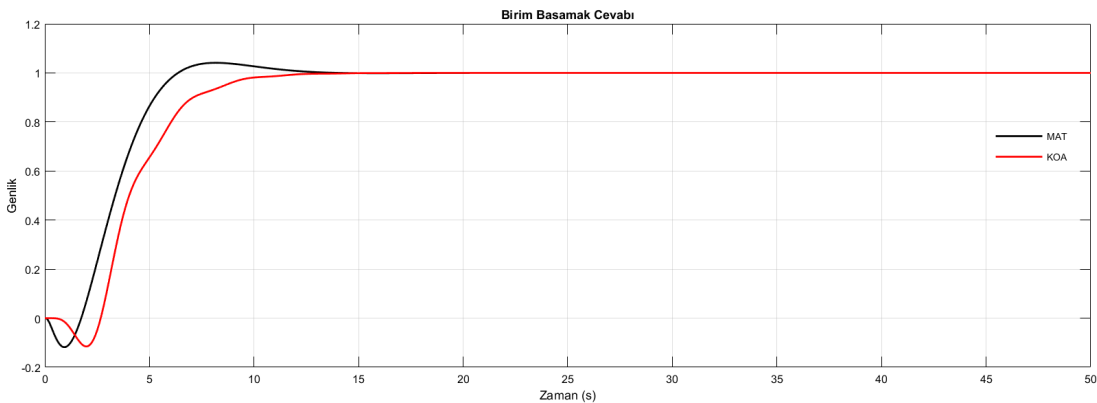
Şekil 5.88 : Kaskad Model 3 için bozuculu birim basamak cevabı.

Şekil 5.88’den görüldüğü üzere sistem d_1 ve d_2 bozucusunu bastırmıştır. Sistem d_1 bozucusunu 5.32 saniyede bastırırken, d_2 bozucusunu 8.06 saniyede bastırmıştır. d_1 ve d_2 bozucusuna ait ITSE hata değerleri sırasıyla;

$$ITSE_{d_1} = 1.561$$

$$ITSE_{d_2} = 12.28$$

şeklindedir. Kaskad Model 3 için tasarlanan kontrolör sonucundaki kapalı çevrim basamakları Şekil 5.89’da toplu olarak verilmiştir.



Şekil 5.89 : 3. kaskad sisteme ait birim basamak cevapları.

Sistemin referans takip başarımı için ITSE kriteri kullanılmıştır. Tasarlanan kontrolörlere göre ait ITSE hata değerleri sırasıyla;

$$ITSE_{MAT} = 4.722$$

$$ITSE_{KOA} = 7.924$$

şeklinde. Hata değerlerinden görüldüğü üzere en az hata değeri MAT yöntemiyle tasarlanan kontrolörle elde edilmiştir. Tasarlanan 3 kontrolör için sistemin zaman bölgesi karakteristiklerinin karşılaştırılması Çizelge 5.6’da verilmiştir.

Çizelge 5.6 : Kaskad Model 3 için zaman bölgesi karakteristiklerinin karşılaştırılması

	MAT	KOA
Yükselme Zamanı (s)	3.1637	4.1552
Aşım (%)	4.1156	0
Ters Aşım (%)	11.8091	7.8963
Yerleşme Zamanı (s)	10.4011	9.6785

Çizelge 5.6’dan görüldüğü üzere kaskad sistem KOA yöntemiyle aşım yapmamışken MAT kontrolörlü sistem %4.12’lik bir aşım yapmıştır. En ters aşım yine KOA yöntemiyle tasarlanan kontrolörle elde edilmiştir. En düşük yükselme zamanı MAT kaskad kontrolör tasarımıyla elde edilirken, KOA yöntemiyle kaskad sistemin yerleşme zamanı göre daha kısadır. Tasarlanan 2 kontrolörde de sistem d_1 ve d_2 bozucularını bastırmıştır. Kaskad Model 3 için bozucu bastırma süreleri ve ITSE hata değerleri Çizelge 5.7’de verilmiştir.

Çizelge 5.7 : Kaskad Model 3 için bozucu bastırma başarımları

Kriterler	MAT		KOA	
	Bastırma Süresi (s)	ITSE	Bastırma Süresi (s)	ITSE
d_1 bozucusu	11.34	1.807	6.32	1.561
d_2 bozucusu	10.37	9.276	8.06	12.8

Çizelge 5.7’e bakıldığı zaman en az ITSE değerleri d_1 bozucusu için KOA yöntemiyle elde edilirken, d_2 bozucusu için ise MAT kontrolör tasarımında elde edilmiştir. d_1 ve d_2 bozucuları ise en hızlı KOA yöntemiyle tasarlanan kontrolörle bastırılmıştır.

5.4 “Kaskad Model 4” için Kaskad Kontrolör Tasarımı

5.4.1 Model ayrıştırma temelli kaskad kontrolör tasarımı

5.4.1.1 İç ve dış çevrimde ölü zamanlı birinci mertebeden modellerin kullanılması

Kaskad Model 4’de bulunan iç ve dış çevrimdeki sistemlerin transfer fonksiyonları sırasıyla;

$$G_{iç}(s) = \frac{-0.3s + 1}{s^3 + 3s^2 + 3s + 1} \quad (5.200)$$

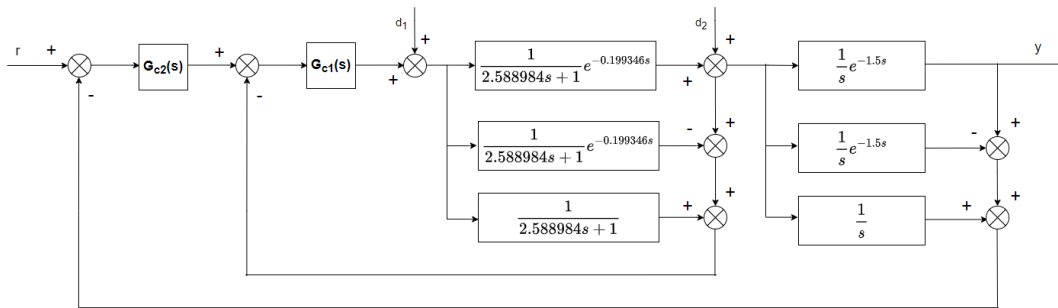
$$G_{dış}(s) = \frac{-s + 1}{s + 1} \quad (5.201)$$

şeklindedir. Yüksek mertebeden iç ve dış çevrimdeki sistemlerin birinci mertebeden ölü zamanlı modelleri sırasıyla,

$$G_{iç-ölü}(s) = \frac{1}{2.588984s + 1} e^{-0.199346s} \quad (5.202)$$

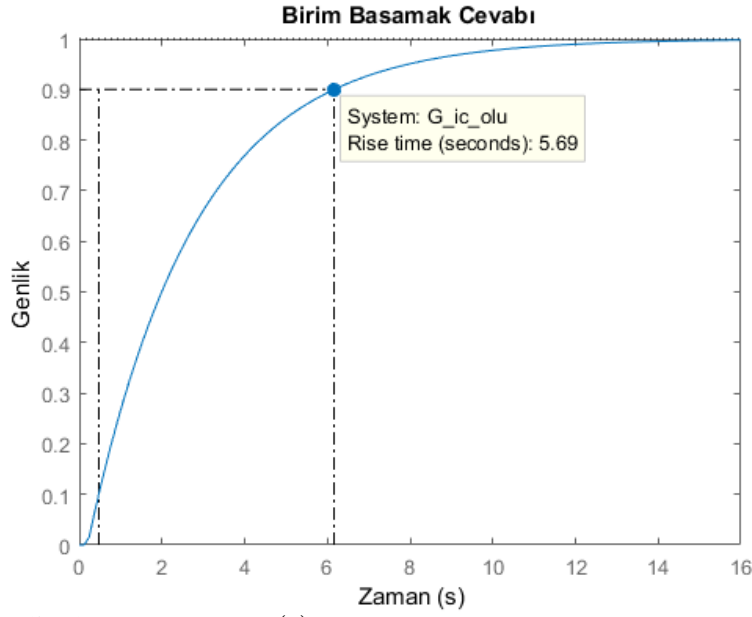
$$G_{dış-ölü}(s) = \frac{1}{s} e^{-1.5s} \quad (5.203)$$

şeklindedir [39, 40]. Kaskad Sistem 4 için MAT kaskad kontrolör yapısına ait blok diyagramı Şekil 5.90’da verilmiştir.



Şekil 5.90 : Kaskad Sistem 4 için MAT kaskad blok diyagramı.

$G_{iç-ölü}(s)$ transfer fonksiyonunun açık çevrim birim basamak cevabı Şekil 5.91’de verilmiştir.



Şekil 5.91 : $G_{i\check{c}-\ddot{o}l\ddot{u}}(s)$ sisteminin birim basamak cevabı.

Şekil 5.91’den görüldüğü üzere sistem cevabı aşım yapmamakta ve sistemin yükselme zamanı 5.69 saniyedir. Tasarlanacak kontrolörle birlikte kapalı çevrim sistem cevabında yükselme zamanını kısaltarak sistem cevabı hızlandırılacak ve aşımsız bir sistem cevabı elde edilecek kontrolör tasarımı yapılacaktır. Denklem (4.3)’teki genel iç çevrim transfer ölü zamanlı transfer fonksiyonu ile $G_{i\check{c}-\ddot{o}l\ddot{u}}(s)$ ’i birbirine eşitlersek;

$$G_{i\check{c}-\ddot{o}l\ddot{u}}(s) = \frac{1}{2.588984s + 1} e^{-0.199346s} = \frac{K_{1m}}{T_{1m}s + 1} e^{-L_{1m}s} \quad (5.204)$$

K_{1m} , T_{1m} ve L_{1m} sırasıyla;

$$K_{1m} = 1 \quad (5.205)$$

$$T_{1m} = 2.588984 \quad (5.206)$$

$$L_{1m} = 0.199346 \quad (5.207)$$

olarak bulunur. Tasarlanan kontrolör kutup-sıfır götürmesini yöntemine dayalı olarak yapılmaktadır. İç çevrim için tasarlanacak kontrolör PI tipi kontrolör olacaktır. $G_{c1}(s)$ PI tipi kontrolörü;

$$G_{c1}(s) = K_{c1} \frac{T_{1m}s + 1}{s} = K_{c1} \frac{2.588984s + 1}{s} \quad (5.208)$$

şeklinde gösterilebilir. K_{c1} kontrolör kazancı ise denklem (5.209)’daki gibi hesaplanabilir.

$$K_{c1} = \frac{1}{(\gamma_1 + \gamma_2)L_{1m}K_{1m}} \quad (5.209)$$

γ_1 parametresinin seçimi için $\frac{T_{1m}}{L_{1m}}$ oranına bakılır. Bu orana bakıldığı zaman,

$$\frac{T_{1m}}{L_{1m}} = \frac{2.588984}{0.199346} = 12.9874 \quad (5.210)$$

olarak bulunur. Bu oran 1’de büyük olduğu için γ_1 parametresi 0.1 ile 0.5 arasında seçilmelidir. γ_2 parametresinin seçimi ise denklem (5.211)’deki eşitsizliğe göre yapılır.

$$2(\gamma_1 + \gamma_2) > 1 \quad (5.211)$$

$G_{c1}(s)$ kontrolörünün tasarımı için γ_1 ve γ_2 parametreleri sırasıyla;

$$\gamma_1 = 0.4 \quad (5.212)$$

$$\gamma_2 = 8 \quad (5.213)$$

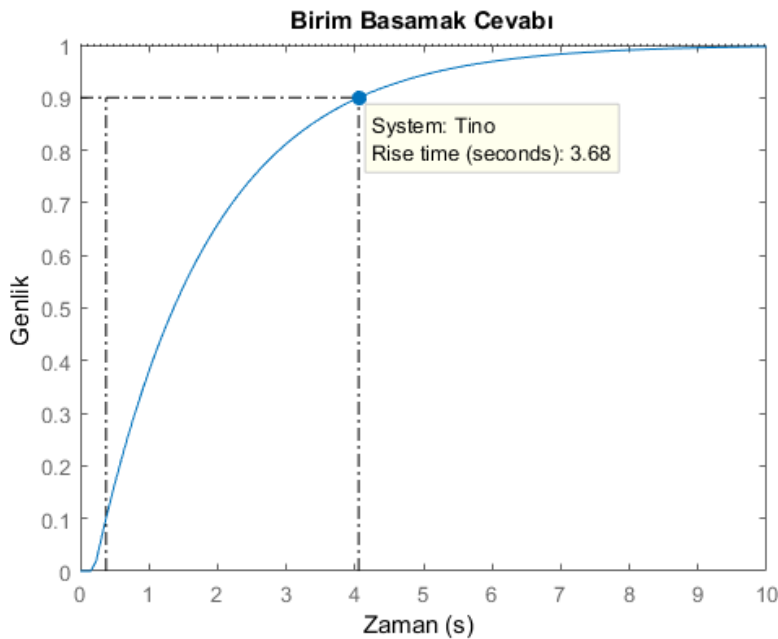
olarak seçilmiştir. Parametrelerin seçiminden sonra $G_{c1}(s)$ PI tipi kontrolörü;

$$G_{c1}(s) = 0.5972 \frac{2.588984s + 1}{s} = \frac{1.546s + 0.5972}{s} \quad (5.214)$$

olarak bulunur. Bu durum iç çevrim kapalı çevrim transfer fonksiyonu $T_{iç}(s)$;

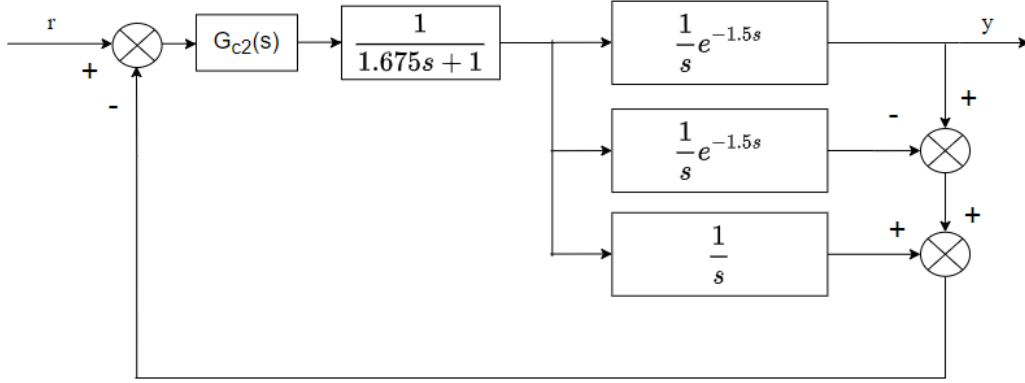
$$T_{iç}(s) = \frac{1}{1.675s + 1} e^{-0.199346s} \quad (5.215)$$

şeklini alır. İç çevrime ait kapalı çevrim sistemin birim basamak cevabı Şekil 5.92’de verilmiştir.



Şekil 5.92 : İç çevrime ait kapalı çevrim sistemin birim basamak cevabı.

Şekil 5.92'den görüldüğü üzere kapalı çevrim sistem birim basamak cevabı aşırı ve yükselme zamanı ise 3.68 saniye olmuştur. İç çevrim için kontrolör tasarımı yapıldıktan sonra Şekil 5.90'daki kaskad sistem Şekil 5.93'deki gibi indirgenebilir.

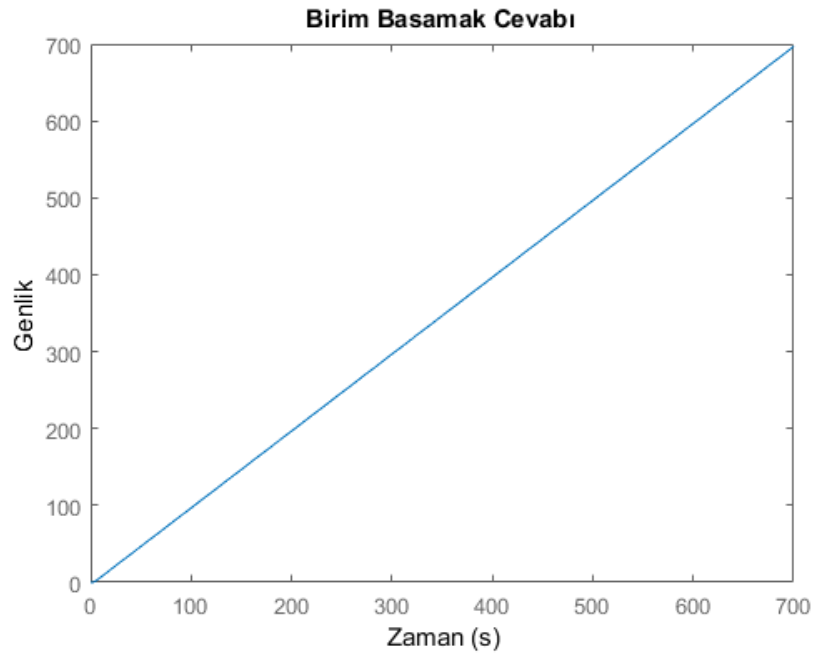


Şekil 5.93 : Dış çevrim için indirgenmiş blok diyagramı.

Şekil 5.93'deki indirgenmiş blok diyagramındaki ileri yoldaki ölü zamansız transfer fonksiyonu;

$$G_{\text{ileri-ölü zamansız}}(s) = \frac{1}{1.675 s^2 + s} \quad (5.216)$$

şeklindedir. $G_{\text{ileri}}(s)$ transfer fonksiyonunun birim basamak cevabı Şekil 5.94'de verilmiştir.



Şekil 5.94 : $G_{\text{ileri}}(s)$ sisteminin birim basamak cevabı.

Şekil 5.94'den görüldüğü üzere integratör etkisinden dolayı birim basamak cevabı

sonsuzla gitmektedir. Tasarlanacak kontrolörle birlikte kapalı çevrim sistem cevabında yükselme zamanını kısaltarak sistem cevabı hızlandırılacak ve dış çevrimdeki sistem için amaçlanan aşısız bir sistem cevabı elde edilecek kontrolör tasarımı yapılacaktır. Dış çevrim için denklem (4.19)'daki genel birinci mertebeden transfer ölü zamanlı transfer fonksiyonu ile $G_{dış-ölü}(s)$ 'i birbirine eşitlersek;

$$G_{dış-ölü}(s) = \frac{1}{s} e^{-1.5s} = \frac{K_{2m}}{T_{2m}s + 1} e^{-L_{2m}s} \quad (5.217)$$

K_{2m} , T_{2m} ve L_{2m} sırasıyla;

$$K_{2m} = 1 \quad (5.218)$$

$$T_{2m} = 1 \quad (5.219)$$

$$L_{2m} = 1.5 \quad (5.220)$$

olarak bulunur. Tasarlanan kontrolör kutup-sıfır götürmesini yöntemine dayalı olarak yapılmaktadır. Dış çevrim için tasarlanacak kontrolör sistem integratöre sahip olduğu için P tipi kontrolör olacaktır. $G_{c2}(s)$ P tipi kontrolörü;

$$G_{c2}(s) = K_{c2} \quad (5.221)$$

şeklinde gösterilebilir. K_{c2} kontrolör kazancı ise denklem (5.224)'deki gibi hesaplanabilir.

$$K_{c2} = \frac{1}{4\zeta^2(\gamma_1 + \gamma_2)L_{m1}K_{2m}} \quad (5.222)$$

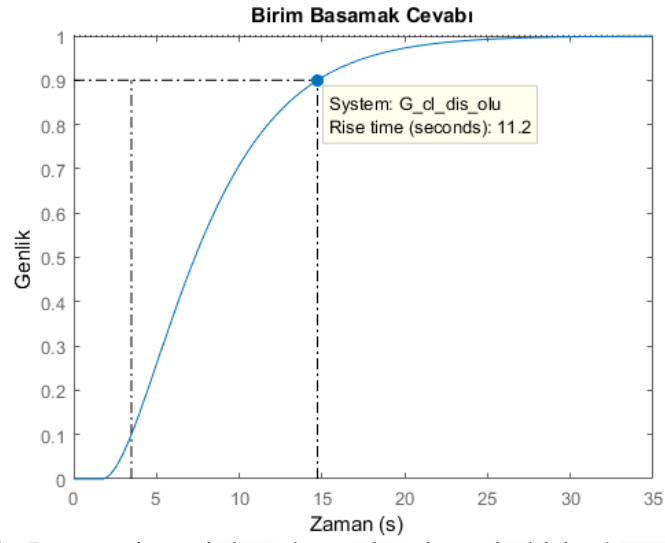
Aşısız bir sistem cevabı istenildiği için $\zeta = 1$ olarak seçilir. Parametrelerin seçiminden sonra $G_{c2}(s)$ P tipi kontrolörü;

$$G_{c2}(s) = 0.1493 \quad (5.223)$$

olarak bulunur. Bu durum dış çevrime ait ölü zamanlı kapalı çevrim transfer fonksiyonu;

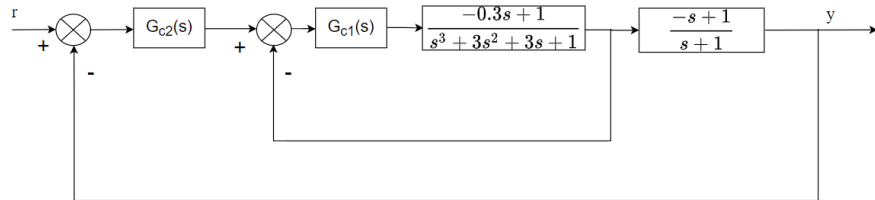
$$G_{cl-dış-ölü}(s) = \frac{0.08916}{s^2 + 0.5972s + 0.08916} e^{-1.699346s} \quad (5.224)$$

şeklini alır. Dış çevrime ait kapalı çevrim sistemin birim basamak cevabı Şekil 5.95'de verilmiştir.



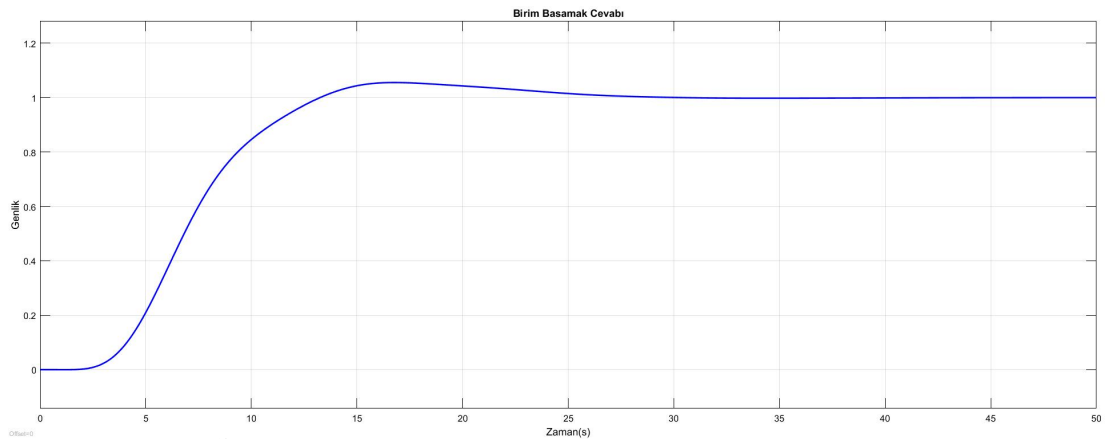
Şekil 5.95 : Dış çevrime ait kapalı çevrim sistemin birim basamak cevabı.

Şekil 5.95’den görüldüğü üzere kapalı çevrim sistem birim basamak cevabı aşırı ve yükselme zamanı ise 11.2 saniye olmuştur. Karşılaştırma yapabilmek adına tasarlanan $G_{c1}(s)$ ve $G_{c2}(s)$ kontrolörleriyle birlikte yüksek mertebeden sistemlerle oluşturulan SKKY Şekil 5.96’da verilmiştir.



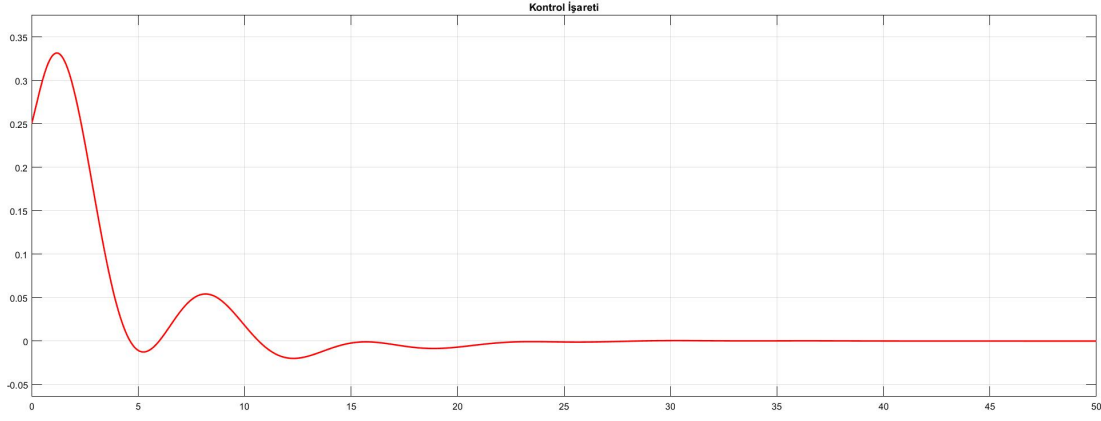
Şekil 5.96 : Yüksek mertebeden sistemler için oluşturulan SKKY.

Şekil 5.96’daki blok diyagramında gösterilen kaskad sisteme ait birim basamak cevabı Şekil 5.97’de verilmiştir.



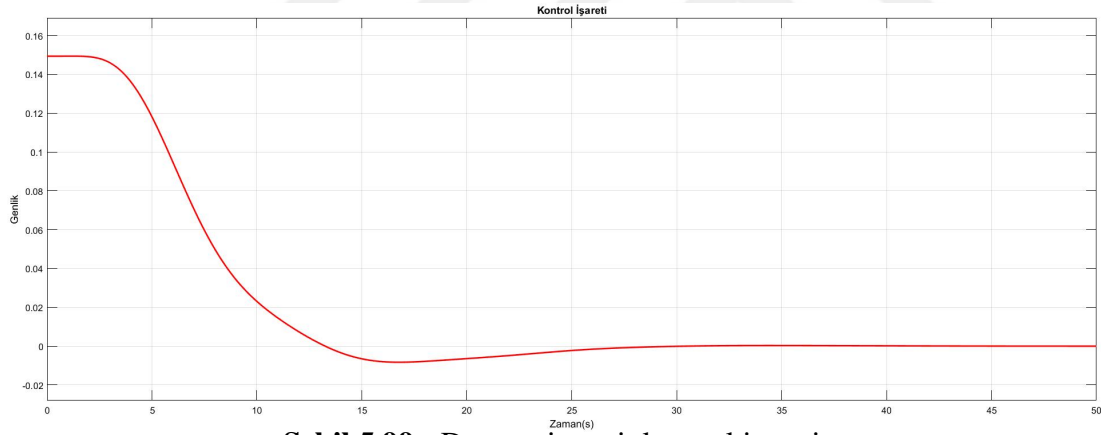
Şekil 5.97 : Kaskad sisteme ait birim basamak cevabı.

Şekil 5.97’den görüldüğü üzere sistem %6.53’lük bir aşım yapmıştır. Sistemin yükselme zamanı ise 5.9077 saniyedir. Bu değer, kapalı çevrim ölü zamanlı sistem sistemin yükselme zamanında daha düşük çıkmıştır. SKKY’nin iç çevrimine ait kontrol işareti Şekil 5.98’de verilmiştir.



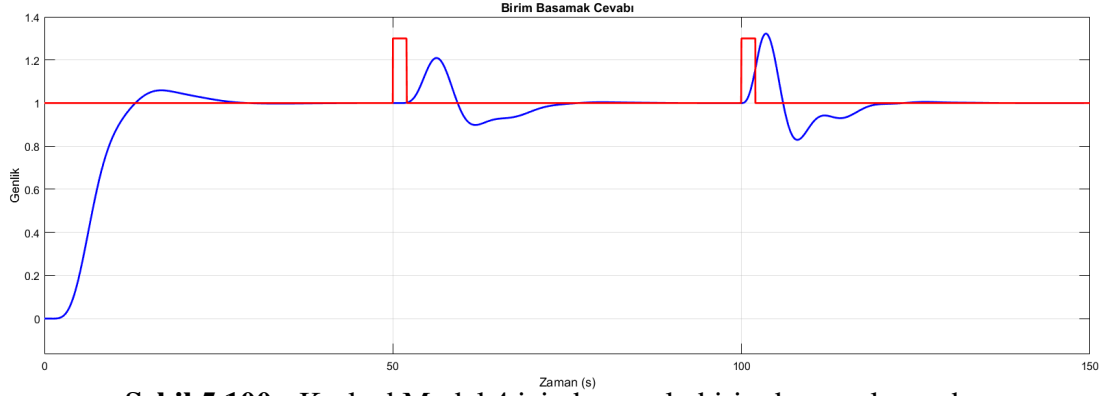
Şekil 5.98 : İç çevrime ait kontrol işareti.

Dış çevrime ait kontrol işareti Şekil 5.99’da verilmiştir.



Şekil 5.99 : Dış çevrime ait kontrol işareti.

Şekil 5.90’da gösterilen d_1 ve d_2 bozucuları sırasıyla 50. ve 100. saniyede verilmiştir. Bozucuların genlikleri 0.3 olup, 2 saniye boyunca sisteme verilmişlerdir. Kaskad Model 4 için d_1 ve d_2 bozucuları etkisinde birim basamak cevabı Şekil 5.100’de verilmiştir.



Şekil 5.100 : Kaskad Model 4 için bozuculu birim basamak cevabı.

Şekil 5.100'den görüldüğü üzere sistem d_1 ve d_2 bozucularını bastırmıştır. Sistem d_1 bozucusunu 21.56 saniyede bastırırken, d_2 bozucusunu 17.9 saniyede bastırmıştır. d_1 ve d_2 bozucusuna ait ITSE hata değerleri sırasıyla;

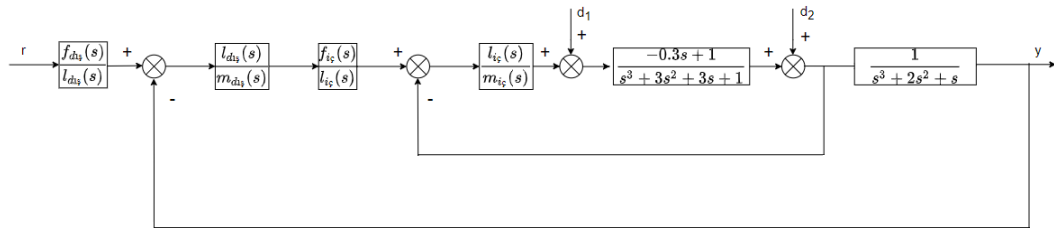
$$ITSE_{d_1} = 10.98$$

$$ITSE_{d_2} = 35.88$$

şeklindedir.

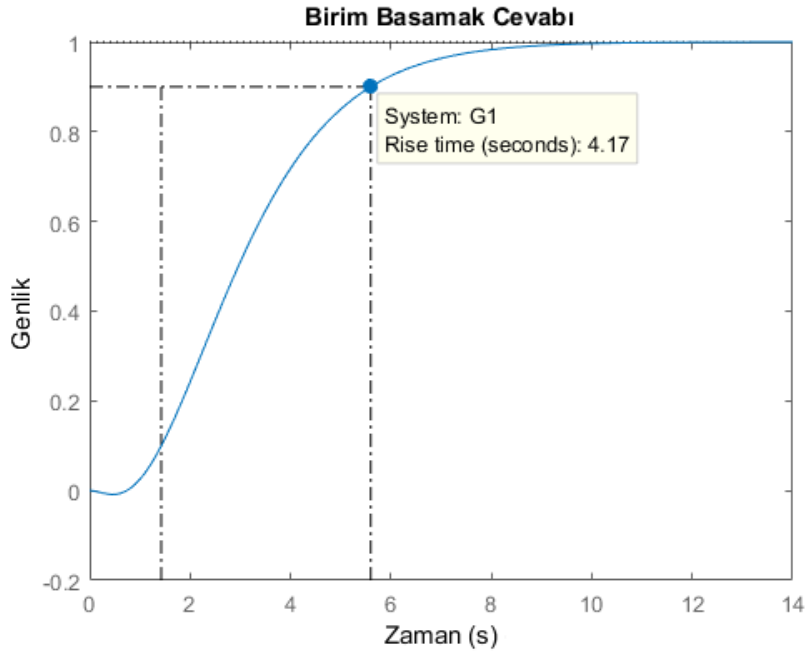
5.4.2 Kaskad model 4 için karakteristik oran atama yöntemiyle kaskad kontrolör tasarımı

Kaskad Model 4 için kaskad indirgenmiş Rİİ kontrolör yapısına ait blok diyagramı Şekil 5.101'de verilmiştir.



Şekil 5.101 : 4.kaskad sistem için kaskad indirgenmiş Rİİ kontrolör yapısına ait blok diyagramı.

$G_{i\bar{c}}(s)$ transfer fonksiyonunun açık çevrim birim basamak cevabı Şekil 5.102'de verilmiştir.



Şekil 5.102 : $G_{iç}(s)$ sisteminin birim basamak cevabı.

Şekil 5.102'den görüldüğü üzere sistem cevabı aşım yapmamakta ve sistemin yükselme zamanı 4.17 saniyedir. Sistem sağ-yarı düzlemde sıfırı olduğu için %0.85'lik bir ters aşım yapmıştır. Tasarlanacak kontrolörle birlikte kapalı çevrim sistem cevabında yükselme zamanını kısaltarak sistem cevabı hızlandırılacak ve aşımsız bir sistem cevabı elde edilecek kontrolör tasarımı yapılacaktır. Sistem 3. mertebeden bir sistem olduğu için tasarlanacak kontrolör 2. mertebeden olacaktır. Böylece kapalı çevrim karakteristik polinomun mertebesi 5 olacaktır. Bu duruma göre kapalı çevrim karakteristik polinomu,

$$m_{iç}(s) = (m_2 s^2 + m_1 s + m_0) \quad (5.225)$$

$$d_{iç}(s) = (s^3 + 3 s^2 + 3 s + 1) \quad (5.226)$$

$$l_{iç}(s) = (l_2 s^2 + l_1 s + l_0) \quad (5.227)$$

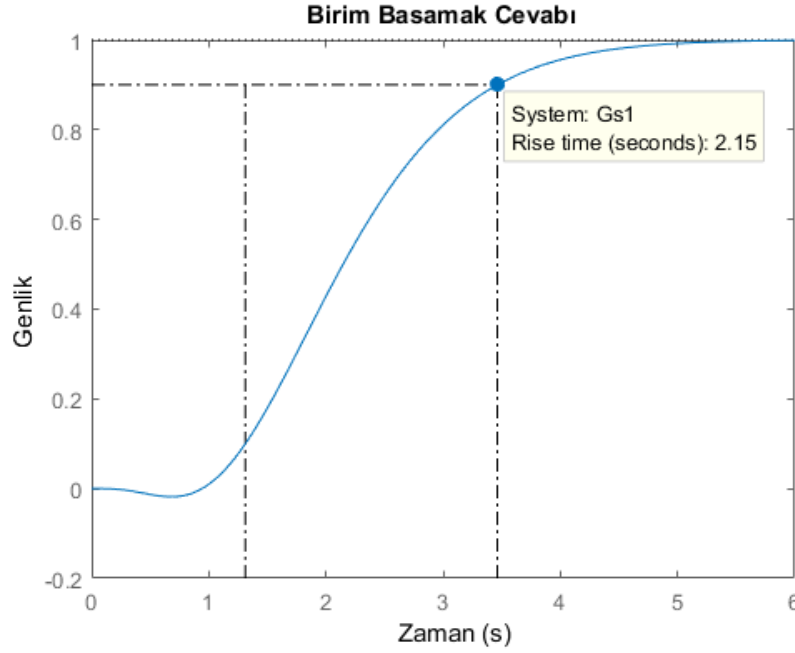
$$n_{iç}(s) = (-0.3s + 1) \quad (5.228)$$

olmak üzere

$$p_{iç}(s) = m_{iç}(s) d_{iç}(s) + l_{iç}(s) n_{iç}(s) \quad (5.229)$$

şeklinde ifade edilebilir.

$\tau=2$ ve aşımsız bir sistem cevap için $\alpha_1 = 2.5$ seçildiği durumda, kapalı çevrim sistemin birim basamak cevabı Şekil 5.103'de verilmiştir.



Şekil 5.103 : $\tau=2$ ve $\alpha_1 = 2.5$ durumunda kapalı çevrim birim basamak cevabı.

Şekil 5.103'den görüldüğü üzere kapalı çevrim sistem birim basamak cevabı aşırımsız ve yükselme zamanı ise 2.15 saniye olmuştur. İç çevrim için tasarlanan kontrolör sonucunda oluşan kapalı çevrim transfer fonksiyonu;

$$G_{cl-iç}(s) = \frac{-0.3s + 1}{0.009682s^5 + 0.1238s^4 + 0.6329s^3 + 1.6s^2 + 2s + 1} \quad (5.230)$$

olarak bulunur. Kapalı çevrim transfer karakteristik polinomu ise;

$$p_{iç}(s) = 0.009682s^5 + 0.1238s^4 + 0.6329s^3 + 1.6s^2 + 2s + 1 \quad (5.231)$$

şeklindedir. Bu kapalı çevrimi sağlayacak $m_{iç}(s)$ ve $l_{iç}(s)$ polinomları ise;

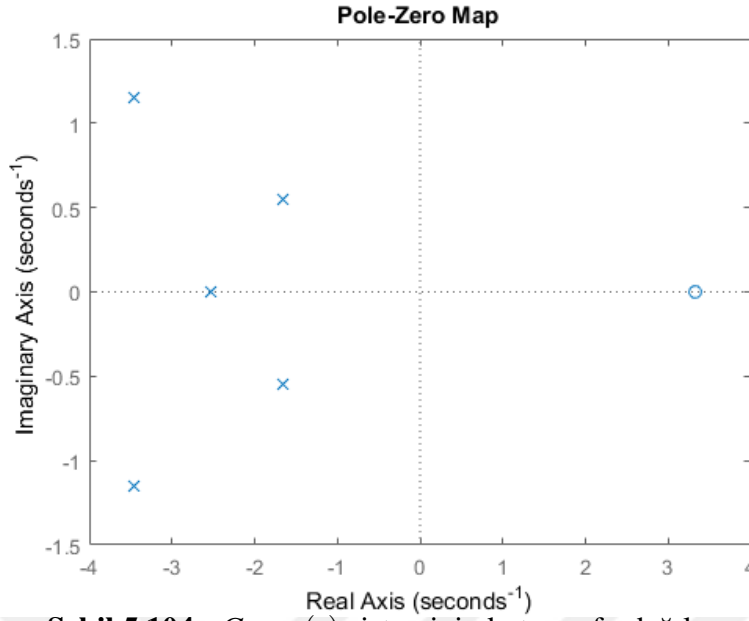
$$m_{iç}(s) = 0.00968s^2 + 0.0947s + 0.414 \quad (5.232)$$

$$l_{iç}(s) = 0.315s^2 + 0.838s + 0.586 \quad (5.233)$$

olarak bulunur. Kapalı çevrim birim basamak değerinin son değeri 1'e yerleştiği için

$$f_{iç}(s) = 1 \quad (5.234)$$

şeklinde bulunur. İç çevrime ait kapalı çevrim transfer fonksiyonunun kutup-sıfır dağılımı Şekil 5.104'de verilmiştir.



Şekil 5.104 : $G_{cl-iç}(s)$ sisteminin kutup-sıfır dağılımı.

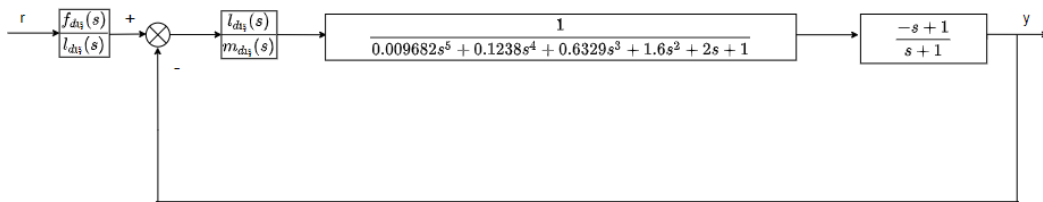
$G_{cl-iç}(s)$ sisteminin kutupları;

$$s_{1,2} = -1.6587 \pm j0.5523 \quad (5.235)$$

$$s_3 = -2.5282 \quad (5.236)$$

$$s_{4,5} = -3.4689 \pm j1.155 \quad (5.237)$$

şeklinde. $s_{1,2}$ ve $s_{4,5}$ kutuplarında imajiner kısım bulunmaktadır. $s_{4,5}$ kutupların amortisman oranları $0.949(\sim 1)$ $\zeta=1$ kritik sönüm oranına çok yakın olması ve diğer kutupların baskın bölgede olmamasından dolayı sistem cevabında aşım gözlenmemiştir. İç çevrime ait kontrol işareti Şekil 5.105’de verilmiştir.

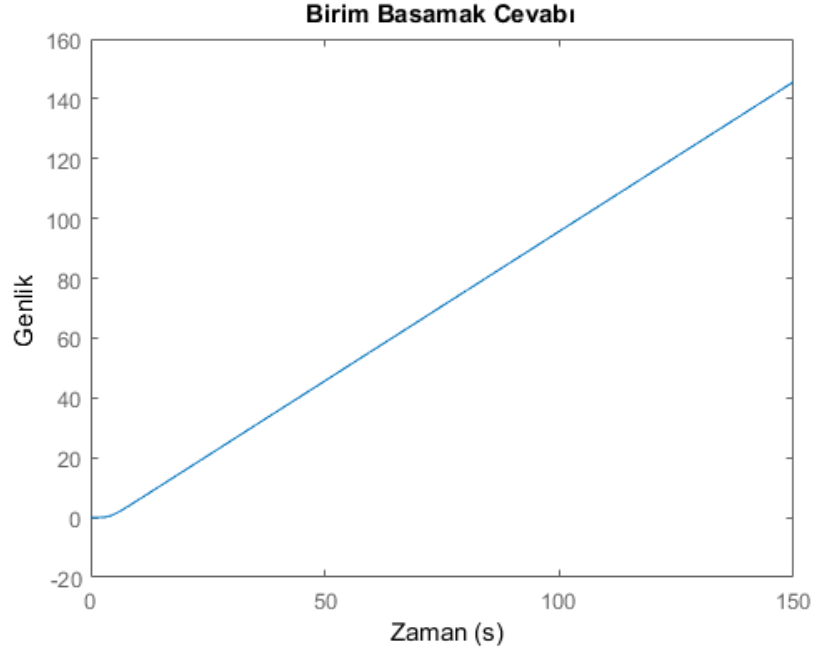


Şekil 5.105 : İndirgenmiş kaskad blok diyagramı.

Şekil 5.105’deki indirgenmiş blok diyagramındaki ileri yoldaki transfer fonksiyonu;

$$G_{ileri}(s) = \frac{-0.3s + 1}{0.009682 s^8 + 0.1432 s^7 + 0.8902 s^6 + 2.99 s^5 + 5.833 s^4 + 6.6 s^3 + 4 s^2 + s} \quad (5.238)$$

şeklindedir. 8. mertebeden $G_{ileri}(s)$ transfer fonksiyonunun birim basamak cevabı Şekil 5.106'da verilmiştir.



Şekil 5.106 : $G_{ileri}(s)$ sisteminin birim basamak cevabı.

Şekil 5.106'dan görüldüğü üzere integratör etkisinden dolayı birim basamak cevabı sonsuza gitmektedir. Tasarlanacak kontrolörle birlikte aşısız bir sistem cevabı elde edilecek kontrolör tasarımı yapılacaktır. İleri yoldaki sistem 8. mertebeden bir sistem olduğu için tasarlanacak kontrolör 7. mertebeden olacaktır. Böylece dış çevrim ait kapalı çevrim karakteristik polinomun mertebesi 15 olacaktır. Bu duruma göre kapalı çevrim karakteristik polinomu,

$$m_{dış}(s) = (m_7s^7 + m_6s^6 + m_5s^5 + m_4s^4 + m_3s^3 + m_2s^2 + m_1s + m_0) \quad (5.239)$$

$$d_{dış}(s) = (0.009682 s^8 + 0.1432 s^7 + 0.8902 s^6 + 2.99 s^5 + 5.833 s^4 + 6.6 s^3 + 4 s^2 + s) \quad (5.240)$$

$$l_{dış}(s) = (l_7s^7 + l_6s^6 + l_5s^5 + l_4s^4 + l_3s^3 + l_2s^2 + l_1s + l_0) \quad (5.241)$$

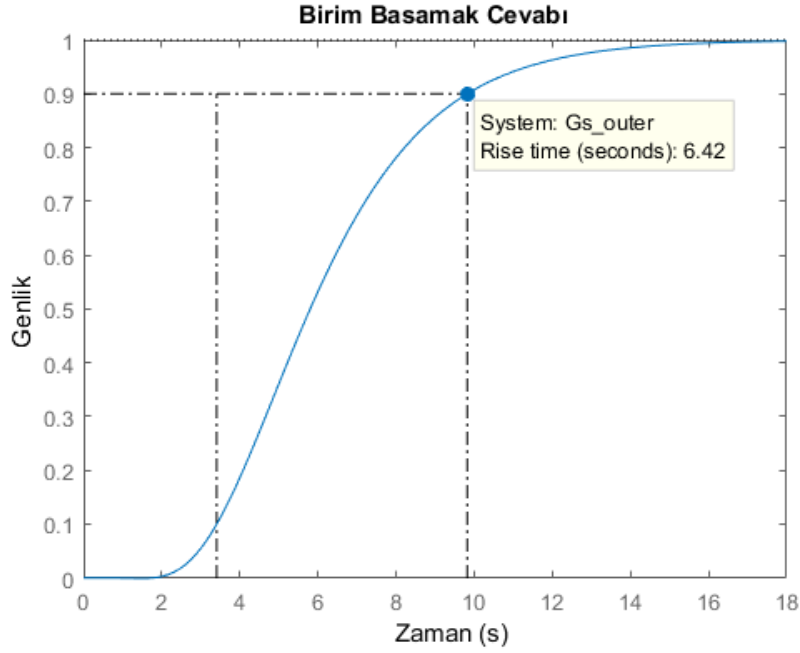
$$n_{dış}(s) = (-0.3s + 1) \quad (5.242)$$

olmak üzere

$$p_{dış}(s) = m_{dış}(s) d_{dış}(s) + l_{dış}(s) n_{dış}(s) \quad (5.243)$$

şeklinde ifade edilebilir.

$\tau=6$ ve aşısız bir sistem cevap için $\alpha_1 = 2.5$ seçildiği durumda, kapalı çevrim sistemin birim basamak cevabı Şekil 5.107'de verilmiştir.



Şekil 5.107 : $\tau=6$ ve $\alpha_1 = 2.5$ durumunda kapalı çevrim birim basamak cevabı.

Şekil 5.107’den görüldüğü üzere kapalı çevrim sistem birim basamak cevabının ters aşımı %0.07’e düşürülmüş, buna ek olarak aşısız ve yükselme zamanı ise 6.42 saniye olan bir sistem cevabı elde edilmiştir. Dış çevrim için tasarlanan kontrolör sonucunda oluşan kapalı çevrim transfer fonksiyonu;

$$G_{cl-dış}(s) = \frac{-0.3s + 1}{6.099 \cdot 10^{-14} s^{15} + 2.115 \cdot 10^{-11} s^{14} + 2.935 \cdot 10^{-9} s^{13} + 2.155 \cdot 10^{-7} s^{12} + 9.354 \cdot 10^{-6} s^{11} + 0.0002538 s^{10} + 0.004442 s^9 + 0.05104 s^8 + 0.3881 s^7 + 1.952 s^6 + 6.448 s^5 + 13.74 s^4 + 18.3 s^3 + 14.4 s^2 + 6s + 1} \quad (5.244)$$

olarak bulunur. Kapalı çevrim transfer karakteristik polinomu ise;

$$p_{dış}(s) = 6.099 \cdot 10^{-14} s^{15} + 2.115 \cdot 10^{-11} s^{14} + 2.935 \cdot 10^{-9} s^{13} + 2.155 \cdot 10^{-7} s^{12} + 9.354 \cdot 10^{-6} s^{11} + 0.0002538 s^{10} + 0.004442 s^9 + 0.05104 s^8 + 0.3881 s^7 + 1.952 s^6 + 6.448 s^5 + 13.74 s^4 + 18.3 s^3 + 14.4 s^2 + 6s + 1 \quad (5.245)$$

şeklindedir. Bu kapalı çevrimi sağlayacak $m_{dış}(s)$ ve $l_{dış}(s)$ polinomları ise;

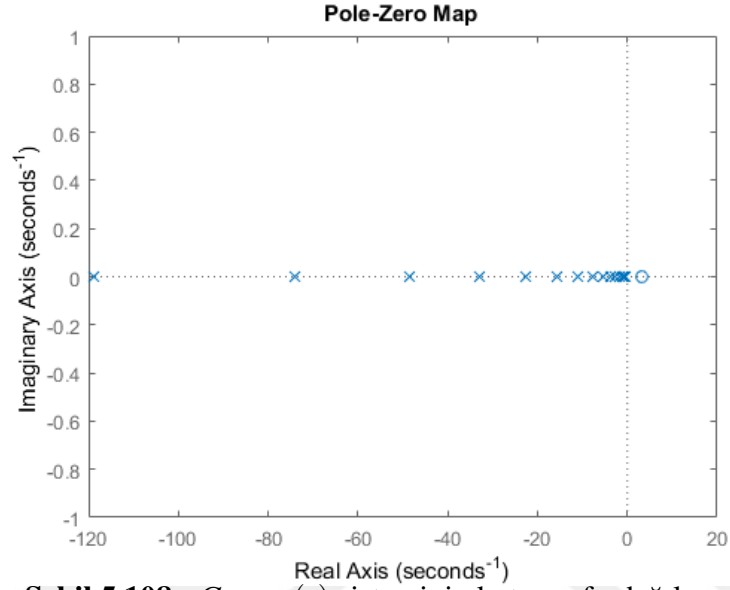
$$m_{dış}(s) = 6.3 \cdot 10^{-12} s^7 + 2.09 \cdot 10^{-9} s^6 + 2.72 \cdot 10^{-7} s^5 + 1.8 \cdot 10^{-5} s^4 + 6.74 \cdot 10^{-4} s^3 + 0.0145 s^2 + 0.177 s + 1.73 \quad (5.246)$$

$$l_{dış}(s) = 0.0202s^7 + 0.284 s^6 + 1.64 s^5 + 5.02 s^4 + 8.73 s^3 + 8.66 s^2 + 4.57 s + 1 \quad (5.247)$$

olarak bulunur. Kapalı çevrim birim basamak değerin son değeri 1'e yerleştiği için

$$f_{dış}(s) = 1 \quad (5.248)$$

şeklinde bulunur. Dış çevrime ait kapalı çevrim transfer fonksiyonunun kutup-sıfır dağılımı Şekil 5.108'de verilmiştir. $G_{cl-dış}(s)$ sisteminin kutupları;



Şekil 5.108 : $G_{cl-dış}(s)$ sisteminin kutup-sıfır dağılımı.

$$s_1 = -0.4859 \quad (5.249)$$

$$s_2 = -0.7803 \quad (5.250)$$

$$s_3 = -1.1891 \quad (5.251)$$

$$s_4 = -1.7625 \quad (5.252)$$

$$s_5 = -2.5695 \quad (5.253)$$

$$s_6 = -3.7074 \quad (5.254)$$

$$s_7 = -5.3168 \quad (5.255)$$

$$s_8 = -7.6030 \quad (5.256)$$

$$s_9 = -10.8723 \quad (5.257)$$

$$s_{10} = -15.5918 \quad (5.258)$$

$$s_{11} = -22.4971 \quad (5.259)$$

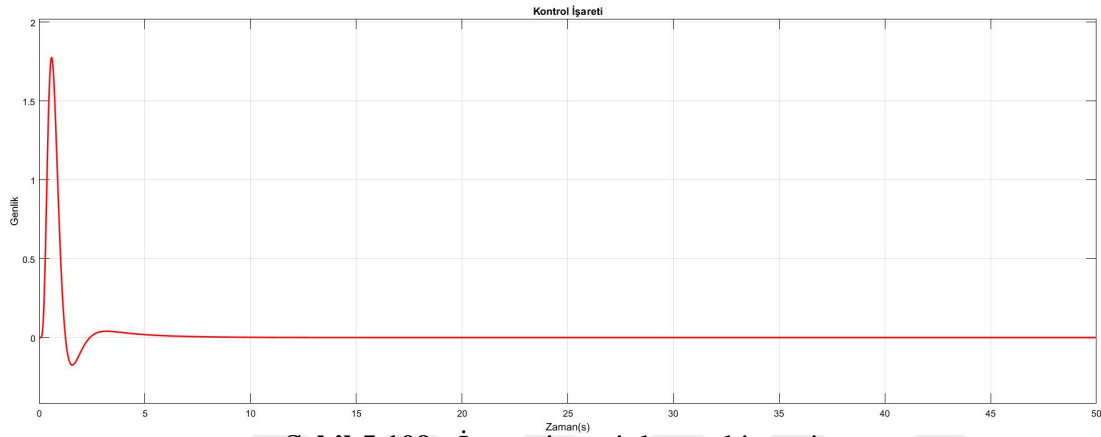
$$s_{12} = -32.7976 \quad (5.260)$$

$$s_{13} = -48.6145 \quad (5.261)$$

$$s_{14} = -74.0821 \quad (5.262)$$

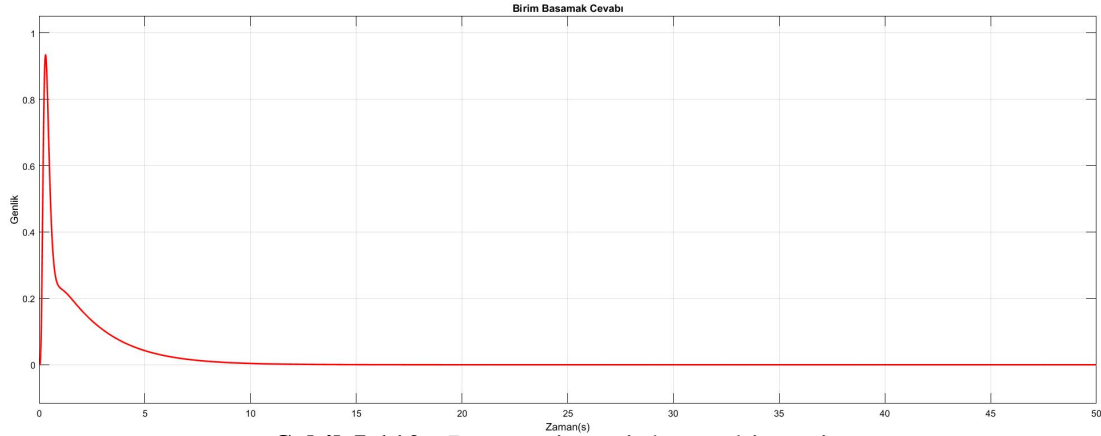
$$s_{15} = -118.9627 \quad (5.263)$$

şeklindedir. Bunlara ek olarak dış sistemden gelen $s=3.3333$ 'de sağ-yarı düzlemde sıfırı bulunmaktadır. İç çevrime ait kontrol işareti Şekil 5.109'da verilmiştir.



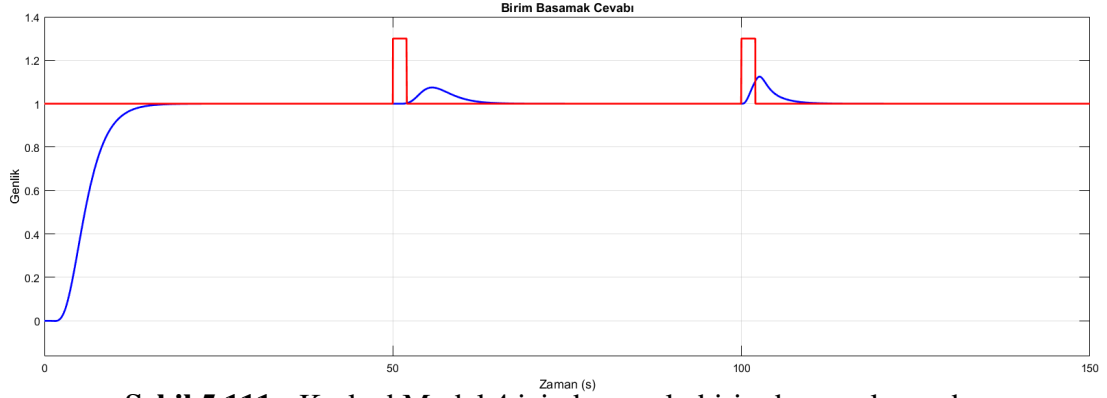
Şekil 5.109 : İç çevrime ait kontrol işareti.

Dış çevrime ait kontrol işareti Şekil 5.110'da verilmiştir.



Şekil 5.110 : Dış çevrime ait kontrol işareti.

Şekil 5.101'de gösterilen d_1 ve d_2 bozucuları sırasıyla 50. ve 100. saniyede verilmiştir. Bozucuların genlikleri 0.3 olup, 2 saniye boyunca sisteme verilmişlerdir. Kaskad Model 4 için d_1 ve d_2 bozucuları etkisinde birim basamak cevabı Şekil 5.111'de verilmiştir.



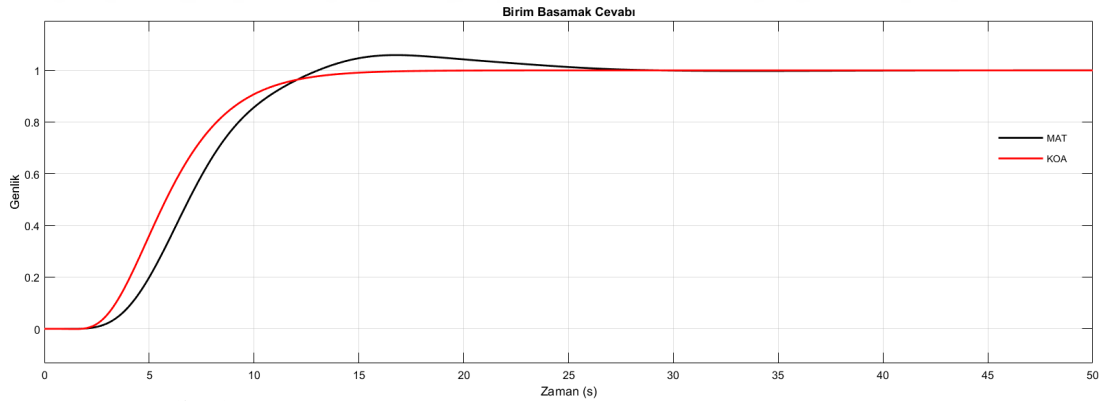
Şekil 5.111 : Kaskad Model 4 için bozuculu birim basamak cevabı.

Şekil 5.111'den görüldüğü üzere sistem d_1 ve d_2 bozucusunu bastırmıştır. Sistem d_1 bozucusunu 10.4 saniyede bastırırken, d_2 bozucusunu 6.5 saniyede bastırmıştır. d_1 ve d_2 bozucusuna ait ITSE hata değerleri sırasıyla;

$$ITSE_{d_1} = 1.232$$

$$ITSE_{d_2} = 3.436$$

şeklindedir. Kaskad Model 4 için tasarlanan kontrolör sonucundaki kapalı çevrim basamakları Şekil 5.112'de toplu olarak verilmiştir.



Şekil 5.112 : Kaskad Model 4 için birim basamak cevapları.

Sistemin referans takip başarımı için ITSE kriteri kullanılmıştır. Tasarlanan kontrolörlere göre ait ITSE hata değerleri sırasıyla;

$$ITSE_{MAT} = 18.68$$

$$ITSE_{KOA} = 13.21$$

şeklindedir. Hata değerlerinden görüldüğü üzere en az hata değeri KOA yöntemiyle tasarlanan kontrolörle elde edilmiştir. Tasarlanan 2 kontrolör için sistemin zaman bölgesi karakteristiklerinin karşılaştırılması Çizelge 5.8'de verilmiştir.

Çizelge 5.8 : Kaskad Model 4 için zaman bölgesi karakteristiklerinin karşılaştırılması

	MAT	KOA
Yükselme Zamanı (s)	6.8305	6.4159
Aşım (%)	5.5470	0
Ters Aşım (%)	0.0152	0.0707
Yerleşme Zamanı (s)	24.0908	13.3152

Çizelge 5.8’den görüldüğü üzere kaskad sistem KOA yöntemiyle aşım yapmamışken MAT kontrolör tasarım yöntemiyle %5.55’lik bir aşım yapmıştır. Ters aşım değeri MAT kontrolör tasarım yöntemiyle tasarlanan kontrolörle kısmen daha iyi bir sonuç elde edilmiştir. En düşük yükselme zamanı ve yerleşme zamanı KOA elde edilmiştir. Tasarlanan 2 kontrolörle de 4. kaskad sistem d_1 ve d_2 bozucularını bastırmıştır. 4. kaskad sistem için bozucu bastırma süreleri ve ITSE hata değerleri Çizelge 5.9’da verilmiştir.

Çizelge 5.9 : Kaskad Model 4 için bozucu bastırma başarımları

	MAT		KOA	
Kriterler	Bastırma Süresi (s)	ITSE	Bastırma Süresi (s)	ITSE
d_1 bozucusu	21.56	10.98	10.4	1.232
d_2 bozucusu	17.9	35.88	6.55	3.436

Çizelge 5.9’a bakıldığında zaman en az ITSE değerleri d_1 ve d_2 bozucuları için KOA yöntemiyle elde edilmiştir. Aynı şekilde, d_1 ve d_2 bozucuları ise en hızlı KOA yöntemiyle tasarlanan kontrolörle bastırılmıştır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması altında endüstride tercih edilen kaskad kontrol yapısı kullanılarak, yüksek mertebeden kaskad sistemler için kutup-sıfır götürmesine dayanan yüksek mertebeli kontrolör tasarımı metodu önerilmiştir. Kaskad kontrol sistemin isterleri olarak iç çevrimde sistemin yükselme zamanını azaltılması, dış çevrimde ise aşısız bir sistem cevabı elde edilmesi olarak belirlenmiştir.

Bu çalışmada ilk olarak yüksek mertebeden sistemler için Naslin [1] tarafından önerilen sistemlerin karakteristik polinom katsayıları ile sistem cevabı arasındaki ilişkiyi temel alan “Karakteristik Oran Atama” ile yüksek mertebeden kontrolör tasarım yöntemi anlatılmıştır. Karakteristik oran atamasıyla kontrolör tasarımında sistemin hızı ve aşımı ya da ters aşımı sırasıyla τ zaman sabiti ve α_1 temel karakteristik oran parametrelerinin seçimiyle ayarlanabilmektedir. Tez kapsamında sıfırı bulunmayan sistemler için 2. mertebeden 8. mertebeye olan sistemler için farklı α_1 temel karakteristik oranları için $\tau=1$ olması durumundaki aşım değerleri paylaşılmıştır. KOA ile kontrolör tasarlanacak sistemler için, kapalı çevrim karakteristik polinomunun mertebesi eğer 4 ve 4’ten daha yüksekse $\alpha_1=2.5$ seçildiği zaman aşısız bir cevap elde etmek mümkündür. Kapalı çevrim karakteristik polinomunun mertebesi 2 ve 3 olması durumunda ise α_1 sırasıyla 4 ve 3 seçilirse sıfırı bulunmayan sistemlerde aşısız birim basamak cevapları elde edilebilir. Sıfırı olan sistemlerde aşım gözlenebileceği için sıfırı bulunmayan sistemlerde aşısız sonuç veren α_1 degerleri sıfırı olan sistemlerde az da olsa bir aşımlı cevap gözlenebilir. Bu durumda α_1 ya da τ biraz daha yüksek seçilerek aşısız bir cevap elde edilebilir. Tez çalışması altında yapılan KOA yöntemi ile kontrol tasarım tasarımlarından elde edilen birim basamak sonuçlarına göre sistemin yükselme zamanı genellikle seçilen τ zaman sabitine göre $[\tau-1 \ \tau+1]$ saniye aralığında çıkmıştır. KOA yöntemiyle teorik olarak çok hızlı sistem cevapları elde etmek mümkün olsa da bu yüksek hızlı sistem cevaplarını sağlayacak kontrol işaretlerinin genliği çok yüksek olacağından yapılan tasarım çok gerçekçi olmayacaktır.

KOA yöntemiyle yüksek mertebeden farklı sistemlere ait kontrolör tasarımı örnekleri

verildikten sonra, KOA ile kaskad kontrolör tasarımı içinde örnek sistem üzerinden tasarım gösterilmiştir. Buna ek olarak, kaskad kontrolör yapısının endüstride tercih nedenlerinden olan bozucu bastırma başarımı ve referans takip başarımını göz önünde bulundurarak “Model Ayırıştırma Temelli Kaskad Kontrolör” yöntemi ile KOA yöntemi kullanılarak farklı özelliklere sahip dört kaskad sistem seçilerek MATLAB Simulink ortamında karşılaştırma yapılmıştır. Seçilen “Kaskad Model 1” ve Kaskad Model 2” için MAT kontrolör tasarımı içinde iç ve dış çevrimde ölü zamanlı birinci mertebeden modellerin kullanılması ve iç çevrimde ölü zamanlı birinci mertebeden modelin dış çevrimde ölü zamanlı ikinci mertebeden modelin kullanılması olmak üzere iki farklı durum ele alınmıştır. “Kaskad Model 3” ve “Kaskad Model 4” için ise sadece MAT kontrolör tasarımı içinde iç ve dış çevrimde ölü zamanlı birinci mertebeden modellerin kullanılması durumu ele alınmıştır. Hem iç çevrim hem dış çevrimin sıfırı olmayan sistemler olması durumunun ele alındığı Kaskad Model 1’de tasarlanan üç kontrolörde iç çevrimde sistemi hızlandırmış ve dış çevrimde ise aşısız bir sistem cevabı sağlamışlardır. MAT 1. kontrolör tasarımı içinde en düşük yükselme zamanı ve yerleşme zamanı elde edilmiştir. Bozucu bastırma başarımı olarak ise bütün kontrolörler verilen iki bozucuyu da bastırmıştır. Verilen iki bozucuyu KOA yöntemiyle tasarlanan kontrolörle daha hızlı bastırılmıştır. Sistemin bozuculu ve bozucusuz referans takip başarımında ITSE kriterine göre yükselme zamanı ve yerleşme zamanında olduğu gibi MAT 1. kontrolör tasarımı içinde daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. İç çevrimde sıfırı olmayan sistem, dış çevrimde sol-yarı düzlemde sıfırı olan sistem olması durumunun ele alındığı Kaskad Model 2’de tasarlanan üç kaskad kontrolörde iç çevrimde sistemi hızlandırmış ve dış çevrimde ise aşısız bir sistem cevabı sağlamışlardır. MAT 1. kontrolör tasarımı içinde en düşük yükselme zamanı ve yerleşme zamanı elde edilmiştir. Bozucu bastırma başarımı olarak ise bütün kontrolörler verilen iki bozucuyu da bastırmıştır. Verilen iki bozucuyu KOA yöntemiyle tasarlanan kontrolörle daha hızlı bastırılmıştır. Sistemin bozuculu referans takip başarımında ITSE kriterine göre KOA yöntemiyle tasarlanan kontrolör daha iyi sonuç verirken, bozucusuz referans takip başarımında MAT 1. kontrolör tasarımı içinde daha iyi sonuç elde edilmiştir. İç çevrimde sıfırı olmayan sistem, dış çevrimde sağ-yarı düzlemde sıfırı olan sistem olması durumunun ele alındığı Kaskad Model 3’de tasarlanan iki kontrolörde iç çevrimde sistemi hızlandırmış ancak dış çevrimde ise KOA yöntemiyle aşısız sistem cevabı elde edilirken MAT kontrolör tasarımı içinde aşısız bir sistem cevabı elde

edilememiştir. Dış çevrimde sağ-yarı düzlemde sıfırı olduğu için kaskad sistem ters aşım yapmıştır. KOA yöntemiyle sistem MAT kontrolör tasarımına göre daha ters aşım yapmıştır. Bozucu bastırma başarımı olarak ise iki kontrolörde verilen iki bozucuyu da bastırmıştır. Verilen iki bozucuyu KOA yöntemiyle tasarlanan kontrolörle daha hızlı bastırılmıştır. Sistemin bozuculu referans takip başarımında ITSE kriterine göre d_1 bozucusu için KOA yöntemiyle tasarlanan kontrolör daha iyi sonuç verirken, d_2 bozucusu için MAT kontrolör tasarımı daha iyi sonuç vermiştir. Bozucusuz referans takip başarımında MAT kontrolör tasarımı daha iyi sonuç elde edilmiştir. İç çevrimde sağ-yarı düzlemde sıfırı olan sistem, dış çevrimde integratörü olan sistem olması durumunun ele alındığı Kaskad Model 4’de tasarlanan iki kontrolörde iç çevrimde sistemi hızlandırmış ancak dış çevrimde ise KOA yöntemiyle aşısız sistem cevabı elde edilirken MAT kontrolör tasarımı aşısız bir sistem cevabı elde edilememiştir. İç çevrimde sağ-yarı düzlemde sıfırı olduğu için kaskad sistem ters aşım yapmıştır. MAT kontrolör tasarımı KOA yöntemine göre sistem daha ters aşım yapmıştır. Bozucu bastırma başarımı olarak ise iki kontrolörde verilen iki bozucuyu da bastırmıştır. Verilen iki bozucuyu KOA yöntemiyle tasarlanan kontrolörle daha hızlı bastırılmıştır. Sistemin bozuculu ve bozucusuz referans takip başarımında ITSE kriterine göre KOA yöntemiyle tasarlanan kontrolör daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen benzetim sonuçları ışığında özellikle bozucu bastırma performansı bakımından KOA yöntemiyle kaskad kontrolör tasarımı iyi sonuçlar elde edilmiştir. MAT kontrolör tasarım yöntemleriyle karşılaştırıldığı zaman, KOA ile kontrolör tasarım parametresi sayısının daha az olması kontrolör tasarımcısının işini kolaylaştırmaktadır. MAT kontrolör tasarım yöntemi gibi yüksek mertebeden sistemlerin ölü zamanlı modellerini üzerinden kontrolör tasarımı yapan yöntemlerde modelleme hatasından dolayı ölü zamanlı sistemde üzerinden yapılan benzetimde aşım gözlenmezken, gerçek zamanlı sistem üzerinde benzetim yapıldığında kapalı çevrim birim basamak cevabında aşım gözlenebilir. Kaskad Model 3 ve Kaskad Model 4 için MAT kontrolör tasarımı da benzer bir durum meydana gelmiştir. Kaskad Model 1 ve Kaskad Model 3’de yapılan kontrolör tasarımları gibi KOA yönteminde yüksek mertebeden terimlerin katsayılarının çok küçük olması durumunda ihmal yapılarak tasarımın yapılabilmesi kontrolör tasarımcısının işini kolaylaştırmaktadır. Sadece yüksek mertebeden kontrolörler için değil, aynı zamanda PID gibi ikinci mertebeden bir kontrolör tasarımı da kapalı çevrim karakteristik polinomun katsayıları için

Naslin [1] tarafından önerilen sistemlerin karakteristik polinom katsayıları kullanılarak kontrolör tasarımcısı kontrolör tasarımını rahat bir şekilde yapabilir.



KAYNAKLAR

- [1] **Haeri, M. ve Tavazoei, M.S.** (2005). To determine the characteristic polynomial coefficients based on the transient response, , 11–15.
- [2] **Zhou, Z., Huang, G.M. ve Bhattacharyya, S.P.** (2016). Modern PID controller design for load frequency control, *2016 North American Power Symposium (NAPS)*, IEEE, s.1–6.
- [3] **Khuntia, P. ve Mitra, D.** (2008). Fast Acting Robust Controller for Pitch Control System of Aircraft, *The Annals of “Dunarea de Jos “University of Galati. Fascicle III, Electrotechnics, Electronics, Automatic Control, Informatics,* 31(1), 67–75.
- [4] **Çakıroğlu, O., Güzelkaya, M. ve Eksin, İ.** (2015). Improved cascade controller design methodology based on outer-loop decomposition, *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 37(5), 623–635.
- [5] **Goodwin, G.C., Graebe, S.F., Salgado, M.E. ve diğerleri** (2001). *Control system design*, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall,.
- [6] **Ogata, K. ve Yang, Y.** (2002). *Modern control engineering*, cilt 4, Prentice hall India.
- [7] **Rana, R.** (2014). ‘Importance of Feedback Control System’, *Excel Journal of Engineering Technology and Management Science*, 1(4), 1–6.
- [8] **Visioli, A.,** (2018), D4.1, Motion control requirements and specification (first iteration). WP4, Control layer design and development., <https://www.i-mech.eu/app/download/7075072351/D4.1.pdf?t=1538394937>.
- [9] **Fanaei, M.A.,** (n.d.), Advanced Process Control, lecture notes, Ferdowsi University of Mashhad.
- [10] **Franks, R. ve Worley, C.** (1956). Quantitative analysis of cascade control, *Industrial & Engineering Chemistry*, 48(6), 1074–1079.
- [11] **Nalbantoğlu, M. ve Güler, Y.** (2017). SSSC tabanlı kaskad kontrolör ile güç sistem kararlılığının iyileştirilmesi, *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 8(1), 89–100.
- [12] **Erdoğan, M.A.** (2016). Genetik algoritma yöntemi ile kaskad sistemler için optimum kontrolör tasarımı, (master’s thesis).
- [13] **Raja, G.L. ve Ali, A.** (2017). Series cascade control: An outline survey, *2017 Indian Control Conference (ICC)*, IEEE, s.409–414.

- [14] **Luyben, W.L.** (1973). Parallel cascade control, *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 12(4), 463–467.
- [15] **Raja, G.L. ve Ali, A.** (2015). Modified parallel cascade control structure for integrating processes, *2015 International Conference on Recent Developments in Control, Automation and Power Engineering (RDCAPE)*, IEEE, s.90–95.
- [16] **Kang, Y.B., Rho, H. ve Kim, H.** (2011). A new approach for transient response control via characteristic ratio assignment method, *International Journal of Control, Automation and Systems*, 9(4), 659.
- [17] **Rani, E. ve Samson Isaac, J.** (2013). Design of PI controller using characteristic ratio assignment method for coupled tank process, *a a*, 2, 2.
- [18] **Qiao, Y. ve Ma, C.** (2018). Optimized Characteristic Ratio Assignment for Low-Order Controller Design, *2018 25th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP)*, IEEE, s.1–6.
- [19] **Suksri, T., Sritheeravirojana, U.t., Numsomran, A., Kongrattana, V. ve Werataweemart, T.** (2007). T-DOF PID Controller Design using Characteristic Ratio Assignment Method for Quadruple Tank Process, *parameters*, 1, 2.
- [20] **Kim, D., Kim, H. ve Choi, W.** (2003). A new design method for transient response control, *SICE 2003 Annual Conference (IEEE Cat. No. 03TH8734)*, cilt 2, IEEE, s.2255–2260.
- [21] **Graham, D. ve Lathrop, C.R.** (1954). The influence of time scale and gain on criteria for servomechanism performance, *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part II: Applications and Industry*, 73(3), 153–158.
- [22] **Kessler, C.** (1960). Ein beitrag zur theorie mehrschleifiger regelungen, *at-Automatisierungstechnik*, 8(1-12), 261–266.
- [23] **Lipatov, A.V. ve Sokolov, N.** (1978). On some sufficient conditions for stability and instability of linear continuous stationary systems, *Avtomatika i Telemekhanika*, (9), 30–37.
- [24] **Lee, J. ve Choi, J.** (2008). Decoupling voltage controller design with time response specifications for three-phase DC/AC inverter, *2008 IEEE 2nd International Power and Energy Conference*, IEEE, s.630–634.
- [25] **Kumar, P., K.P.Y.R.** ‘Properties of Hurwitz Polynomials with application to stability theory’, *Journal of Advance Research in Mathematics And Statistics*.
- [26] **Lee, J., Park, G. ve Choi, J.** (2007). CRA based robust digital controller for a single phase UPS inverter, *2007 European Conference on Power Electronics and Applications*, IEEE, s.1–10.

- [27] **Hajare, V.D. ve Patre, B.** (2013). Design of PID controller based on reduced order model and Characteristic Ratio Assignment method, *2013 IEEE International Conference on Control Applications (CCA)*, IEEE, s.1270–1274.
- [28] **Kim, Y., Kim, K. ve Manabe, S.** (2006). Sensitivity of time response to characteristic ratios, *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, 89(2), 520–527.
- [29] **Kim, Y.C., Keel, L.H. ve Bhattacharyya, S.P.** (2003). Transient response control via characteristic ratio assignment, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 48(12), 2238–2244.
- [30] **Chaoraingern, J., Trisuwannawat, T. ve Numsomran, A.** (2009). PID Controller Design for Following Control of Hard Disk Drive by Characteristic Ratio Assignment Method, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 35.
- [31] **Landau, I.** (1998). The RST digital controller design and applications, *Control Engineering Practice*, 6(2), 155–165.
- [32] **Ganesh, S.N.V.** A Unified and Respective Algorithm for Injecting Voltage in 3-Phase series Power Quality Controller.
- [33] **Godoy, E. ve Ostertag, E.** (2006). Rst-controller design: a rational teaching method based on two diophantine equations, *IFAC Proceedings Volumes*, 39(6), 541–546.
- [34] **Franklin, G.F., Powell, J.D., Emami-Naeini, A. ve Powell, J.D.** (2002). *Feedback control of dynamic systems*, cilt 4, Prentice hall Upper Saddle River.
- [35] **Numsomran, A., Wongkhum, T., Suksri, T., Nilas, P. ve Chaoraingern, J.** (2007). Design of decoupled controller for TITO system using characteristic ratio assignment, *2007 International Conference on Control, Automation and Systems*, IEEE, s.957–962.
- [36] **Sun, Y., Xu, C. ve Yu, H.** (2010). Research of adjusted Smith predictor based on immune feedback, *2010 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, cilt 2, IEEE, s.1072–1075.
- [37] **Yücelen, T.** Uzun Ölü Zamanlı Sistemler İçin Smith Öngürücüsü Yöntemi İle PI-P Kontrolör Tasarımı, https://www.emo.org.tr/ekler/20b7d873398ab22_ek.pdf.
- [38] **Kuo, B.C. ve Golnaraghi, F.** (2003). Automatic control systems, *Englewood cliffs*.
- [39] **Skogestad, S.** (2003). Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning, *Journal of process control*, 13(4), 291–309.
- [40] **Das, S., Pan, I., Das, S. ve Gupta, A.** (2012). Improved model reduction and tuning of fractional-order $PI\lambda D\mu$ controllers for analytical rule extraction with genetic programming, *ISA transactions*, 51(2), 237–261.



ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Ahmet Can ERDEM

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans:** 2017, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği
- **Lisans:** 2018, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik- Elektronik Fakültesi, Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği
- **Y. Lisans:** 2021, İstanbul Teknik Üniversitesi, Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Anabilim Dalı

MESLEKİ DENEYİMLER VE ÖDÜLLER:

- 2020-Halen Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş. firmasında tam zamanlı.
- 2019-2020 yılları arasında AVL Türkiye firmasında tam zamanlı.