

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HATA VE NORMALİZE EDİLMİŞ İVME BİLGİSİNE DAYALI Pİ
KONTROLÖR KATSAYI İYİLEŞTİRME YÖNTEMİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Aysel ABALI**

Anabilim Dalı : Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği

Programı : Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği

HAZİRAN 2011

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HATA VE NORMALİZE EDİLMİŞ İVME BİLGİSİNE DAYALI PI
KONTROLÖR KATSAYI İYİLEŞTİRME YÖNTEMİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Aysel ABALI

(504081106)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 06 Mayıs 2011

Tezin Savunulduğu Tarih : 08 Haziran 2011

Tez Danışmanı : Prof. Dr. İbrahim EKSİN (İTÜ)

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Müjde GÜZELKAYA (İTÜ)

Prof. Dr. Serhat ŞEKER (İTÜ)

HAZİRAN 2011

ÖNSÖZ

Tez çalışmam süresince yardımlarını esirgemeyerek bilgi birikimini benimle paylaşan, çalışmamda bana yol gösterici olan değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. İbrahim EKSİN'e, değerli hocam Sayın Prof. Dr. Müjde GÜZELKAYA'ya teşekkürü bir borç bilir, saygılarımı sunarım.

Hayatım boyunca beni destekleyen, bana duydukları güveni her fırsatta dile getiren sevgili aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, yüksek lisans öğrenimim boyunca Yurt İçi Yüksek Lisans Burs Programı kapsamında vermiş olduğu destek için TÜBİTAK – BİDEB'e ve tez çalışmam süresince göstermiş oldukları anlayıştan ötürü iş arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Haziran 2011

Aysel Abalı

Elektrik Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER	v
KISALTMALAR	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xiii
SUMMARY	xv
1. GİRİŞ	1
2. PID KONTROLÖRLER	3
2.1 Kontrolör Parametrelerinin Etkisi	5
2.2 Kontrolör Parametrelerinin Ayarlanması	7
3. ZIEGLER NICHOLS PID KONTROL TASARIM YÖNTEMLERİ	9
3.1 Basamak Yanıtı Yöntemi	9
3.2 Frekans Yanıtı Yöntemi	11
3.3 Arttırılmış Ziegler Nichols Ayarlama Yöntemi	12
3.3.1 Arttırılmış Ziegler Nichols ayarlamalı PI kontrolörü	13
4. HATA VE NORMALİZE EDİLMİŞ İVME BİLGİSİNE DAYALI ZIEGLER NICHOLS PI KONTROLÖR KATSAYI İYİLEŞTİRME YÖNTEMİ	17
4.1 Normalize Edilmiş İvme Kavramı	18
4.2 Hata Ve Normalize Edilmiş İvme Bilgisine Dayalı Ziegler Nichols Ayarlamalı PI Kontrolörü.....	19
4.3 Benzetim Çalışmaları	24
4.3.1 Birinci mertebeden ölü zamanlı sistem için benzetim çalışmaları.....	25
4.3.2 İkinci mertebeden ölü zamanlı sistem benzetim çalışmaları	28
4.3.2.1 İkinci mertebeden ölü zamanlı doğrusal sistem benzetim çalışmaları.....	28
4.3.2.2 İkinci mertebeden ölü zamanlı marjinal kararlı sistem benzetim çalışmaları	32
4.3.2.3 İkinci mertebeden ölü zamanlı doğrusal olmayan sistem benzetim çalışmaları	35
4.3.3 Birinci mertebeye indirgenmiş sistem benzetim çalışmaları	37
5. ÇOK SÖNÜMLÜ SİSTEM YANITI VEREN PI KONTROLÖRLER İÇİN HATA VE NORMALİZE EDİLMİŞ İVME BİLGİSİNE DAYALI KATSAYI AYARLAMA MEKANİZMASI.....	41
5.1 Çok Sönümlü Sistem Yanıtları İçin Benzetim Çalışmaları.....	44
5.2 Az Sönümlü ve Çok Sönümlü Sistem Yanıtları Sağlayan Kontrolör Parametrelerinin İyileştirilmesi İçin Bir Anahtarlama Mekanizmasının Oluşturulması	46
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	49
KAYNAKLAR	51

KISALTMALAR

AZNPI	: Arttırılmış Ziegler Nichols Ayarlamalı PI Kontrolörü
IAE	: Mutlak Hatanın İntegrali Kriteri
ITAE	: Mutlak Hatanın Zaman Ağırlıklı İntegrali Kriteri
PI	: Oransal İntegral Kontrolörü
PID	: Oransal İntegral Türev Kontrolörü
RZNPI	: Geliştirilmiş Ziegler Nichols Ayarlamalı PI Kontrolörü
ZNPI	: Ziegler Nichols Ayarlamalı PI Kontrolörü

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : PID kontrolör tipleri.	5
Çizelge 2.2 : PID parametrelerinin sistem yanıtına etkisi.	6
Çizelge 3.1 : Basamak yanıtı yöntemine göre PID parametrelerinin belirlenmesi....	10
Çizelge 3.2 : Frekans yanıtı yöntemine göre PID parametrelerinin belirlenmesi.....	11
Çizelge 4.1 : $dde(k)$ ve $de(.)$ işaretlerine bağlı olarak sistem yanıtının davranışı.	19
Çizelge 4.2 : Hata ve hatanın değişiminin bölgelere göre işaret durumları.....	20
Çizelge 4.3 : Birinci mertebeden sistem yanıtlarının performans analizi.....	27
Çizelge 4.4 : İkinci mertebeden lineer sistem yanıtlarının performans analizi.	29
Çizelge 4.5 : İkinci mertebeden marjinal kararlı sistem yanıtlarının performans analizi.....	33
Çizelge 4.6 : İkinci mertebeden nonlinear sistem yanıtlarının performans analizi. ..	36
Çizelge 4.7 : Birinci mertebeye indirgenmiş yüksek mertebeli sistem yanıtlarının performans analizi.	39

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Hata – zaman eğrisi.	3
Şekil 2.2 : PID kontrolörünün sisteme uygulanışı.	5
Şekil 3.1 : Ziegler Nichols basamak yanıtı yöntemi.	10
Şekil 3.2 : Sadece oransal kontrol uygulanmış kapalı çevrimli sistem.	11
Şekil 3.3 : Kritik periyot ve sürdürülen salınım.	11
Şekil 3.4 : α' nın e ve $\Delta e'$ ye bağlı değişimi.	13
Şekil 3.5 : İkinci dereceden az sönümlü sistem yanıtı ve α' nın değişimi.	14
Şekil 4.1 : Örnek sistem kapalı çevrim basamak yanıtı.	20
Şekil 4.2 : Oransal kazanç ayarlamasında kullanılan fonksiyon yüzeyi.	22
Şekil 4.3 : Referansa yaklaşma durumu için integral kazanç ayarlamasında kullanılan fonksiyonun değişimi.	23
Şekil 4.4 : Referanstan uzaklaşma durumunda integral kazanç ayarlaması için kullanılan fonksiyonun değişimi.	23
Şekil 4.5 : Hata ve normalize edilmiş ivme bilgisine dayalı PI katsayı ayarlama yöntemine ait blok diyagram.	24
Şekil 4.6 : Birinci mertebeden ölü zamanlı sistem için; kapalı çevrim basamak yanıtı (a), kontrol işareti (b).	26
Şekil 4.7 : Ayarlanan kontrolör parametrelerinin değişimi.	27
Şekil 4.8 : Ölü zamanı arttırılmış birinci mertebeden sistem basamak yanıtı.	28
Şekil 4.9 : İkinci mertebeden ölü zamanlı lineer sistemin kapalı çevrim birim basamak yanıtı (a); kontrol işareti (b).	29
Şekil 4.10 : Ayarlanan kontrolör parametrelerinin değişimi.	30
Şekil 4.11 : Ölü zamanı arttırılmış ikinci mertebeden lineer sistem basamak yanıtı.	31
Şekil 4.12 : İkinci mertebeden doğrusal sisteme uygulanan referans işareti.	31
Şekil 4.13 : Referans değişikliği durumunda ikinci mertebeden doğrusal sistem yanıtları.	32
Şekil 4.14 : İkinci mertebeden ölü zamanlı marjinal kararlı sistem basamak yanıtı(a) ve kontrol işareti(b).	33
Şekil 4.15 : Kontrolör parametrelerinin değişimi.	34
Şekil 4.16 : Ölü zamanı arttırılmış ikinci mertebeden marjinal sistem basamak yanıtı.	34
Şekil 4.17 : İkinci mertebeden doğrusal olmayan sistem basamak yanıtı (a) ve kontrol işareti (b).	35
Şekil 4.18 : Ayarlanan kontrolör parametrelerinin değişimi.	36
Şekil 4.19 : Ölü zamanı arttırılmış ikinci mertebeden doğrusal olmayan sistem basamak yanıtı.	37
Şekil 4.20 : İndirgenmiş mertebeli sistem yanıtı ve kontrol işareti.	38
Şekil 4.21 : Ayarlanan kontrolör parametrelerinin değişimi.	39
Şekil 5.1 : Çok sönümlü sistem yanıtlarında oransal kazanç ayarlamasında kullanılan fonksiyonun değişimi.	42
Şekil 5.2 : Çok sönümlü sistem yanıtlarında referansa yaklaşma durumu için integral kazanç ayarlamasında kullanılan fonksiyonun değişimi.	43

Şekil 5.3 : Çok sönümlü sistem yanıtlarında referanstan uzaklaşma durumu için integral kazanç ayarlamasında kullanılan fonksiyonun değişimi.....	43
Şekil 5.4 : Birinci benzetim çalışması için sistem basamak yanıtı(a) ve kontrol işareti(b).....	44
Şekil 5.5 : İkinci benzetim çalışması için sistem basamak yanıtı(a) ve kontrol işareti(b).....	45
Şekil 5.6 : Az sönümlü ve çok sönümlü sistem yanıtı sağlayan kontrol sistemlerinin bir arada iyileştirilmesine yönelik anahtarlama mekanizması.	46

HATA VE NORMALİZE EDİLMİŞ İVME BİLGİSİNE DAYALI PI KONTROLÖR KATSAYI İYİLEŞTİRME YÖNTEMİ

ÖZET

Bu çalışmanın amacı klasik PI kontrolör katsayılarının iyileştirilmesine yönelik bir ayarlama mekanizması geliştirmektir.

Klasik PI ve PID kontrolörler basit bir yapıya sahip olmaları ve sistemlere kolay uygulanabilirlikleri sebebiyle endüstride yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar. Bu tip kontrolörlerin pek çok alanda yaygın olarak kullanılması çeşitli ve daha dayanıklı tasarım yöntemlerinin geliştirilmesini gerekli kılmıştır. Ayrıca, belirlenen kontrolör parametrelerinin ayarlanması için çeşitli stratejiler önerilmiştir. Yapılan çalışmada, PID kontrolörler ve Ziegler Nichols PID kontrol basamak yanıtı ve frekans yanıtı tasarım yöntemleri incelenmiştir ve literatürde, Ziegler Nichols tasarım yöntemi ile belirlenen kontrolör parametrelerini iyileştirmek amacıyla geliştirilmiş bir yöntem olan Arttırılmış Ziegler Nichols katsayı ayarlama yöntemi ele alınmıştır.

Bu çalışma ile temel olarak; ayarlama mekanizması, sistem hatası ve normalize edilmiş ivme değişkenlerinin giriş olarak kullanılması ile tasarlanmıştır. Normalize edilmiş ivme sistem yanıtı hakkında göreceli hız bilgisini sağlar. Buna ek olarak, hata ve hatanın değişimi değerleri kullanılarak konum ve sistem yanıtının referans değerine “yaklaşım” ya da referans değerinden “uzaklaşım” davranışı belirlenmiştir. Konum ve sistem yanıtının “yaklaşım” ya da “uzaklaşım” davranışına bağlı olarak ayarlama mekanizmasının fonksiyonu belirlenmiştir. Daha sonra, uygun ayarlama mekanizması kullanılarak kontrolör parametreleri çevrim içi güncellenmiştir.

Geliştirilen mekanizma ilk olarak Ziegler Nichols yöntemleri ile belirlenen kontrolör parametrelerini ayarlamak için kullanılmış, aşımli ve salınımlı yanıtlar iyileştirilmiştir. İkinci olarak ayarlama mekanizması çok sönümlü veya yavaş sistem yanıtları sağlayan kontrolör katsayılarını iyileştirmek amacıyla yeniden düzenlenmiştir. Önerilen yöntemin başarımı, Ziegler Nichols Ayarlamalı PI Kontrol ve Arttırılmış Ziegler Nichols Ayarlamalı PI Kontrol yöntemlerinin sistem yanıtları ve kontrol çıkışları ile karşılaştırılmıştır. Önerilen yöntemin hem basamak hem de bozucu girişlerine karşı daha iyi bir yanıt sağladığı gözlenmiştir.

IMPROVEMENT OF PI CONTROLLER PARAMETERS BASED ON ERROR AND NORMALIZED ACCELERATION INFORMATION

SUMMARY

The aim of this study is to develop an auto-tuning mechanism for improvement of the coefficients of conventional PI controllers.

Conventional PI and PID controllers are widely used in industry due to their simple structures and easy implementations. The widely use of these type of controllers in numerous fields, made it necessary to develop various and more robust design methodologies. Moreover, various strategies are proposed for fine tuning of the determined parameters. In this study, PID controllers and the Ziegler-Nichols PID controller design methods based on the step response and the frequency response are investigated and a Augmented Ziegler Nichols coefficient tuning method which is developed in the literature for the aim of improving Ziegler Nichols tuned controller parameters is discussed.

Basically, in this study, auto tuning mechanism is designed by using system error and normalized acceleration as inputs. The normalized acceleration provides a relative rate information about the system response. Moreover, using the values of the error and the change of the error, position and “approach” or “drift apart” nature of the system response is determined. According to this position and “approach” or “drift apart” nature of the system response the function of the auto tuning mechanism is determined. Then, the controller gains are updated in an online fashion using the appropriate auto tuning mechanism.

The proposed mechanism is firstly used for finetuning the controller gains determined due to Ziegler Nichols methods where oscillatory and overshooting responses are ameliorated. Secondly, the tuning mechanism is reformulated to finetune the controller gains which produces over damped or sluggish system response. Performance of the proposed method is compared with the system response and control outputs of Ziegler Nichols Tuned PI Control and Augmented Ziegler Nichols Tuned PI Control methods. The proposed method provide a better response for both step and disturbance inputs.

1. GİRİŞ

Son yıllarda, teknolojinin gelişmesi ve ilerlemesi ile birlikte kontrol sistemlerinin önemi her geçen gün artmakta ve geri beslemeli kontrol sistemleri basit ve etkili bir yöntem olarak geçerliliğini korumaktadır. PID kontrolörler günümüzde, geri beslemeli kontrolün en yaygın olarak kullanılan şeklidir. İntegral, oransal ve türev etkileri geçmiş(I), şimdi(P) ve gelecek(D) kontrol hata değerlerine dayanmaktadır. PID kontrolörler, hatta PI kontrolörler özellikle dinamikleri bilinen ve performans gereksinimleri karmaşık olmayan sistemler için sıklıkla kullanılan kontrolörlerdir. Süreç kontrolünde kullanılan kontrol yapılarının %95' inden fazlası PID tipi; pek çoğu da PI kontrolörüdür [1]. PI kontrolörler, kağıt endüstrisinde kullanılan kontrolörlerin %98' ini oluşturmaktadır [2].

PID kontrolör tasarımı, Ziegler ve Nichols [3] 1942' de kendi yöntemlerini ortaya attığından beri geniş bir araştırma alanı olmuştur [4]. Ziegler Nichols tasarım yöntemi PI ve PID kontrolörler için oldukça makul sonuçlar veren bir ayarlama yöntemi olması dolayısıyla yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ancak, Ziegler Nichols yöntemiyle ayarlanmış PI kontrolörleri birinci mertebeden sistemler için iyi bir performans sergilemesine rağmen yüksek mertebeli sistemlerde aşım ve salınımlı sistem yanıtları ile karşılaşmaktadır. Özellikle referans değer değişimlerinde yüksek üst aşım görülmekte, bozuculara karşı yeterli sistem kararlılığı sağlanamamaktadır. Ziegler Nichols yönteminin sahip olduğu olumsuzlukları ortadan kaldırmak amacıyla literatürde kontrolör parametrelerini otomatik olarak ayarlayan farklı yöntemler öne sürülmüştür. Geliştirilmiş(Refined) Ziegler Nichols Ayarlamalı PI (RZNPI) Kontrol yöntemi, normalize edilmiş kazanç ve normalize edilmiş ölü zaman vasıtasıyla kontrolör parametrelerini ayarlamayı amaçlar [5]. Arttırılmış Ziegler Nichols Ayarlamalı PI (AZNPI) Kontrol yöntemi ise hata ve hatanın değişimine bağlı olarak kontrolör parametrelerini ayarlayan bir yöntemdir [6]. Bu yöntemlerin her ikisi de sistem hatasına bağlı olarak geliştirilen katsayı ayarlama yöntemleridir.

Bu tezde, literatürde önerilen bu yöntemlerden farklı olarak klasik PI kontrolör katsayılarını iyileştirmek amacıyla, sistem hatası ve sistem yanıtının hızlanma bilgilerini bir arada kullanarak katsayıları çevrim içi ayarlayan bir mekanizma oluşturulmuştur. PI kontrolör katsayıları klasik bir çıkarım mekanizması kullanılarak ayarlanmıştır. Sistem hatası ve normalize edilmiş ivme bu çıkarım mekanizmasının bileşenlerini oluşturmaktadır. Normalize edilmiş ivme sistem yanıtının hızlanması hakkında bilgi vermektedir [7]. Hata ve hızlanma bilgileri kullanılarak kontrolöre ait oran ve integral katsayıları oluşturulan kurallar çerçevesinde çevrim içi olarak güncellenmiştir. Önerilen bu güncelleme mekanizması Ziegler Nichols ayarlamalı PI kontrolör katsayıları için ve deneme yanılma yoluyla katsayıları belirlenen bir klasik PI kontrolör katsayıları için olmak üzere iki farklı şekilde ele alınmış, aşımli ve aşımli sistem yanıtlarına karşı başarımlı incelenmiştir.

Yapılan çalışmanın ana hatlarını şu şekilde özetleyebiliriz: 2. Bölüm' de klasik PID kontrolörler hakkında detaylı bilgi verilmiş ve kontrolör parametrelerinin sistem yanıtına olan etkileri anlatılmıştır. 3. Bölüm' de Ziegler Nichols tasarım yöntemleri üzerinde durulmuştur. Literatürde Mudi tarafından önerilmiş olan Arttırılmış Ziegler Nichols Ayarlamalı PI Kontrol yöntemi ele alınmış ve ayarlama mekanizması hakkında bilgi verilmiştir.

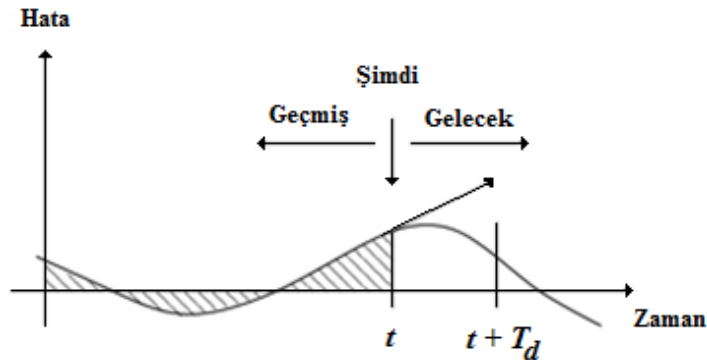
4. Bölüm' de ise bu çalışmada yeni bir ayarlama mekanizması olarak önerilen hata ve normalize edilmiş ivme bilgisine dayalı Ziegler Nichols PI kontrolör katsayılarını ayarlama yöntemi anlatılmıştır. Aynı bölümde geliştirilen yönteme ilişkin benzetim çalışmaları verilmiştir. 5. Bölüm' de Ziegler Nichols PI ayarlama yönteminden farklı olarak kontrolör katsayıları deneme yanılma yoluyla belirlenmiş çok sönümlü sistem yanıtlarının iyileştirilmesine ilişkin bir yaklaşım ele alınmıştır. Klasik PI kontrolörü ile elde edilen az sönümlü ve çok sönümlü sistem yanıtlarının bir arada iyileştirilebilmesi adına anahtarlama mekanizması kullanımına dair blok diyagram gösterilmiştir. Son bölümde ise geliştirilen yöntem ve benzetim sonuçları irdelenmiş, yapılan çalışma özetlenerek değerlendirilmiştir.

2. PID KONTROLÖRLER

PID kontrolü ilk ve en yaygın olarak kullanılan kontrol algoritmalarından biridir. Geri beslemeli kontrol olgusunun basitçe gerçekleştirilmesine olanak tanır. Bu sebeple, PID kontrolü bugün endüstri dallarında yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Endüstriyel kontrol uygulamalarında kullanılan kontrolörlerin %95' inden fazlası PID tipi kontrolörlerdir [1]. PID kontrolünün kullanılabilirliği birçok kontrol sistemine genel uygulanabilirliğinden kaynaklanmaktadır. Özellikle, sistemin matematiksel modelinin bilinmediği ve dolayısıyla analitik tasarım metotlarının uygulanamadığı durumlarda PID kontrol çok fazla yarar sağladığını kanıtlamaktadır [8].

PID kontrolörü üç terimden oluşmaktadır. Bu terimlerin algoritmadaki etkinlikleri Şekil 2.1 ile ilişkilendirilerek şu şekilde ifade edilebilir:

- i. Oransal terim P (Proportional); oransal kontrole karşılık gelir ve t anındaki hata değeri yani “Şimdiki” hata değeri ile orantılı olarak bir çıkış sinyali üretir.
- ii. İntegral terimi I(Integral); t anına kadar olan hata değerlerinin integrali ile orantılı olarak kontrol etkisi meydana getirir. “Geçmişteki” hata değerlerinin toplamı olarak değerlendirilebilir.
- iii. Türev terimi D (Derivative) ise t anındaki hatanın zamana göre türevi ile orantılı olarak bir çıkış verir. “Gelecekteki” hata değerinin öngörülmesi olarak belirtilebilir [9].



Şekil 2.1 : Hata – zaman eğrisi.

Kontrol sinyali bu üç terimin toplamı olarak ifade edilir. PID kontrolörüne ilişkin algoritma şu şekilde verilir:

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.1)$$

Burada;

$u(t)$: Kontrol sinyali,

$e(t)$: Kontrol hatası (sistem yanıtının olması istenilen değeri ile sistem çıkışı arasındaki fark),

K_p : Oransal kazanç,
 T_i : İntegral zamanı,
 T_d : Türev zamanı,
 } Kontrolör parametreleri

Denklem (2.1) ile belirtilen PID algoritmasının laplace dönüşümü alındığında kontrolöre ait transfer fonksiyonu denklem (2.2)' deki gibi olmaktadır:

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (2.2)$$

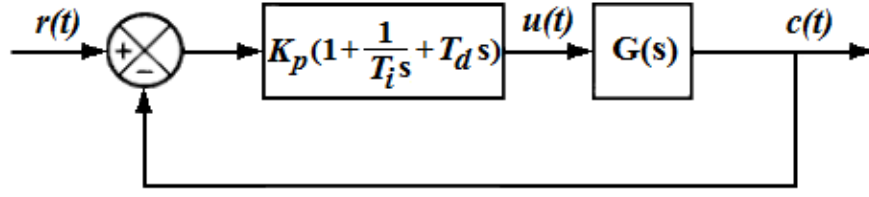
Bu standart formdaki algoritma ISA algoritması ya da ideal PID algoritması olarak da anılmaktadır. Oran, integral ve türev kontrolleri zaman bölgesinde birbirleriyle etkileşimsizdir [1].

(2.2) eşitliğinde verilmiş olan kontrolör transfer fonksiyonu integral kazanç katsayısı $K_i = K_p / T_i$ ve türev kazanç katsayısı $K_d = K_p \times T_d$ olmak üzere kazançlar cinsinden;

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (2.3)$$

şeklinde de yazılabilir.

PID kontrolörünün sisteme uygulanışı ise Şekil 2.2' de gösterilmiştir [8]:



Şekil 2.2 : PID kontrolörünün sisteme uygulanışı.

PID kontrolü kontrol edilmek istenen sistemin karakteristiklerine ve kontrol amacına bağlı olarak farklı şekillerde uygulanabilmektedir. Probleme bağlı olarak PID kontrolörünü oluşturan terimlerden hangilerinin kullanılacağı değişkenlik gösterir. Kontrolör, içinde barındırdığı terimlere göre isimlendirilir. En yaygın olarak kullanılan PID kontrolör tipleri ve transfer fonksiyonları Çizelge 2.1’ de verilmiştir [9].

Çizelge 2.1 : PID kontrolör tipleri.

Kontrolör tipi	Kullanılan terim	Transfer Fonksiyonu
Oran (P) kontrolü	Sadece P terimi	$G_c(s) = K_p$
İntegral (I) kontrolü $T_i = 1$	Sadece I terimi	$G_c(s) = \frac{K_p}{s}$
PI kontrol	P ve I terimleri	$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right)$
PD kontrol	P ve D terimleri	$G_c(s) = K_p (1 + T_d s)$
PID kontrol	P, I ve D terimleri	$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$

2.1 Kontrolör Parametrelerinin Etkisi

Daha önce de belirtildiği gibi oran, integral ve türev terimleri PID kontrolörü meydana getirmektedir. Oransal terim için K_p , integral terimi için K_i veya T_i ve türev terimi için K_d veya T_d sistem yanıtına etkiyen kontrolör parametreleridir. Bu parametrelerin her birinin sistem cevabına olan etkisi farklıdır.

Oransal kazanç katsayısı K_p ; sistem yanıtındaki hata değeriyle orantılı bir kontrol sinyali sağlar. K_p kazancı arttırıldıkça kalıcı hal hatası azalır ancak kazanç değerinin artmasıyla sistem dinamiklerine bağlı olarak daha salınımlı bir sistem yanıtı elde edilir. Sisteme sadece oransal kontrol uygulandığında kararlı durumda normal olarak bir kontrol hatası mevcut bulunur. İntegral kontrolünün sisteme uygulanışının temel sebebi bu hatayı ortadan kaldırmaktır. Kontrolöre integral teriminin eklenmesiyle bir PI kontrolör elde edilmiş olur. İntegral zamanı T_i ' nin sonlu değerleri için ($T_i \rightarrow \infty$ iken salt oran kontrolü mevcuttur) kalıcı hal hatası ortadan kalkar. T_i ' nin büyük değerleri için sistem yanıtı referans değerine yavaş bir şekilde yaklaşır. T_i değerinin küçülmesiyle sistem cevabı hızlanır ancak daha salınımlıdır. PI kontrolöre türev teriminin de eklenmesiyle PID kontrolörü elde edilir. Türev teriminin sisteme uygulanış amacı ise kapalı çevrim kararlılığını arttırmaktır. Türev teriminin varlığı hatanın öngörülmesini sağlar. $T_d = 0$ olduğu durumda sadece PI kontrolörü vardır. Sistem yanıtı salınımlı iken T_d ' nin değerinin arttırılmasıyla sistem cevabının sönüm miktarı artar. Ancak türev zamanının değerinin çok büyütülmesiyle öngörü kavramı ortadan kalkar ve sönüm miktarı azalır, salınım ise tekrar artmaya başlar.

Her bir kontrolör parametresinin birbirinden bağımsız bir şekilde arttırılması durumunda sistem performansına etkisi Çizelge 2.2' de gösterilmiştir [10]. Çizelgede bulunan ifadeler kararlı açık çevrimli sistemlerin parametre ayarlamalarında yardımcı olabilir. Çizelgede kontrolör tasarımı sırasında çoğunlukla göz önünde bulundurulmuş performans kriterleri yükselme zamanı, üst aşım, oturma zamanı ve hata değeri yer almaktadır.

Çizelge 2.2 : PID parametrelerinin sistem yanıtına etkisi.

Parametre	Yükselme zamanı	Üst aşım	Oturma zamanı	Kalıcı hal hatası	Kararlılık
K_p	Azalır	Artar	Az artar	Azalır	Kötüleşir
K_i	Az azalır	Artar	Artar	Önemli derecede azalır	Kötüleşir
K_d	Az azalır	Azalır	Azalır	Çok az değişim olur	İyileşir

2.2 Kontrolör Parametrelerinin Ayarlanması

Bir sistemin matematiksel modeli elde edilebiliyorsa, sistemin kapalı çevrim geçici ve sürekli rejim özelliklerine bağlı olarak kontrolör parametrelerinin belirlenmesine yönelik pek çok değişik tasarım yöntemi mevcuttur. Eğer sistem matematiksel modeli kolaylıkla elde edilemeyecek kadar karmaşık ise PID kontrolörünün analitik yöntemlerle tasarımı mümkün değildir. Bu durumda PID kontrolör parametrelerini ayarlamak için deneysel yaklaşımlara başvurmamız gerekir.

Literatürde PI ve PID kontrolörlere dair pek çok tasarım yöntemi önerilmiştir. Önerilen yöntemlerde farklı performans iyileştirmeleri gözetilerek kontrolör tasarımının gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır [2]. Kontrolör parametrelerini hem minimum çabayla istenilen değerlerine ayarlamak hem de sistemin matematiksel modelinin elde edilmesinde karşılaşılabilecek olası zorluklar sebebiyle bu tasarım yöntemleri oluşturulmuştur. En çok bilinen PID tasarım tekniklerinde reaksiyon eğrisi ve nominal işlem noktasında oransal kontrol etkisiyle oluşturulan kapalı çevrim döngüsü kullanılmıştır [13]. Cohen ve Coon, basamak yanıtı yönteminden yola çıkarak uzun ölü zamana sahip sistemler için bir tasarım yöntemi önermişlerdir [11]. Åström ve Hägglund ise Nyquist eğrisi üzerinde istenilen faz payı ve kazanç payına ulaşmak için eğri üzerindeki bir noktayı istenilen noktaya taşıma esasına dayanarak bir yöntem geliştirmişlerdir [12]. Literatürde önerilen yöntemlerden en yaygın olarak kullanılanlardan biri de Ziegler Nichols tasarım yöntemidir. Ziegler ve Nichols PID kontrolör parametreleri K_p , T_i ve T_d ' nin ayarlanmasına ilişkin kurallar önermişlerdir. Bu kurallar, basamak yanıtı ve sadece oransal kontrolör kullanılması durumunda sistemi marjinal kararlı hale getiren K_p değeri baz alınarak PID kontrolörlerin ayarlanmasını sağlar [8].

3. ZIEGLER NICHOLS PID KONTROL TASARIM YÖNTEMLERİ

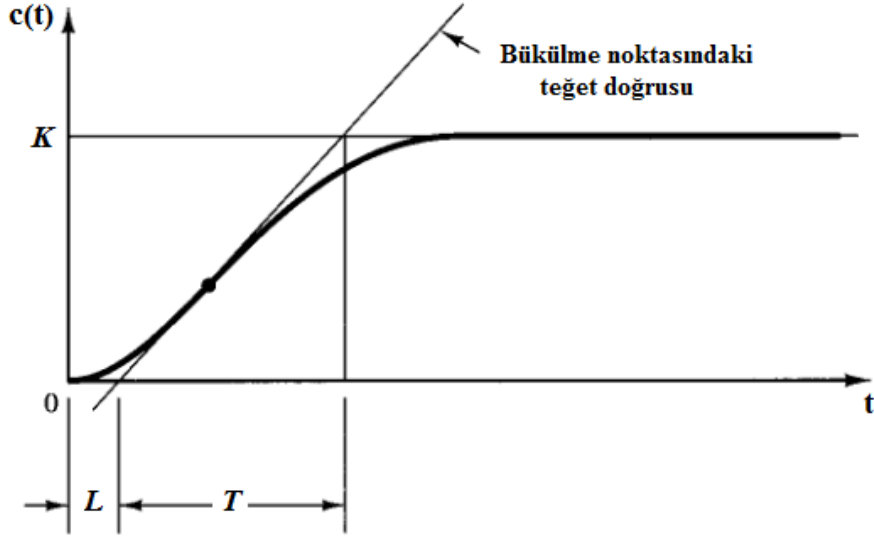
PID kontrolör parametrelerinin belirlenmesine ilişkin 1942 yılında Ziegler ve Nichols tarafından iki klasik yöntem önerilmiştir. Bu yöntemler hala yaygın bir şekilde orijinal halleriyle veya bazı değişikliklerle kullanılmaktadır. Ziegler Nichols ayarlama kuralları basit ve sezgiseldir. Sistem hakkında çok az bilgi gerektirirler ve çok çaba sarf etmeden uygulanabilirler. Sistem, basit deney yöntemleriyle belirlenebilecek iki parametre ile ifade edilir. Bu ayarlama yöntemleri basamak yanıtı yöntemi ve frekans yanıtı yöntemidir. Her iki yöntem ile tasarım esnasında basamak yanıtında maksimum %25 üst aşım elde edilmesi amaçlanmıştır [1].

3.1 Basamak Yanıtı Yöntemi

Ziegler ve Nichols tarafından ortaya atılmış olan ilk tasarım metodu açık çevrim basamak yanıtındaki sistem bilgisine dayanmaktadır. Basamak yanıtı yöntemi reaksiyon eğrisi metodu olarak da anılır. Basamak yanıtı, Şekil 3.1' de gösterilen biri zaman gecikmesi L ve diğeri zaman sabiti T olmak üzere sadece iki parametre ile nitelenir. Bu parametreler bulunurken; öncelikle açık çevrim basamak yanıtı eğrisinin maksimum eğime sahip olduğu nokta (bükülme noktası) bulunur. Daha sonra bulunan bu noktaya teğet doğrusu çizilir. Teğet doğrusu ile koordinat eksenlerinin kesişimi L ve T parametrelerini verir. Zaman gecikmesi L, basamak girişinin sisteme uygulanmasından sistem yanıtının görülmesine kadar geçen zamandır. Ziegler Nichols yöntemi ile bulunan zaman gecikmesi değeri sistemin gerçek ölü zamanından biraz daha fazladır. Bu, yüksek mertebeli sistem yerine düşük mertebeli sistem modelinin kullanılmaya çalışılmasından kaynaklanır.

Basamak yanıtı yöntemi, birinci dereceden zaman gecikmeli sistem yaklaşımı ile uygulanır. Benzetim yapılan sistem transfer fonksiyonu eşitlik (3.1)' de verilmiştir:

$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{Ke^{-Ls}}{Ts + 1} \quad (3.1)$$



Şekil 3.1 : Ziegler Nichols basamak yanıtı yöntemi.

Ziegler ve Nichols, sistem parametrelerini tanımladıktan sonra PID kontrolör parametrelerinin deneysel sonuçlarla ortaya koymuş oldukları Çizelge 3.1’ de verilen kurallar yardımıyla ayarlanmasını önermişlerdir [3].

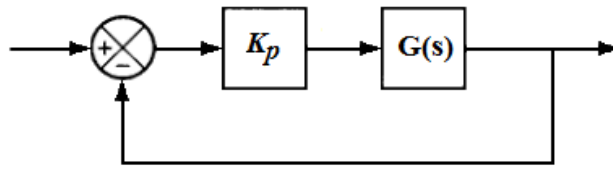
Çizelge 3.1 : Basamak yanıtı yöntemine göre PID parametrelerinin belirlenmesi.

Kontrolör tipi	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{KL}$	∞	0
PI	$0.9 \frac{T}{KL}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{KL}$	$2L$	$0.5L$

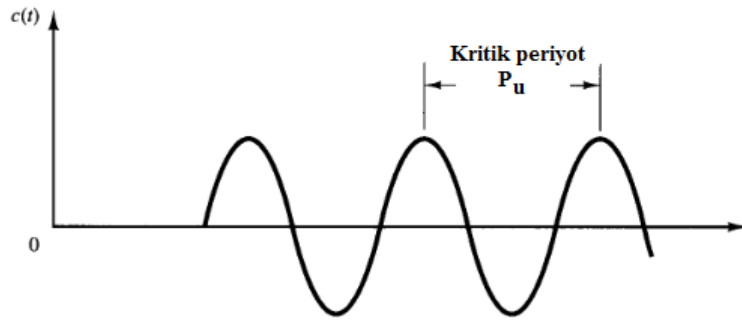
Ziegler Nichols basamak yanıtı yöntemi ile kontrolör parametrelerini ayarlamak için sisteme sadece basamak girişi uygulanması yeterlidir. Bu yöntem, kontrolör parametrelerinin nasıl ayarlanması gerektiğine dair bir fikir sahibi olabilmek açısından iyi bir başlangıç noktasıdır. Ancak, yük değişimlerine ve giriş işaretindeki değişimlere karşı hassas olması bu yöntem için bir dezavantaj oluşturmaktadır.

3.2 Frekans Yanıtı Yöntemi

Ziegler ve Nichols tarafından önerilen ikinci yöntemde öncelikle $T_i = \infty$ ve $T_d = 0$ olarak ayarlanır. Yani sisteme sadece oransal kontrol uygulanır (Şekil 3.2). K_p değeri sıfırdan itibaren sistem cevabı osilasyon yapmaya başlayana kadar arttırılır. Salınlı cevabın elde edildiği kazanç değeri kritik kazanç K_u ve sistem çıkışındaki osilasyonun periyodu kritik periyot P_u ' dur (Şekil 3.3). Eğer oransal kazanç katsayısının herhangi bir değeri için sistem çıkışı salınlı olarak elde edilemiyorsa parametre belirlemede bu yöntem uygulanamaz [8].



Şekil 3.2 : Sadece oransal kontrol uygulanmış kapalı çevrimli sistem.



Şekil 3.3 : Kritik periyot ve sürdürülen salınım.

Ziegler ve Nichols kapalı çevrim yanıtından yola çıkarak K_p , T_i ve T_d kontrolör parametrelerinin nasıl belirleneceğini Çizelge 3.2' deki gibi önermişlerdir:

Çizelge 3.2 : Frekans yanıtı yöntemine göre PID parametrelerinin belirlenmesi.

Kontrolör tipi	K_p	T_i	T_d
P	$0.5K_u$	∞	0
PI	$0.45K_u$	$\frac{1}{1.2}P_u$	0
PID	$0.6K_u$	$0.5P_u$	$0.125P_u$

Ziegler Nichols tasarım yöntemlerinin avantajı, parametre belirleme kurallarının kolaylıkla uygulanabilmesidir. Ancak, kolay bir yöntem olmasına ve yaygın bir şekilde kullanılmasına rağmen aşım ve salınımlı sistem yanıtlarına yol açan bir kontrolör tasarım yöntemidir. Ayrıca, büyük gecikme sürelerine sahip sistemlerin kontrolünde iyi bir performans elde edilememektedir.

Literatürde Ziegler Nichols tasarım yönteminin bu olumsuzluklarını ortadan kaldırmak adına çalışmalar yapılmış, kontrolör katsayılarını çevrim içi güncelleyen yöntemler önerilmiştir. Kontrolör parametrelerini iyileştirmek amacıyla geliştirilmiş ayarlama mekanizmalarından biri Artırılmış Ziegler Nichols ayarlama yöntemidir.

3.3 Artırılmış Ziegler Nichols Ayarlama Yöntemi

Klasik kontrolörlerin tasarımında her ne kadar Ziegler Nichols yöntemleri yaygın olarak kullanılıyor olsa da yüksek üst aşım ve salınımlı sistem yanıtları elde edilmektedir. 2008 yılında Mudi tarafından önerilen bir yöntem olan Artırılmış Ziegler Nichols ayarlama yöntemi Ziegler Nichols PI kontrolörünün parametrelerini ayarlayarak sistem yanıtını iyileştirmeyi amaçlar [6]. Bu yöntem, ikinci ve daha yüksek mertebeden sistemler için Ziegler Nichols frekans yanıtı yöntemi ile tasarlanan kontrolörlerde karşılaşılan yüksek üst aşımın engellenmesi ve daha iyi bir geçici rejim cevabının elde edilmesi amacıyla öne sürülmüş bir yöntemdir. Artırılmış Ziegler Nichols Ayarlamalı PI kontrol yönteminde ayarlama mekanizması şu şekilde çalışmaktadır:

Sistem yanıtı referans değerinden uzaklaşıyor iken sistem yanıtını istenen değere geri getirebilmek amacıyla kontrolör etkisi olabildiğince artırılır. Diğer taraftan, sistem yanıtı referans değerine doğru yaklaşıyor iken bir sonraki aşamada meydana gelmesi muhtemel üst aşım ve alt aşımları kısıtlamak amacıyla kontrol etkisi azaltılır. Bu düşünceyi gerçeklemek amacıyla, anlık sistem yanıtına bağlı olarak oran ve integral katsayılarını sürekli olarak güncelleyen bir çevrim içi kazanç ayarlama faktörü kullanılmıştır. Kazanç ayarlama faktörü α sistem hatası (e) ve hatanın değişimi (Δe)'nin bir fonksiyonudur. r referans değeri ve $y(k)$ sistem çıkışı olmak üzere:

hata;

$$e(k) = r - y(k) \quad (3.2)$$

hatanın değişimi;

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k-1) \quad (3.3)$$

kazanç faktörü;

$$\alpha(k) = e_N(k) \cdot \Delta e_N(k) \quad (3.4)$$

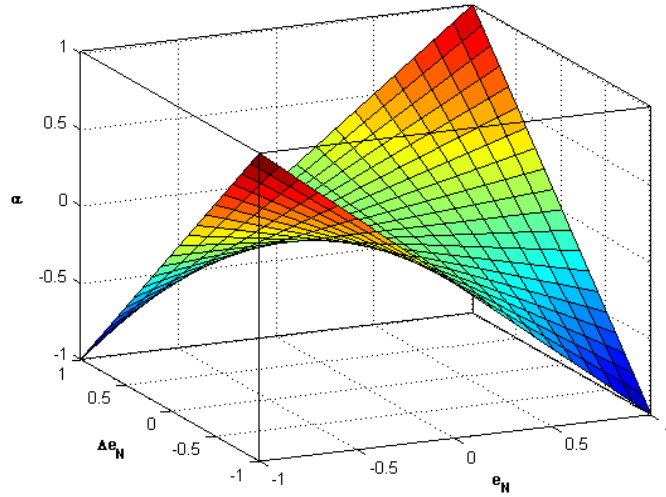
şeklinde tanımlanır. Burada,

$$e_N(k) = \frac{e(k)}{|r|} \quad (3.5)$$

ve

$$\Delta e_N(k) = e_N(k) - e_N(k-1) \quad (3.6)$$

sırasıyla $e(k)$ ve $\Delta e(k)$ ' nin normalize edilmiş değerleridir. Bütün kapalı çevrim kararlı sistemler için α değeri $[-1,1]$ aralığında değişmektedir. şekil 3.3' de α ' nın e ve Δe ' ye bağlı değişimi görölmektedir.



şekil 3.4 : α ' nın e ve Δe ' ye bağlı değişimi.

3.3.1 Arttırılmış Ziegler Nichols ayarlamalı PI kontrolörü

K_p ve K_i Ziegler Nichols frekans yanıtı yöntemi ile belirlenen kontrolör katsayıları olmak üzere, bu katsayıların α parametresi yardımıyla ayarlanması (3.7) ve (3.8) denklemleri ile verilen ampirik formüller yardımıyla yapılır:

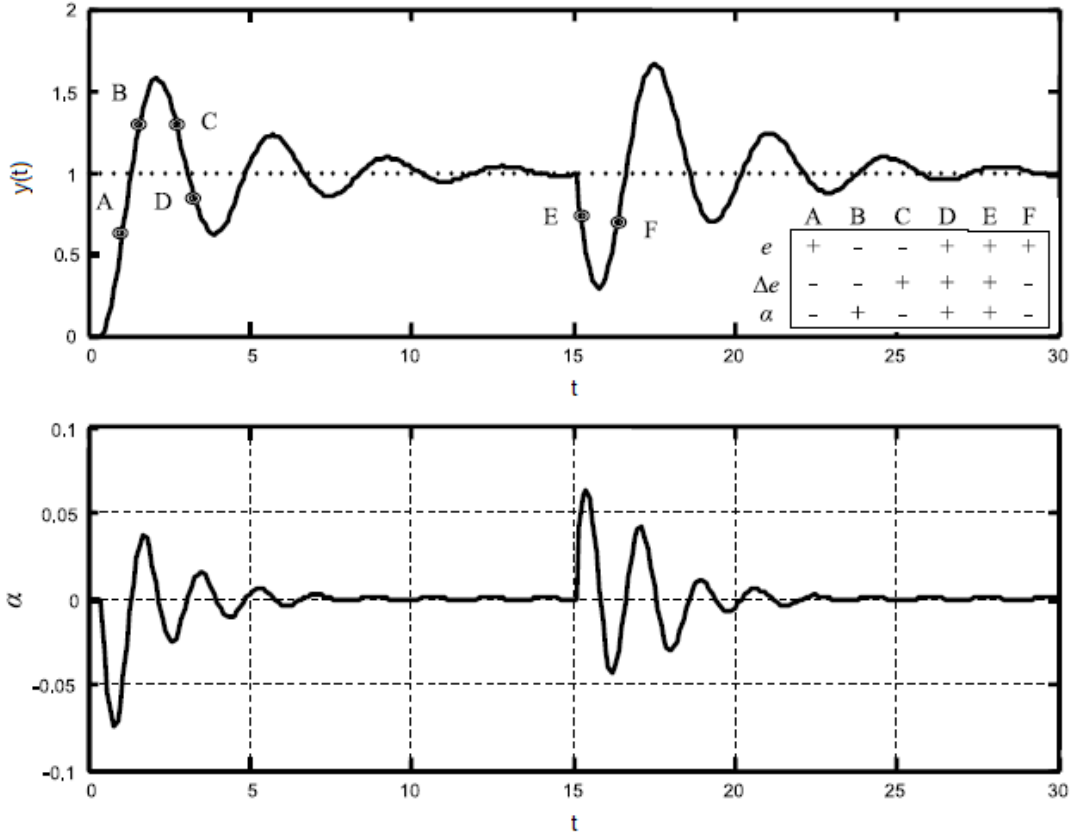
$$K_p^t = K_p (1 + k_1 |\alpha(k)|) \quad (3.7)$$

$$K_i^t = K_i (0.5 + k_2 \alpha(k)) \quad (3.8)$$

Burada, $K_p^t(k)$ ve $K_i^t(k)$, k zamanındaki ayarlanmış oran ve integral katsayılarıdır. k_1 ve k_2 , K_p ve K_i ' nin başlangıç değerlerinde istenilen sistem yanıtını sağlayacak şekildeki değişimleri gerçekleştirmek amacıyla kullanılır. Ayarlanmış kontrolör denklemini (3.9)' daki gibi olmaktadır.

$$u^t(k) = K_p^t(k) + K_i^t \sum_{i=0}^k e(i) \quad (3.9)$$

Arttırılmış Ziegler Nichols Ayarlamalı PI kontrol yöntemi ile sistem yanıtının farklı evrelerinde uygun kontrol etkisinin sağlanması amaçlanmıştır. Yöntemin daha anlaşılır olması için İkinci dereceden az sönümlü bir sistemin kapalı çevrim yanıtı ile α' nın buna bağlı değişimi Şekil 3.5' te gösterilmiştir.



Şekil 3.5 : İkinci dereceden az sönümlü sistem yanıtı ve α' nın değişimi.

(3.7) ve (3.8) ifadeleri ile PI kontrolör katsayılarının ayarlanması şu şekilde gerçekleştirilir:

- i. Sistem yanıtı referans değerinden uzak ve referansa doğru yaklaşıyor iken (Şekil 3.5 A,C,F noktaları) oransal kazanç değeri, sistem yanıtının referansa hızlıca ulaşması açısından olabildiğince büyük olmalı ancak integral kazanç değeri büyük üst aşım ve alt aşımlara sebep olabilecek kontrol etkisini engellemek amacıyla yeterince küçük olmalıdır. Bu durumda e ve Δe zıt işaretli ve dolayısıyla α negatiftir. Bu da oran kazancının başlangıç değerinden daha büyük, integral kazancının ise daha küçük olmasına sebep olur.
- ii. Sistem yanıtı referans değerinden uzaklaşıyor iken (Şekil 3.5 B,D,E noktaları) sistem yanıtını istenen değerine hızlıca getirebilmek amacıyla oran ve integral katsayıları artırılır. Bu durumda e ve Δe aynı işaretli ve dolayısıyla α pozitiftir. Bütün kazanç değerleri başlangıç değerlerinden daha büyüktür.

4. HATA VE NORMALİZE EDİLMİŞ İVME BİLGİSİNE DAYALI ZİEGLER NİCHOLS PI KONTROLÖR KATSAYI İYİLEŞTİRME YÖNTEMİ

Sisteme ait hata değeri dikkate alındığında; kontrolörün integral bileşeni küçük bir değerde seçilirse sistem yanıtı oldukça yavaş olacaktır. Buna karşın integral parametresi çok büyük seçilirse sistem yanıtı kararsız hale gelebilecek kadar hızlanacaktır. Zamanla parametreleri değişen bir kontrolör gerçekleştirildiğinde sistem yanıtının erken safhalarında kontrolörün büyük bir integral değerine sahip olması ve sistem yanıtı referans değerine yaklaştıkça integral değerinin kademeli olarak düşürülmesi düşünülebilir. Ancak, sistem yanıtının hızlanması hakkında bilgi edinilebilirse kontrolör parametrelerinin ayarlanması sistem yanıtının konumuna bağlı olarak bahsedilmiş olan ayarlardan farklı olacaktır. Örneğin; sistem yanıtının hızı “çok yavaş” iken sistem yanıtı referans değerine “çok yakın” ise kontrolörün integral etkisi azaltılmayacaktır. Oysa ki sadece sistem hatası ya da sistem yanıtının konumu dikkate alındığında integral değeri azaltılacaktı. Bu durumun tersi düşünüldüğünde sistem yanıtı “çok hızlı” iken sistem yanıtı referans değerine “çok uzak” ise integral etkisi azaltılmalıdır. Sadece sistem yanıtının konumu ya da hata değeri dikkate alındığında integral değeri azaltılmayacaktır.

Sistem yanıtının hızlanma bilgisi, 2003 yılında Güzelkaya ve diğerleri tarafından önerilen bir çalışmada bağıl hız gözleyicisi ile bulanık PID tipi kontrolör parametrelerinin ayarlanması amacıyla kullanılmıştır. Burada, sistem hatası ve normalize edilmiş ivme [14] değişkenleri kullanılarak bir bulanık çıkarım mekanizması oluşturulmuş ve bulanık PID tipi kontrolörün parametreleri güncellenmiştir.

Bu tez çalışmasında ise önerilen yöntem, sisteme ait hata değeri ile sistem yanıtının hızlanma bilgilerini beraberce kullanarak klasik PI kontrolöre ait katsayıları güncel olarak ayarlamaktadır. Geliştirilen yöntemde sistem hatası (e) ve normalize edilmiş ivme bilgisi (r_v) kullanılarak bir kazanç ayarlama mekanizması oluşturulmuştur.

Oluşturulan bu ayarlama mekanizması ile PI kontrolöre ait katsayılar güncel bir biçimde ayarlanmaktadır. Katsayıları ayarlayan çıkarım mekanizmasının “e” olarak belirtilen “sistem hatası” ve “r_v” olarak adlandırılan “normalize edilmiş ivme” olmak üzere iki girişi mevcuttur. Sistem hatasının değişimi ile hata değişimindeki hızlanma miktarından faydalanılarak bulunan “r_v”, sistem yanıtının hızlanması hakkında bilgi veren bağıl ivme değişkenidir.

4.1 Normalize Edilmiş İvme Kavramı

Normalize edilmiş ivme, sistem yanıtının hızlılığı ya da yavaşlığı hakkındaki “bağıl hız” bilgisini vermektedir. Bu sebeple bu bilgiyi sağlayan mekanizma “bağıl hız gözleyicisi” olarak adlandırılır. Normalize edilmiş ivme r_v(k) denklem (4.1) ile ifade edilir:

$$r_v(k) = \frac{de(k) - de(k-1)}{de(.)} = \frac{dde(k)}{de(.)} \quad (4.1)$$

Burada de(k) hata değerindeki değişim ve dde(k) hata değerindeki hızlanma olmak üzere;

$$de(k) = e(k) - e(k-1) \quad (4.2)$$

ve

$$dde(k) = e(k) - de(k-1) \quad (4.3)$$

eşitlikleri ile belirtilirler. de(.) ise şu şekilde seçilir:

$$de(.) = \begin{cases} de(k), & \text{if } |de(k)| \geq |de(k-1)| \\ de(k-1), & \text{if } |de(k)| < |de(k-1)| \end{cases} \quad (4.4)$$

Sistem cevabı yumuşak ve kararlı artma ya da azalmaya sahip olduğunda de(k).de(k-1) çarpımı pozitif olur ve sistem cevabının “hızlılık” ve “yavaşlık” bilgisi r_v(k) değişkeni kullanılarak elde edilebilir. Eğer hatadaki değişimin mutlak değeri |de(k)| bir önceki değer olan |de(k-1)|’ den büyük ise o zaman sistem yanıtı “hızlı” bir biçimde artmakta ya da azalmaktadır.

Bu durumun aksine hatadaki değişimin mutlak değeri $|de(k)|$ bir önceki değer olan $|de(k-1)|$ ’ den küçük ise o zaman sistem yanıtı “yavaş” bir şekilde artmakta ya da azalmaktadır. Çizelge 4.1 $dde(k)$ ve $de(.)$ parametrelerinin işaretlerine bağlı olarak sistem yanıtının “hızlılık” ya da “yavaşlık” durumunu göstermektedir. Böylelikle (4.1) eşitliği sistem yanıtının “hızlılık” ya da “yavaşlık” bilgisini de koruyarak hızlanma terimi olan $dde(k)$ ’ yı normalize etmek amacıyla türetilmiştir.

Çizelge 4.1 : $dde(k)$ ve $de(.)$ işaretlerine bağlı olarak sistem yanıtının davranışı.

$de(k-1)$ veya $de(k)$	$dde(k)$	Sistem yanıtı
Pozitif	Pozitif	Hızlı
Pozitif	Negatif	Yavaş
Negatif	Pozitif	Yavaş
Negatif	Negatif	Hızlı

(4.1) eşitliği ile verilen normalize edilmiş ivme $r_v(k)$ denklemi sistem yanıtının hızlanmasına ilişkin $[-1,1]$ aralığında bir değer üretir. Eğer sistem yanıtı çok hızlı ise $r_v(k)$ “1” değerine ve eğer sistem yanıtı çok yavaş ise $r_v(k)$ “-1” değerine yakınsar. Sistem yanıtının sabit bir hızla artıyor ya da azalıyor olması durumunda ise hızlılık orta seviye olarak kabul edilir ve $r_v(k)$ “0” değerine yakınsar.

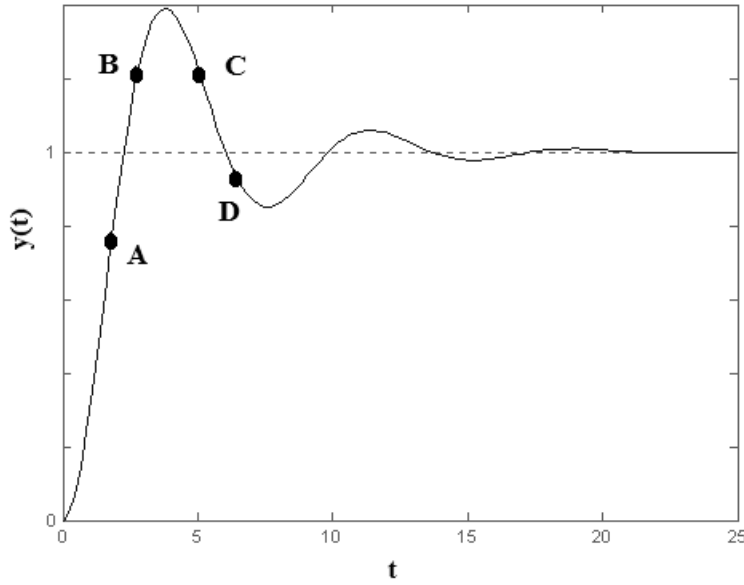
Sistem yanıtının hızlanma bilgisi ve hata değeri kullanılarak kontrolör parametreleri Ziegler Nichols yöntemi ile belirlenen PI kontrolörünün iyileştirilmesine yönelik çalışma ve bu çalışmanın sonuçları sonraki bölümlerde detaylı bir şekilde anlatılmaktadır.

4.2 Hata Ve Normalize Edilmiş İvme Bilgisine Dayalı Ziegler Nichols

Ayarlamalı PI Kontrolörü

Hata ve hız bilgileri ile oluşturulan ayarlama mekanizmasının kontrolör katsayılarına çarpan olarak etkimesiyle daha iyi bir sistem yanıtı elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu tasarım sayesinde Ziegler Nichols PI kontrolünde mevcut olan yüksek üst aşımaların önüne geçilmiş ve bozuluculara karşı daha dayanıklı bir sistem yanıtı sağlanmıştır.

Ayarlama mekanizmasının gerçekleştirilmesi aşamasında hata ve hatanın değişimi göz önünde bulundurularak sistem yanıtının referans değerine olan konumu belirlenmiş, konum ve hızlanma bilgisinden yararlanılmıştır. Bu iki değişkene bağlı olarak PI kontrolör katsayılarının çevrim içi güncellenmesi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.1’ de görülen kapalı çevrim sistem yanıtında belirlenmiş noktalara göre hata ve hatanın değişiminin işaretleri Çizelge 4.2’ de verilmiştir. Buna göre hata ve hatanın değişimi zıt işaretli iken sistem yanıtı referans değerine yaklaşıyor, aynı işaretli iken sistem yanıtı referans değerinden uzaklaşıyor denebilir.



Şekil 4.1 : Örnek sistem kapalı çevrim basamak yanıtı.

Çizelge 4.2 : Hata ve hatanın değişiminin bölgelere göre işaret durumları.

	de		
		Negatif	Pozitif
e			
	Negatif	B	C
	Pozitif	A	D

Bu sayede sistem hata değeri ile birlikte referans değerine göre değişimi hakkında bilgi sahibi olunur. Kontrolör katsayılarının iyileştirilmesinde sistem yanıtının referans değerine yaklaşıyor ya da referans değerinden uzaklaşıyor olması durumu dikkate alınarak bu iki durum için kontrol işaretinin değiştirilmesi amaçlanır.

Ziegler Nichols ayarlama yöntemi ile bulunan PI kontrol kazanç katsayıları, kontrolörün iyileştirilmesi amacıyla belirlenen birtakım kurallara göre güncellenir. Ayarlama mekanizması Ziegler Nichols kontrol parametrelerini başlangıç aşamasında yorumlar ve parametreleri sistem yanıtına bağlı olarak belirli bir değere taşır ve bu değere göre arttırma ve azaltma yaparak ayarlama işlemini gerçekleştirir. Kontrol aşamasında sistem yanıtını iyileştirebilmek amacıyla oran ve integral parametreleri aşağıdaki kurallara göre güncellenmiştir:

- i. Oransal kazanç (P): Sistem yanıtının referans değerine yaklaşıyor ve uzaklaşıyor olması durumlarının her ikisi için de sistem yanıtı yavaş ve referans değerine uzak yani hata değeri büyük iken oransal kazanç değeri azaltılmaz. Sistem yanıtı hızlandıkça oluşabilecek aşımaların önüne geçmek amacıyla oransal kazanç değeri azaltılmalıdır.
- ii. İntegral kazancı (I): Sistem cevabı referans değerine yaklaşıyor iken (Şekil 4.1, A ve C noktaları) sistem yanıtı yavaş ve hata büyük iken integral katsayısı arttırılmalı sistem yanıtı hızlandıkça azaltılmalıdır. Sistem cevabı referans değerinden uzaklaşıyor iken (Şekil 4.1, B ve D noktaları) sistem yanıtı yavaş ve hata büyük iken integral katsayısı azaltılmalı sistem yanıtı hızlandıkça arttırılmalıdır.

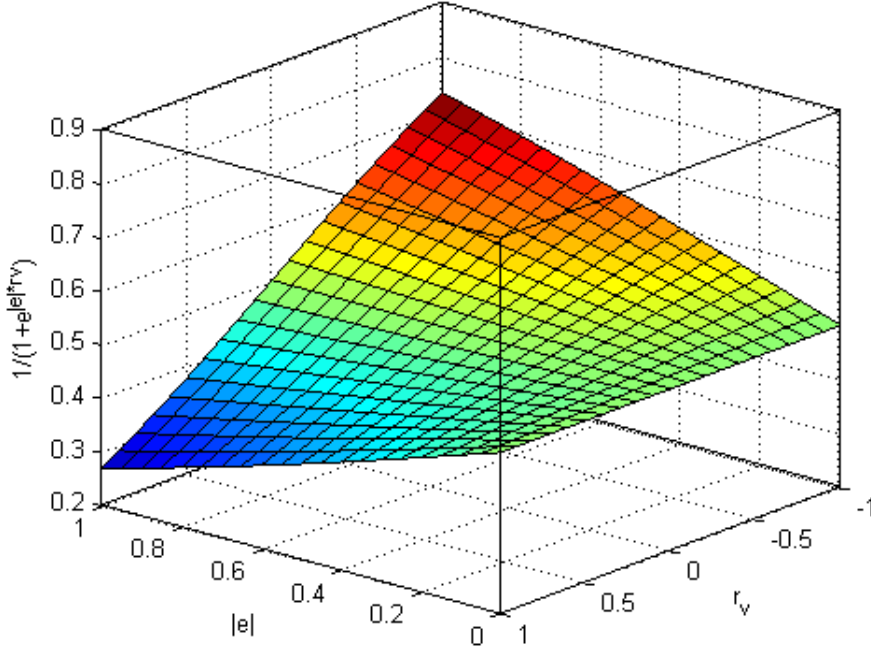
Yukarıda bahsedilen kurallar yardımıyla Ziegler Nichols kontrolör parametrelerini iyileştirmek amacıyla hata değişkeninin mutlak değeri l ve normalize edilmiş ivme değeri r_v ' nin çarpımı kullanılarak birtakım ifadeler oluşturulmuştur. Bu iki değişkenin çarpımının üstel fonksiyon değeri alınarak r_v değişkeninde meydana gelen işaret değişiminden büyüklük olarak faydalanılmış, oluşturulan ifadelerin her zaman için pozitif olması sağlanmıştır.

PI kontrolör parametrelerinden oransal kazanç değeri K_p (4.5) eşitliği yardımıyla güncellenir:

$$K_p^m = K_p \left[\frac{1}{1 + e^{(l|r_v)}} \right] \quad (4.5)$$

Oran katsayısını güncellemek amacıyla kullanılan ifadenin sistem hatası ve normalize ivme değişkenlerine göre değişimi Şekil 4.2' de gösterilmiştir. Bu fonksiyonun uygulanması ile hatanın büyük olduğu durumda sistem yanıtı yavaş iken

oransal kazanç çarpanı değeri daha büyük bir katsayı ile çarpılır. Sistem yanıtı hızlandıkça katsayı değeri azaltılır ve sistem yanıtında oluşabilecek aşımın önüne geçilmesi amaçlanır.



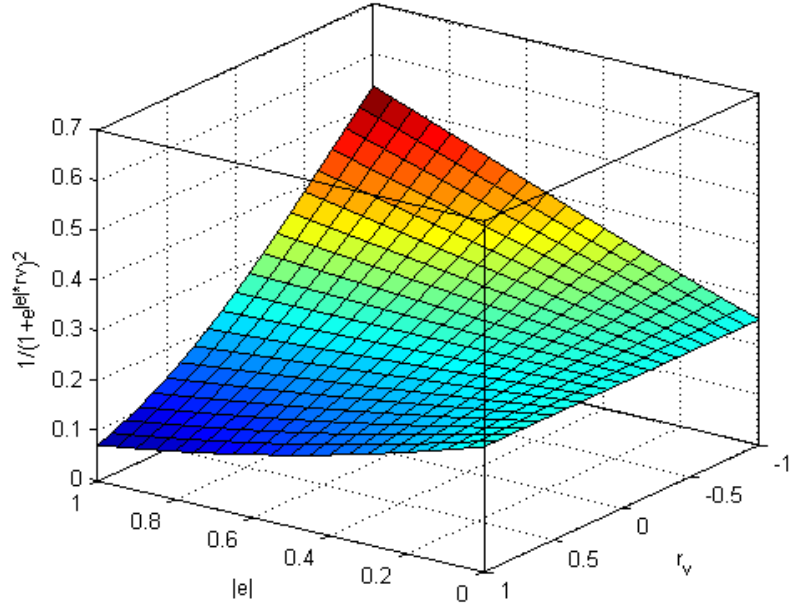
Şekil 4.2 : Oransal kazanç ayarlamasında kullanılan fonksiyon yüzeyi.

Kontrolör parametrelerinden integral bileşeni için güncelleme yapılırken sistem yanıtının referans değerine yaklaşıyor olması ve referans değerinden uzaklaşıyor olması durumlarında iki farklı ifade kullanılır. Sistem yanıtı referans değerine yaklaşıyor iken integral kazancının güncellenmesinde;

$$K_i^m = K_i \left[\frac{1}{\left(1 + e^{|e|r_v}\right)^2} \right] \quad (4.6)$$

eşitliği kullanılır. Bu güncelleme için kullanılmakta olan fonksiyon yüzeyi Şekil 4.3 ile gösterilmiştir.

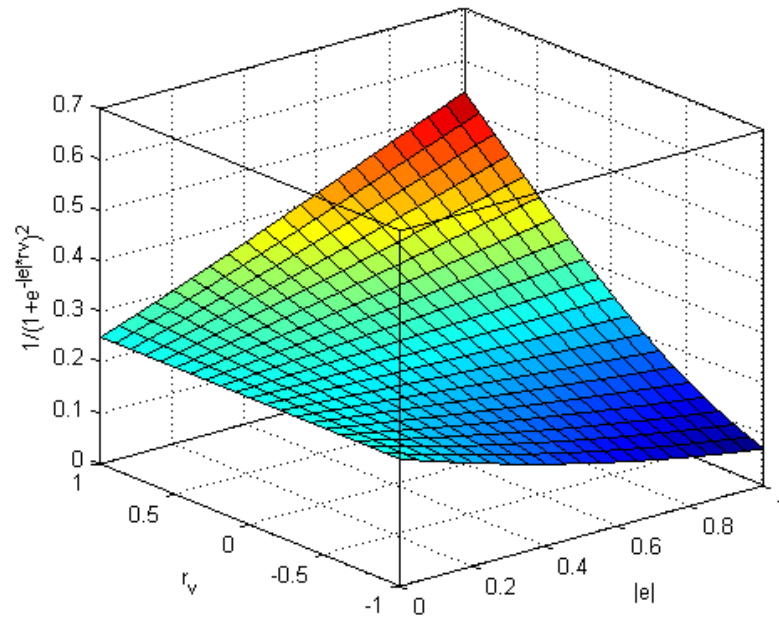
Sistem yanıtı referans değerine yaklaşıyor iken; sistem yanıtı referans değerinden çok uzak ve sistem yanıtı çok yavaş ise (4.6) ifadesi yardımıyla integral katsayısı için daha büyük bir çarpan değeri kullanılır. Sistem yanıtı hızlandıkça hata değeri büyük de olsa kontrol işaretinde oluşabilecek birikmeyi önlemek için integral parametresinin değeri küçültülür.



Şekil 4.3 : Referansa yaklaşma durumu için integral kazanç ayarlamasında kullanılan fonksiyonun değişimi.

İntegral kazancı, sistem yanıtı referans değerinden uzaklaştığı durumda (4.7) eşitliği ile gücellenir. Şekil 4.4' te bu durum için integral katsayısını ayarlama için kullanılan fonksiyonun değişimi görülmektedir.

$$K_i^m = K_i \left[\frac{1}{\left(1 + e^{-|e|r_v}\right)^2} \right] \quad (4.7)$$



Şekil 4.4 : Referanstan uzaklaşma durumunda integral kazanç ayarlaması için kullanılan fonksiyonun değişimi.

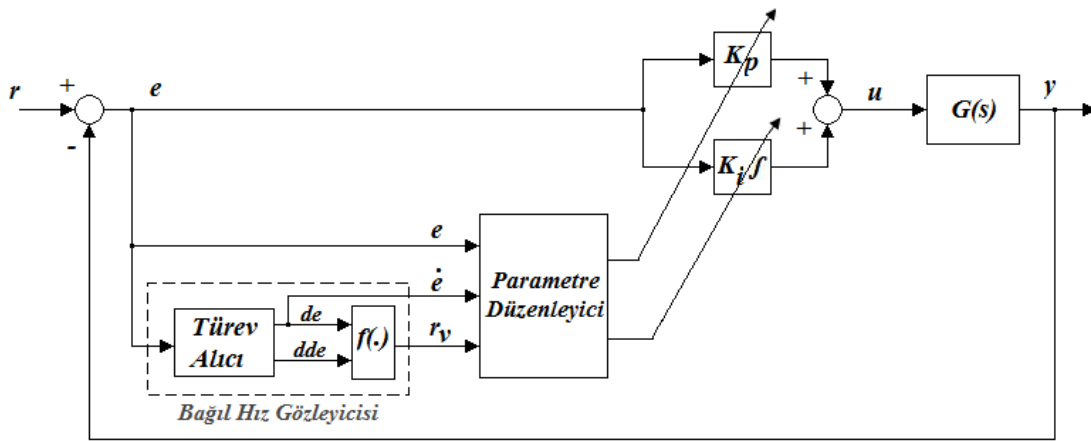
Sistem yanıtı referans değerinden uzaklaşıyor iken yani sistem yanıtının alt aşım ya da üst aşım yapması hali için hata değeri büyüdükçe integral katsayısı azaltılır. Sistem yanıtı çok hızlı iken sistem yanıtını istenilen noktaya geri getirebilmek amacıyla daha büyük bir çarpan kullanılarak integral katsayısı artırılır.

Tanımlanan ifadeler yardımıyla ayarlanmış kontrol işareti (4.8) eşitliği ile gösterilmiştir.

$$u^m(k) = K_p^m e(k) + K_i^m \int e(k) \quad (4.8)$$

$u^m(k)$ geliştirilen ayarlama mekanizması ile değiştirilmiş kontrol çıkışıdır. Ziegler Nichols tasarım yöntemi yardımıyla belirlenen kontrolör katsayıları olan K_p ve K_i , istenilen sistem başarımını sağlamak amacıyla hata ve normalize edilmiş ivme bilgileri kullanılarak güncellenmiştir. Sistem yanıtının değişiminden kaynaklanan hata ve normalize edilmiş ivmenin çarpımındaki işaret değişiminden bu çarpımın üstel fonksiyonu kullanılarak büyüklük olarak faydalanılmıştır.

Geliştirilen ayarlama mekanizması ile oluşturulan kapalı çevrim sisteme dair blok diyagram Şekil 4.5'deki gibidir:



Şekil 4.5 : Hata ve normalize edilmiş ivme bilgisine dayalı PI katsayı ayarlama yöntemine ait blok diyagram.

4.3 Benzetim Çalışmaları

Önerilen yöntem birinci ve ikinci dereceden ölü zamanlı doğrusal sistemler ile ikinci dereceden ölü zamanlı doğrusal olmayan sistemler üzerinde uygulanmış ve sonuçları

incelenmiştir. Ayrıca, yüksek mertebeli sistemler için de mertebe indirgeme yöntemi kullanılarak bir benzetim çalışması gerçekleştirilmiştir.

Benzetim çalışmaları Matlab – Simulink paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Birinci mertebeli sistem benzetimleri için gerekli kontrolör parametreleri Ziegler Nichols basamak yöntemi vasıtasıyla bulunmuş, önerilen ayarlama yöntemi sonuçları ile Ziegler Nichols ayarlamalı PI kontrolünün sonuçları karşılaştırılmıştır.

İkinci mertebeli doğrusal ve doğrusal olmayan sistem modelleri için Ziegler Nichols frekans yanıtı yöntemi ile kontrolör parametreleri belirlenmiştir. Önerilen yöntem ile elde edilen sistem yanıtları, Ziegler Nichols PI ve Arttırılmış Ziegler Nichols PI kontrol yöntemlerinden alınan sistem yanıtlarıyla karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalarda sistem yanıtlarının yüzde üst aşım (% ÜA) miktarı, sistem yanıtının son değerinin %10' undan %90' ına ulaşması için geçen süre olan yükselme zamanı (t_r), sistem yanıtının kalıcı değerinin $\pm\%5$ ' ine ulaşıp, o aralıkta kalmaya başlayıncaya kadar geçen süre olan oturma zamanı (t_s) ile mutlak hatanın integrali IAE ve mutlak hatanın zaman ağırlıklı integrali ITAE değerleri gibi performans kriterleri esas alınmıştır.

Karşılaştırılan yöntemlerin referans değer değişikliği, sistem ölü zaman arttırımı ile sisteme bozucu eklenmesi karşısındaki başarımları gözlenmiştir. Önerilen yöntemin dayanıklılığını incelemek amacıyla sistem ölü zamanı %50 oranında arttırılmıştır. Ayrıca, sisteme 0.4 genliğinde çıkış bozucusu uygulanarak sistem yanıtları incelenmiştir. Karşılaştırma sonuçlarının gösterildiği grafiklerde; bu tezde yapılan çalışma için “Önerilen Yöntem”, Ziegler Nichols Ayarlamalı PI kontrol yöntemi için “ZNPI” ve Arttırılmış Ziegler Nichols Ayarlamalı PI kontrol yöntemi için “AZNPI” ifadeleri kullanılmıştır.

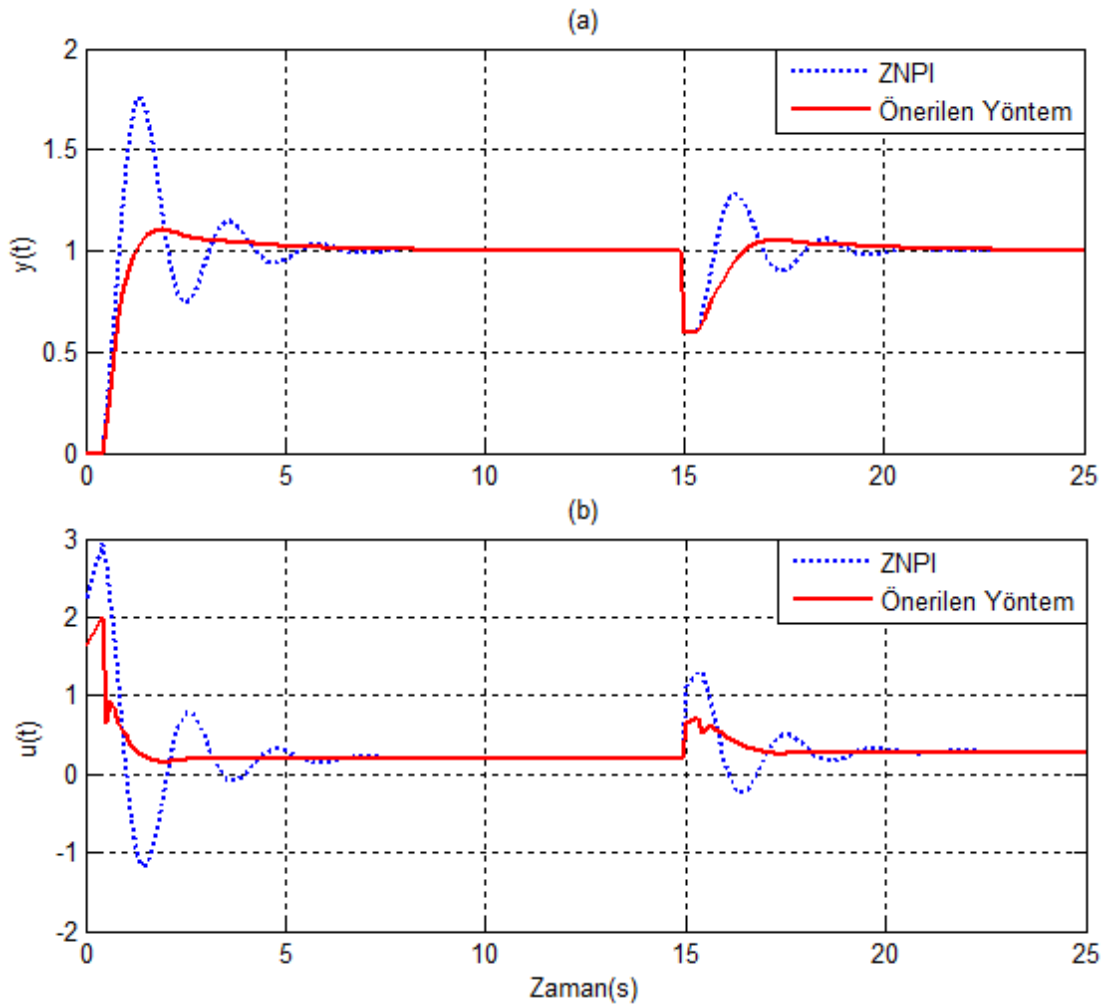
4.3.1 Birinci mertebeden ölü zamanlı sistem için benzetim çalışmaları

Birinci mertebeden sistem simülasyonları (4.9)' da verilen transfer fonksiyonuna sahip sistem üzerinden gerçekleştirilmiştir:

$$G(s) = \frac{e^{-Ls}}{s + 0.2} , \quad L = 0.4 \quad (4.9)$$

Birinci mertebeli sistem benzetim çalışmasında PI kontrolör katsayıları Ziegler Nichols basamak yanıtı ile bulunmuştur. Bu katsayılar üzerinden ayarlama yapılarak sistem yanıtları karşılaştırılmıştır. Arttırılmış Ziegler-Nichols yöntemi frekans yanıtı kullanılarak belirlenen katsayılar için geliştirildiğinden ve birinci dereceden sistemler için geçerli olmadığından bu benzetim çalışmasında AZNPI yöntemi ile karşılaştırma yapılmamıştır.

Önerilen yöntem ile ZNPI kontrolünün sistem yanıtı ve kontrol sinyalleri Şekil 4.6' da görülmektedir.

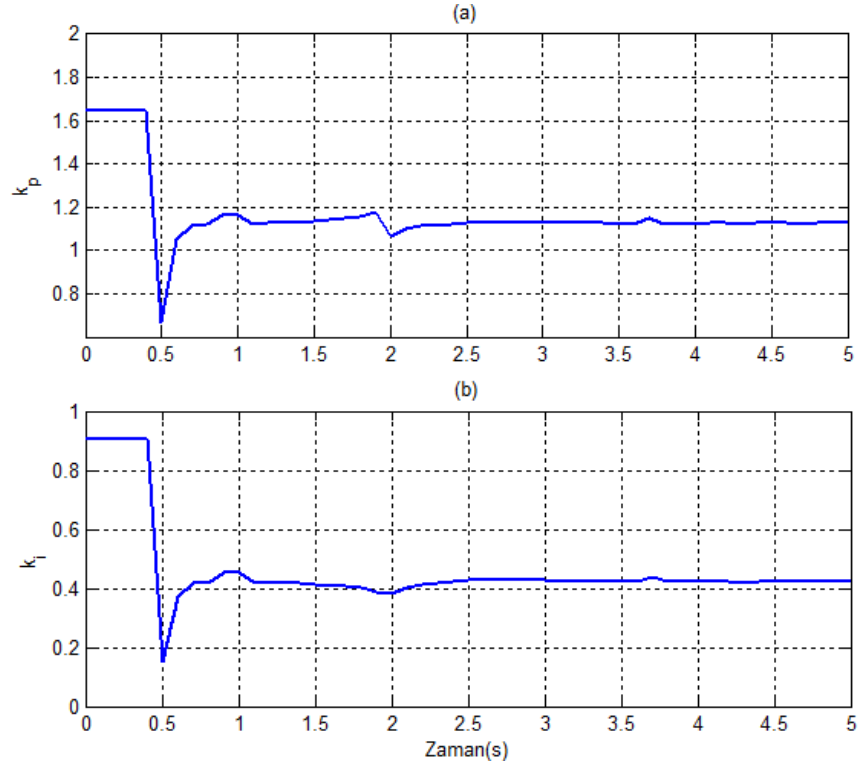


Şekil 4.6 : Birinci mertebeli ölü zamanlı sistem için; kapalı çevrim basamak yanıtı (a), kontrol işareti (b).

Grafikten de görüleceği üzere, Ziegler Nichols yöntemi ile elde edilen sistem yanıtının sahip olduğu üst aşım daha az bir kontrol işareti kullanılarak önerilen yöntem ile ortadan kaldırılmış, sistemin daha az aşımlı yanıt vermesi sağlanmıştır. İntegral katsayısının azaltılması aşım değerinde düşüş sağlamıştır. Buna karşılık

sistem yanıtının yükselme zamanı artmıştır. Sisteme bozucu eklenmesi durumunda da önerilen yöntem ile iyi bir performans elde edilmiştir.

Elde edilen sistem yanıtlarının performans karşılaştırmaları Çizelge 4.3’ te verilmiştir. Önerilen yöntem ile ayarlanan kontrolör parametreleri K_p ve K_i ’nin değişimi ise Şekil 4.7’ de görülmektedir.



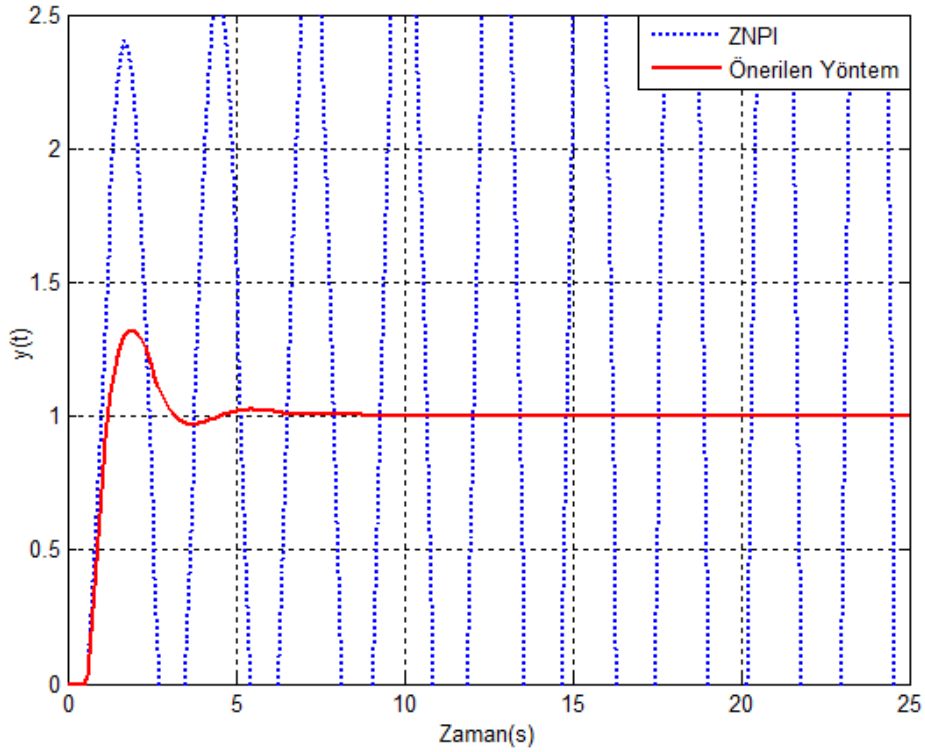
Şekil 4.7 : Ayarlanan kontrolör parametrelerinin değişimi.

Çizelge 4.3 : Birinci mertebeden sistem yanıtlarının performans analizi.

	ZNPI	Önerilen Yöntem
%ÜA	75.9	10.38
t_r [s]	0.32	0.58
t_s [s]	4.8	3.1
IAE	2.137	1.484
ITAE	11.81	9.377

Önerilen yöntemin dayanıklılığını sınamak amacıyla sistemin ölü zaman değerinin %50 arttırılması yani $L=0.4$ sn’ den $L=0.6$ sn’ ye değiştirilmesi durumunda aynı kontrolör parametreleri için sistem basamak yanıtı incelenmiştir. Şekil 4.8, ölü

zamanı arttırılmış sistem basamak yanıtlarını göstermektedir. Buna göre önerilen yöntem ile ayarlanan katsayıların Ziegler Nichols kontrolör katsayılarına göre daha iyi yanıt verdiği görülmektedir.



Şekil 4.8 : Ölü zamanı arttırılmış birinci mertebeden sistem basamak yanıtı.

4.3.2 İkinci mertebeden ölü zamanlı sistem benzetim çalışmaları

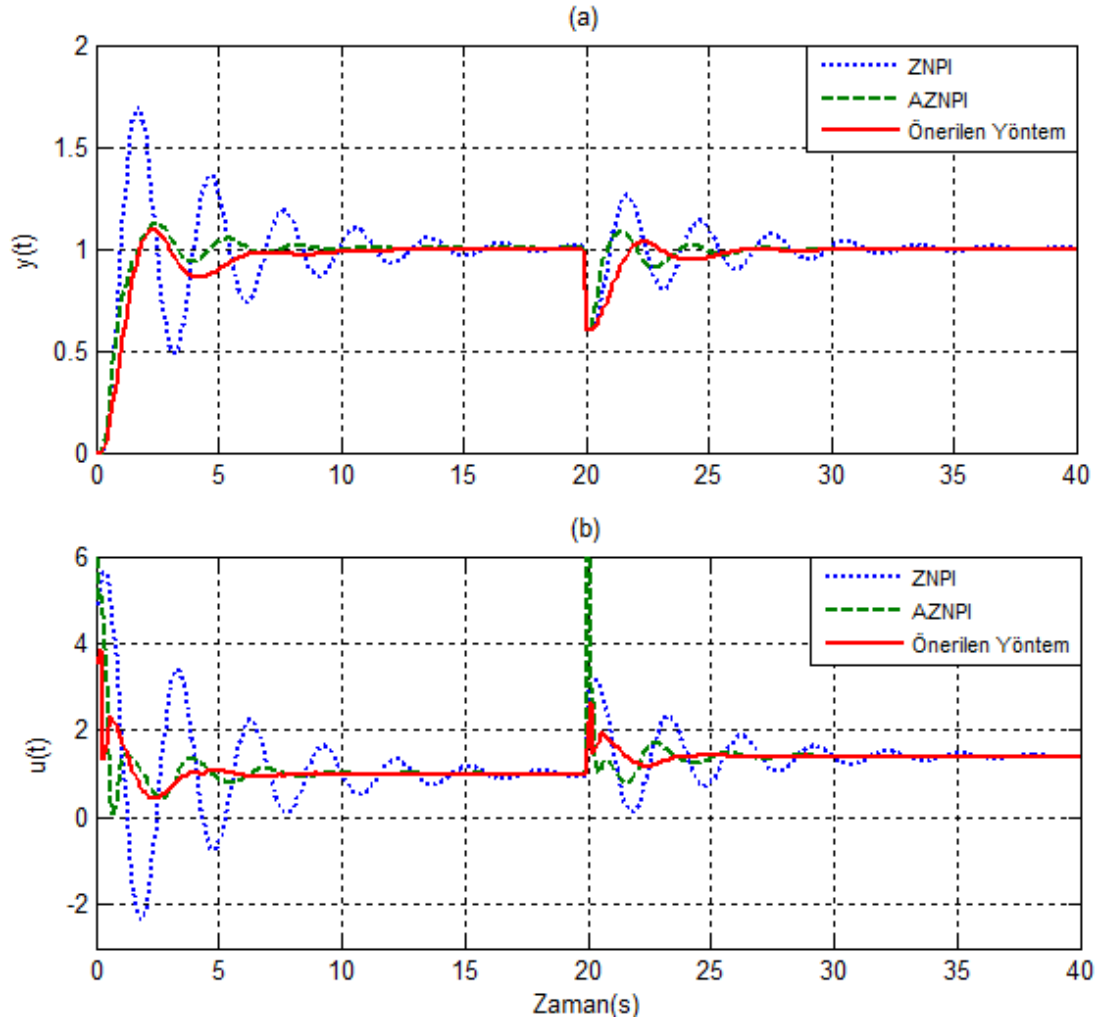
İkinci mertebeden sistem benzetim çalışmaları lineer, marjinal kararlı ve doğrusal olmayan sistemler üzerinde gerçekleştirilmiştir.

4.3.2.1 İkinci mertebeden ölü zamanlı doğrusal sistem benzetim çalışmaları

İkinci mertebeden doğrusal sistem benzetimlerinin uygulandığı sistem transfer fonksiyonu şu şekildedir:

$$G(s) = \frac{e^{-Ls}}{(1+s)^2}, \quad L = 0.2 \quad (4.10)$$

Eşitlik (4.10)' da yer alan doğrusal sistemin ZNPI, AZNPI ve yeni ayarlama yöntemi uygulanmış basamak yanıtı ve kontrol işareti Şekil 4.9' da gösterilmiştir.



Şekil 4.9 : İkinci mertebeden ölü zamanlı lineer sistemin kapalı çevrim birim basamak yanıtı (a); kontrol işareti (b).

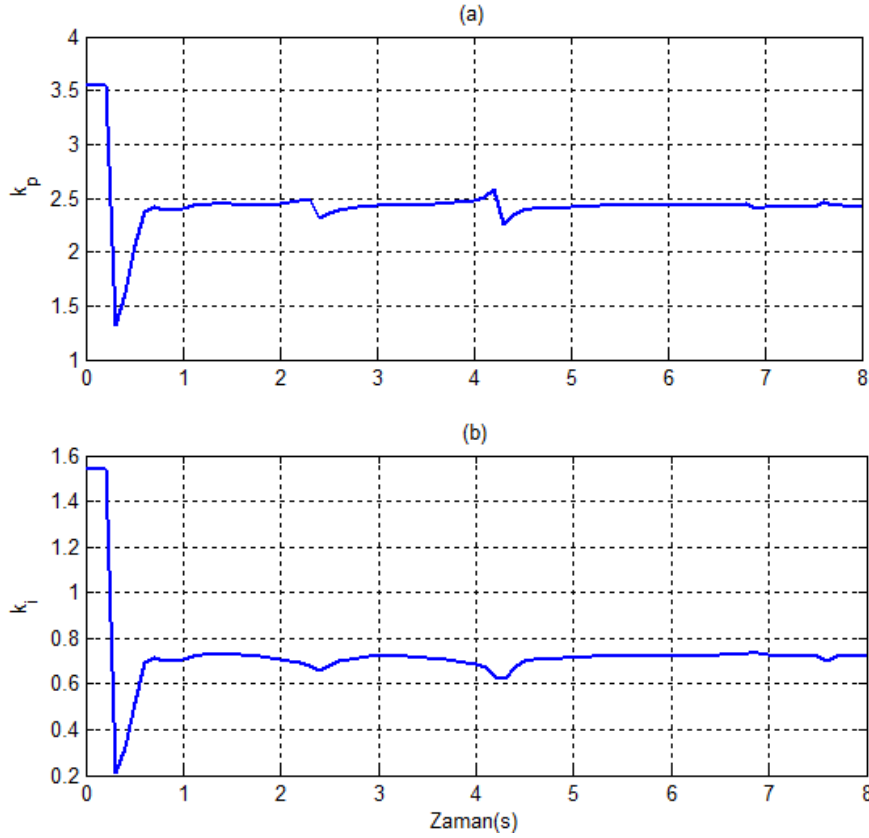
Sistem yanıtları belirli performans kriterlerine göre karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçları Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4 : İkinci mertebeden lineer sistem yanıtlarının performans analizi.

	ZNPI	AZNPI	Önerilen Yöntem
%ÜA	%69.53	%12.5	%9.5
t_r[sn]	0.53	1	1.1
t_s[sn]	13.6	4.19	5.69
IAE	4.186	1.553	2.139
ITAE	40.37	11.44	17.19

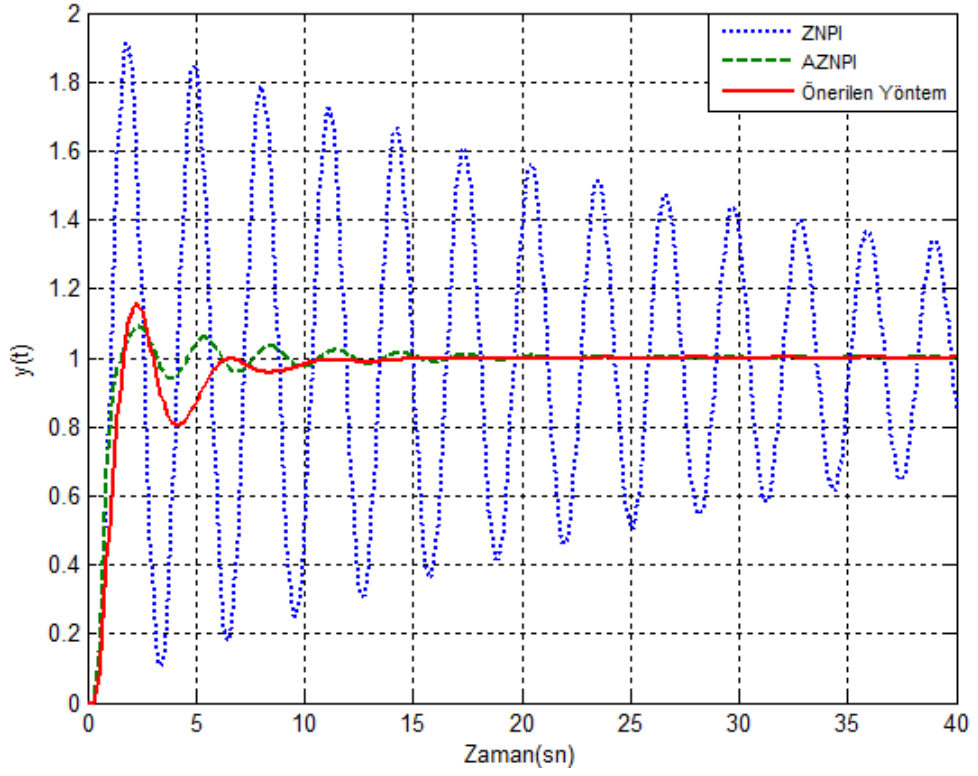
Önerilen yöntem ile sistem yanıtının üst aşım değeri ZNPI ve AZNPI yöntemlerine göre büyük oranda azaltılmıştır. Üst aşım açısından istenilen sistem başarımı sağlanmıştır. IAE ve ITAE performans kriterlerinde ise Arttırılmış Ziegler Nichols PI Kontrolörü kadar iyi sonuçlar elde edilemese de Ziegler Nichols yöntemine göre tatmin edici sonuçlar elde edilmiştir.

Önerilen yöntem vasıtası ile ayarlanan K_p ve K_i kontrolör parametrelerinin değişimi ise Şekil 4.10' da görülmektedir.



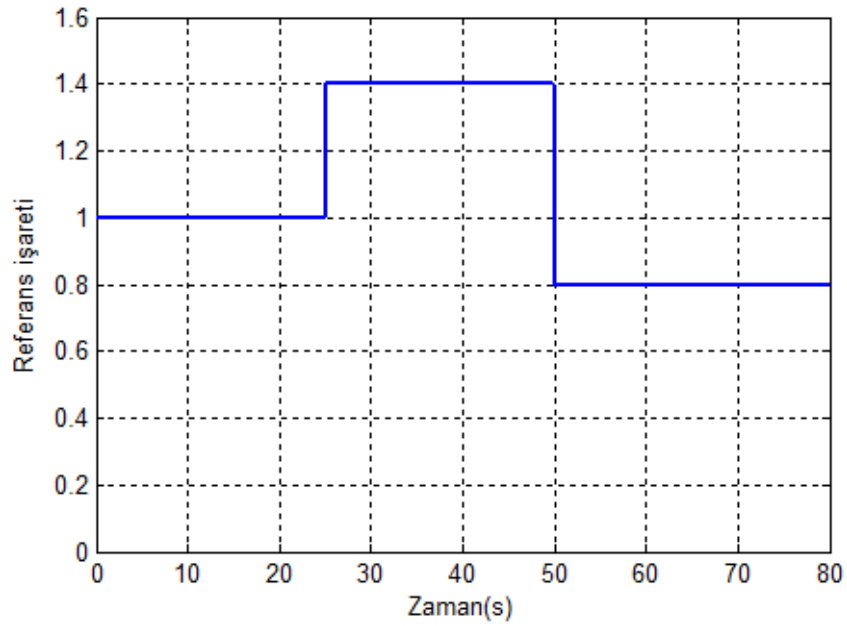
Şekil 4.10 : Ayarlanan kontrolör parametrelerinin değişimi.

Ölü zamanı arttırılmış sistem yanıtları Şekil 4.11' de gösterilmiştir. Ölü zaman değerinin %50 arttırılması ile önerilen yöntem sistem yanıtı her ne kadar Ziegler Nichols yöntemine göre daha iyi olsa da AZNPI yöntemine göre aşım değeri bir miktar artmıştır.

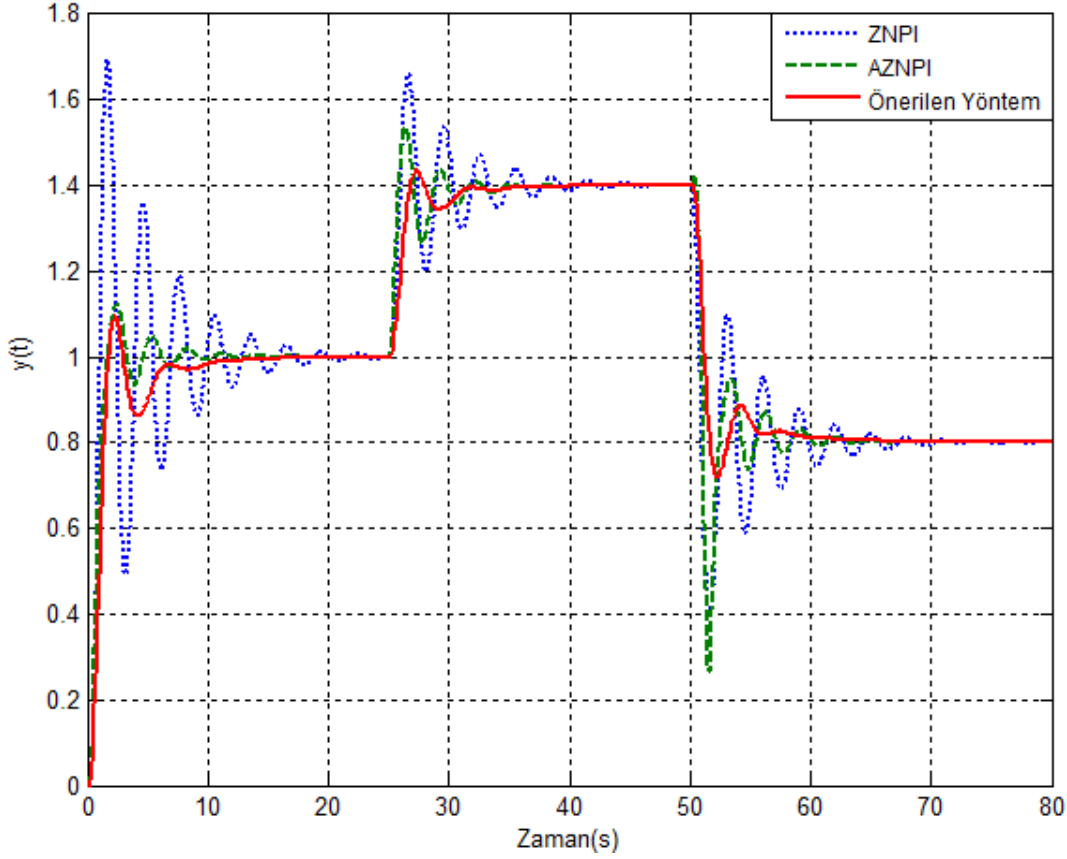


Şekil 4.11 : Ölü zamanı arttırılmış ikinci mertebeden lineer sistem basamak yanıtı.

Referans değer değişikliği durumundaki sisteme uygulanan referans işareti Şekil 4.12' de gösterilmiştir. Referans değerine karşılık elde edilen sistem yanıtları ise Şekil 4.13 ile belirtilmiştir. Önerilen yöntemin referans değer değişikliğine göre de başarılı bir sonuç verdiği gözlenmiştir.



Şekil 4.12 : ikinci mertebeden doğrusal sisteme uygulanan referans işareti.



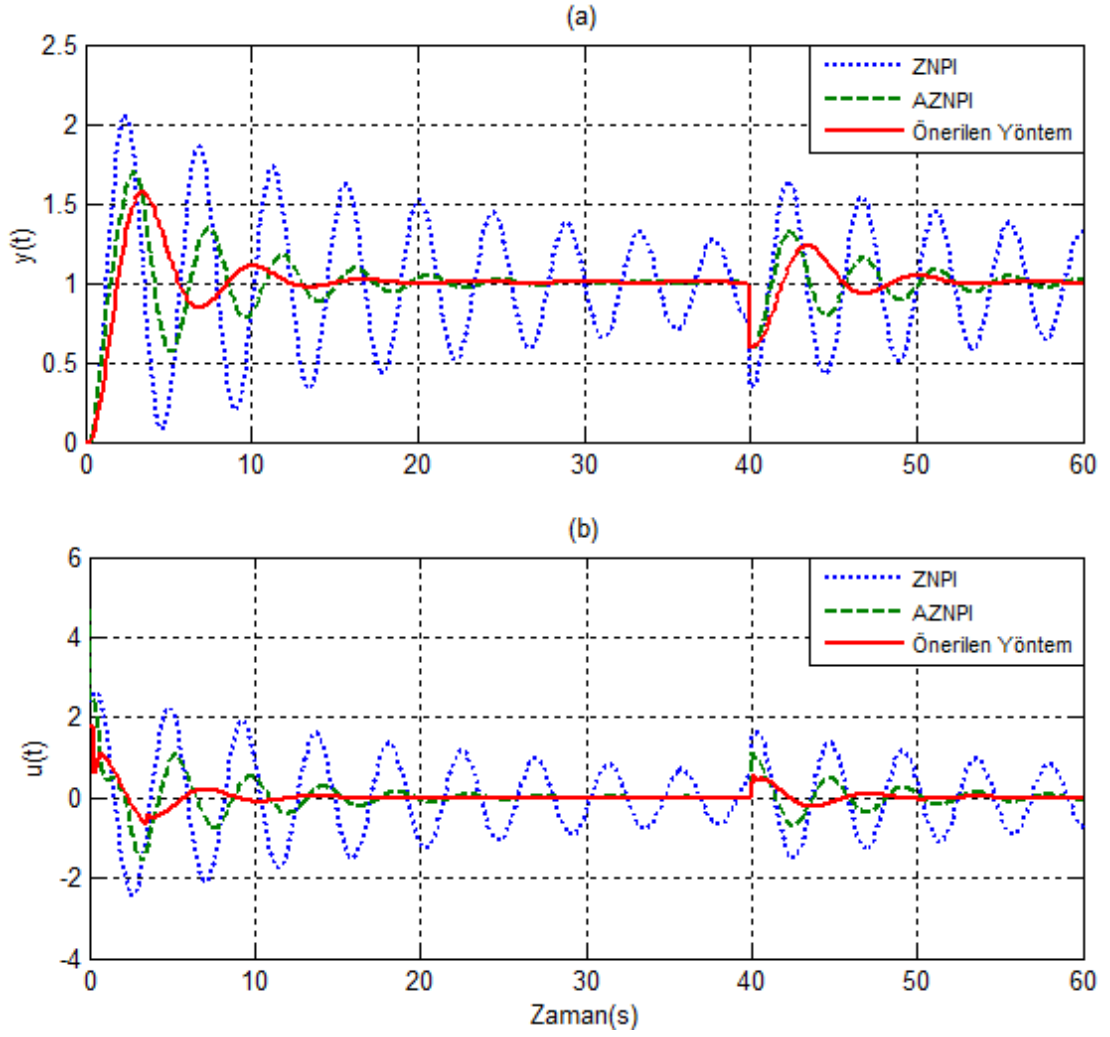
Şekil 4.13 : Referans değişikliği durumunda ikinci mertebeden doğrusal sistem yanıtları.

4.3.2.2 İkinci mertebeden ölü zamanlı marjinal kararlı sistem benzetim çalışmaları

İkinci mertebeden marjinal kararlı sistem benzetimlerinin uygulandığı sistem transfer fonksiyonu şu şekildedir:

$$G(s) = \frac{e^{-Ls}}{s(1+s)} \quad , \quad L = 0.2 \quad (4.11)$$

Eşitlik (4.11)' de yer alan sistemin basamak yanıtı ve kontrol işareti Şekil 4.14 ile gösterilmiştir. Marjinal kararlı sistem karşılaştırmalarında önerilen yöntem ile diğer iki yönteme göre genel olarak daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Üst aşım değeri Ziegler Nichols kontrolüne göre neredeyse % 50 oranında azalmıştır. Oturma zamanı ise diğer iki yönteme göre oldukça düşük değerde elde edilmiştir. Önerilen yöntemde sisteme bozucu uygulanmasına karşılık elde edilen sistem yanıtının daha az aşımlı ve daha az salınımlı olduğu görülmüştür.

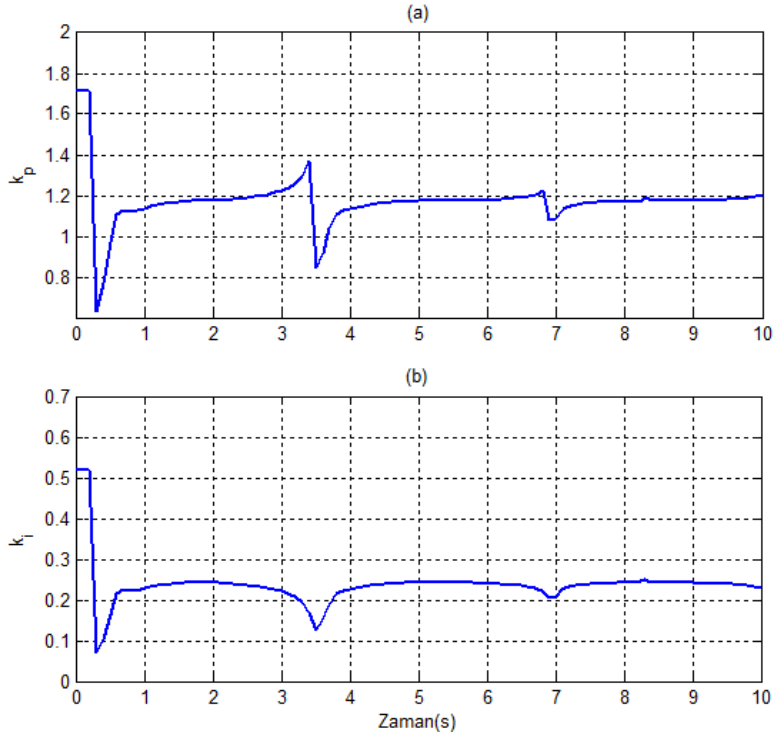


Şekil 4.14 : İkinci mertebeden ölü zamanlı marjinal kararlı sistem basamak yanıtı(a) ve kontrol işaretini(b).

Elde edilen sistem yanıtlarının performans karşılaştırmaları Çizelge 4.5' te, ayarlanan kontrolör kazançlarının değişimi ise Şekil 4.15 ile gösterilmiştir.

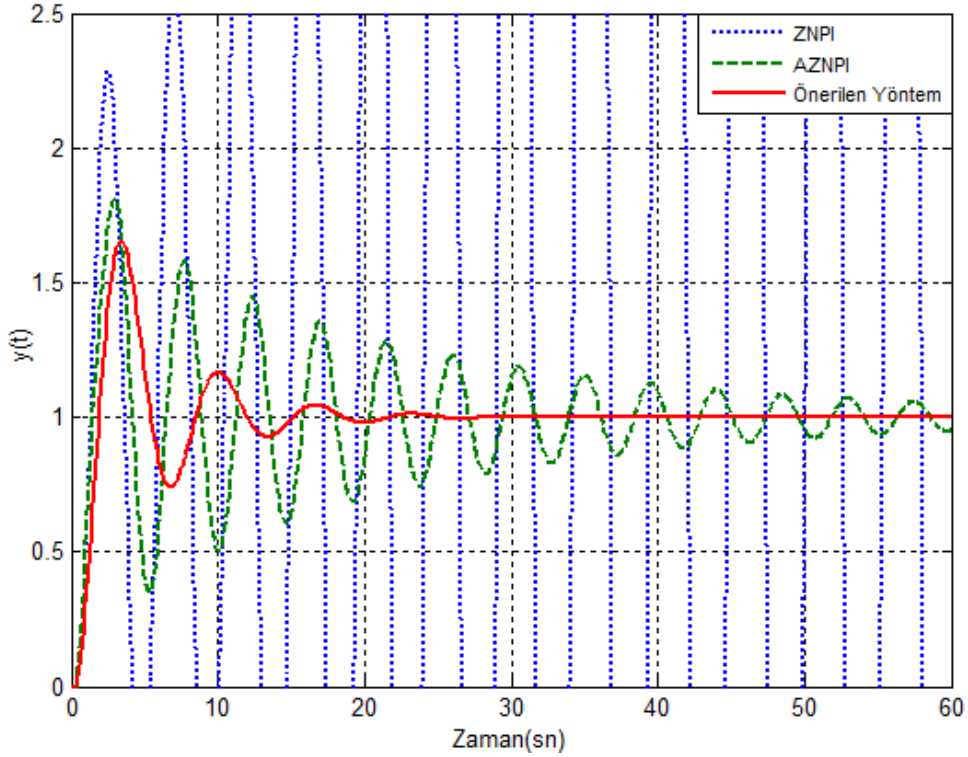
Çizelge 4.5 : İkinci mertebeden marjinal kararlı sistem yanıtlarının performans analizi.

	ZNPI	AZNPI	Önerilen Yöntem
%ÜA	105.75	69.85	57.39
t_r[sn]	0.75	0.9	1.2
t_s[sn]	49.8	18.8	11.4
IAE	20.93	6.108	4.464
ITAE	523.96	108.7	68.56



Şekil 4.15 : Kontrolör parametrelerinin değişimi.

Ölü zaman değerinin %50 arttırılması ile ZNPI kontrolörünün sistem yanıtı kararsızlık sınırındadır (Şekil 4.16). AZNPI yöntemi ile ise oldukça salınımlı bir sistem yanıtı elde edilmiştir.



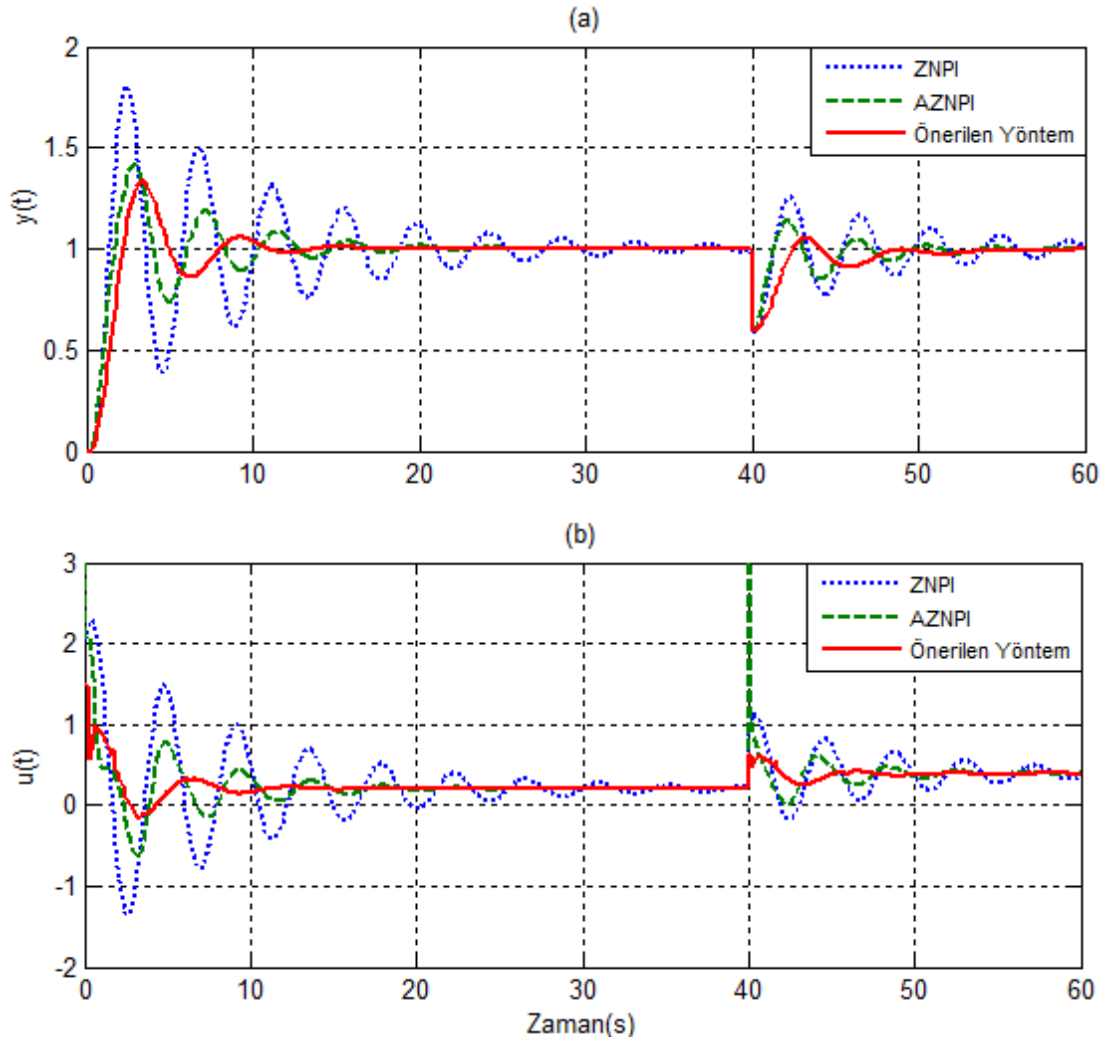
Şekil 4.16 : Ölü zamanı arttırılmış ikinci mertebeden marjinal sistem basamak yanıtı.

4.3.2.3 İkinci mertebeden ölü zamanlı doğrusal olmayan sistem benzetim çalışmaları

Ayarlama mekanizmasının başarımı doğrusal olmayan sistemler üzerinde de incelenmiştir. Doğrusal olmayan sistem transfer fonksiyonu:

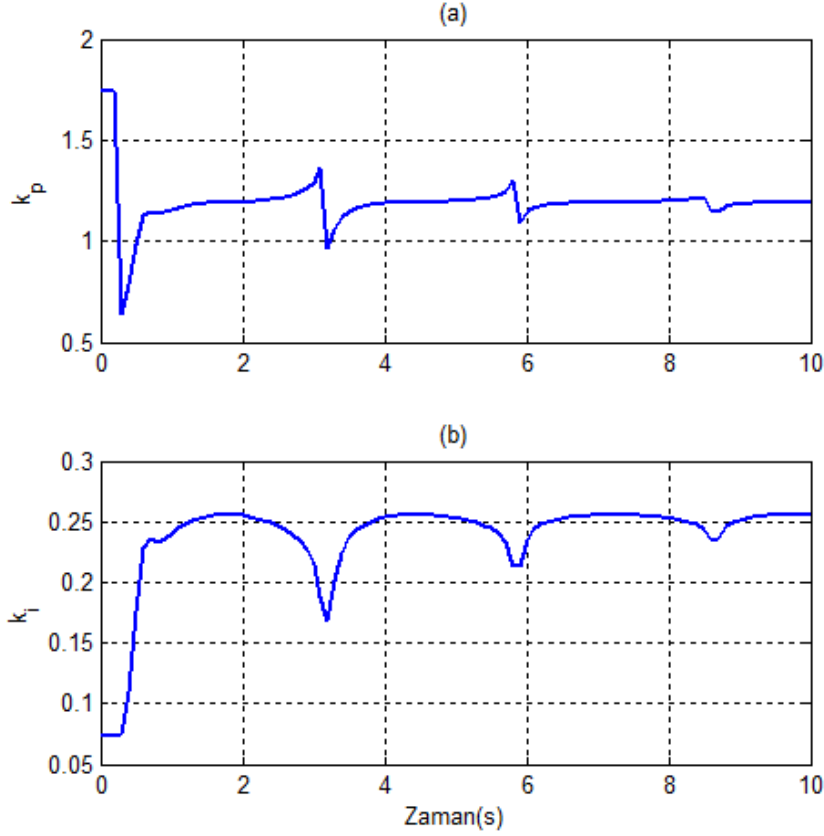
$$\frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{dy}{dt} + 0.2y^2 = u(t - L) \quad , \quad L = 0.2 \quad (4.12)$$

Şekil 4.17' de benzetim çalışması sonucunda elde edilen sistem yanıtı ve kontrol işareti; Şekil 4.18' de de kontrolör parametrelerinin değişimi verilmiştir.



Şekil 4.17 : İkinci mertebeden doğrusal olmayan sistem basamak yanıtı (a) ve kontrol işareti (b).

Çizelge 4.6' da ise doğrusal olmayan sistem benzetim yanıtlarının performans karşılaştırmaları görülmektedir.

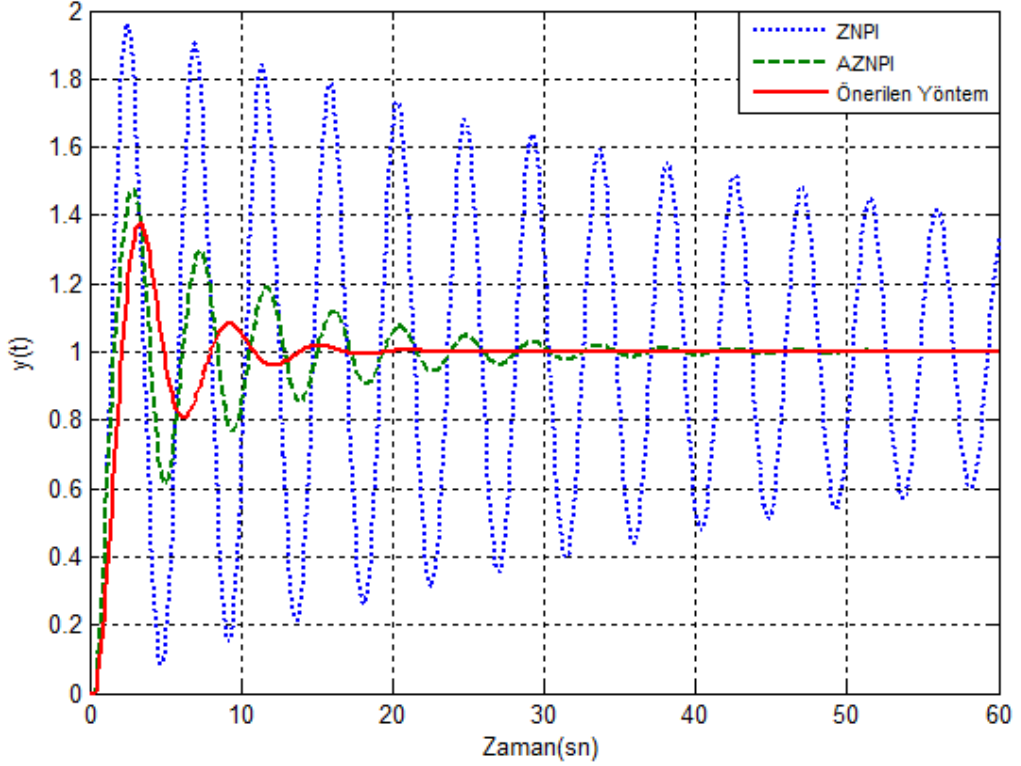


Şekil 4.18 : Ayarlanan kontrolör parametrelerinin değişimi.

Çizelge 4.6 : İkinci mertebeden nonlinear sistem yanıtlarının performans analizi.

	ZNPI	AZNPI	Önerilen Yöntem
%ÜA	80.65	41.6	33.25
t_r[sn]	0.76	1.01	1.38
t_s[sn]	26.79	12.15	9.63
IAE	7.974	3.624	3.386
ITAE	138	52.37	51.26

Ziegler Nichols yöntemi doğrusal olmayan sisteme uygulandığında dayanıklılığı diğer yöntemlere göre oldukça düşük kalmaktadır. Ziegler Nichols kontrolü ile sistem yanıtının referans değerine oturması oldukça uzun sürmektedir. Yapılan karşılaştırmada; önerilen yöntemin ZNPI ve AZNPI yöntemlerine karşılık çok daha az üst aşım ile daha kısa sürede referans değerine oturduğu gözlenmiştir. Çizelge 4.6'dan görüleceği üzere IAE ve ITAE hata ölçütlerinde de diğer yöntemlere göre daha iyi bir başarımla elde edilmiştir.



Şekil 4.19 : Ölü zamanı arttırılmış ikinci mertebeden doğrusal olmayan sistem basamak yanıtı.

4.3.3 Birinci mertebeye indirgenmiş sistem benzetim çalışmaları

İkinci mertebeden daha yüksek mertebeli sistemler için Sigurd Skogestad [15] tarafından önerilmiş olan mertebe indirgeme yöntemi kullanılarak örnek bir benzetim çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem ile yüksek mertebeli bir sistem birinci mertebeden ölü zamanlı sistem parametreleri ile ifade edilebilmektedir. Bu sayede sisteme uygulanacak Ziegler Nichols PI kontrolör katsayıları kolaylıkla bulunabilmektedir. Bu yöntem ile yüksek mertebeli sistemin transfer fonksiyonu (4.12) ile ifade edilebilir:

$$G(s) = \frac{\prod_j (-T_{j0}^{inv} s + 1)}{\prod_i (\tau_{j0}^{inv} s + 1)} e^{-\theta_0 s} \quad (4.12)$$

Paydadaki τ_{i0} değerleri büyüklüklerine göre sıralanır ve [15] ile belirtilen kurallara göre sistemin birinci mertebeli modeli:

$$G(s) = \frac{e^{-\theta s}}{\tau_1 s + 1} \quad (4.13)$$

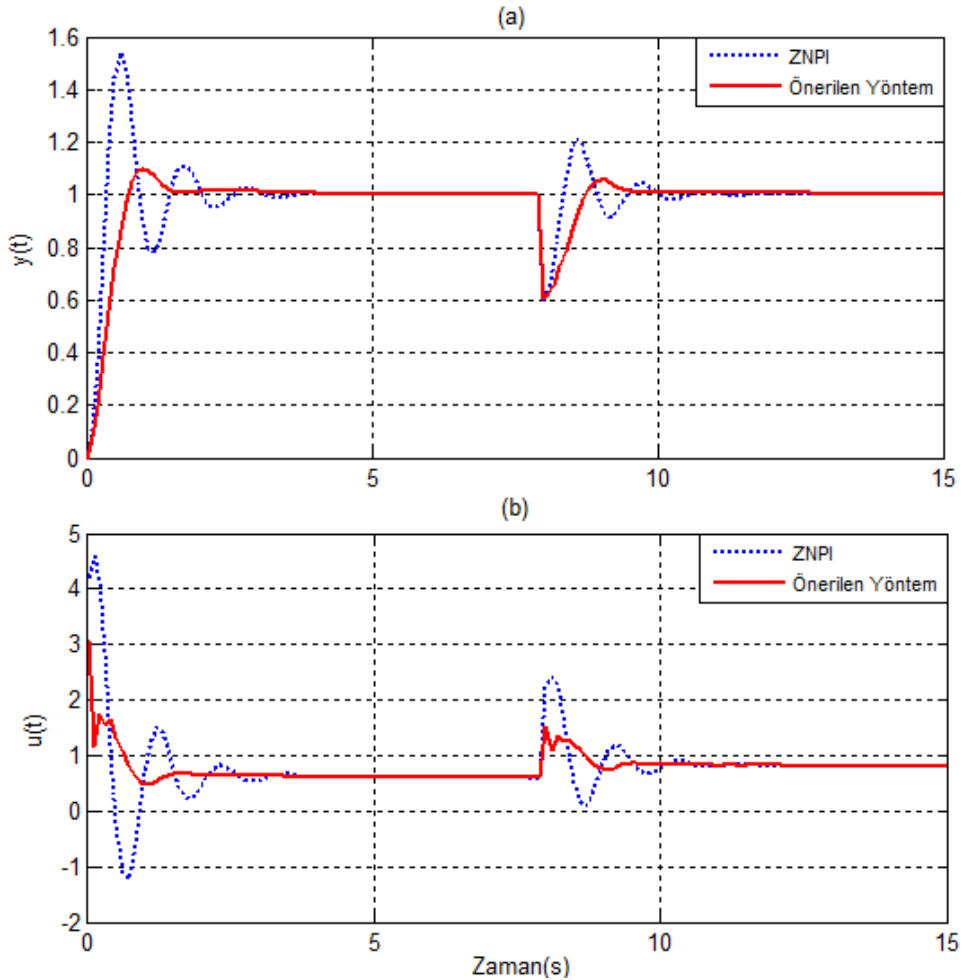
şeklinde elde edilir. Benzetim çalışmasında kullanılacak indirgeme yöntemi uygulanan yüksek mertebeli sistem (4.14) ile belirtilmiştir:

$$G(s) = \frac{2(15s + 1)}{(20s + 1)(s + 1)(0.1s + 1)^2} \quad (4.14)$$

Mertebe indirgemesi uygulandığında birinci mertebeli sistem transfer fonksiyonu (4.15)' teki gibi olmaktadır:

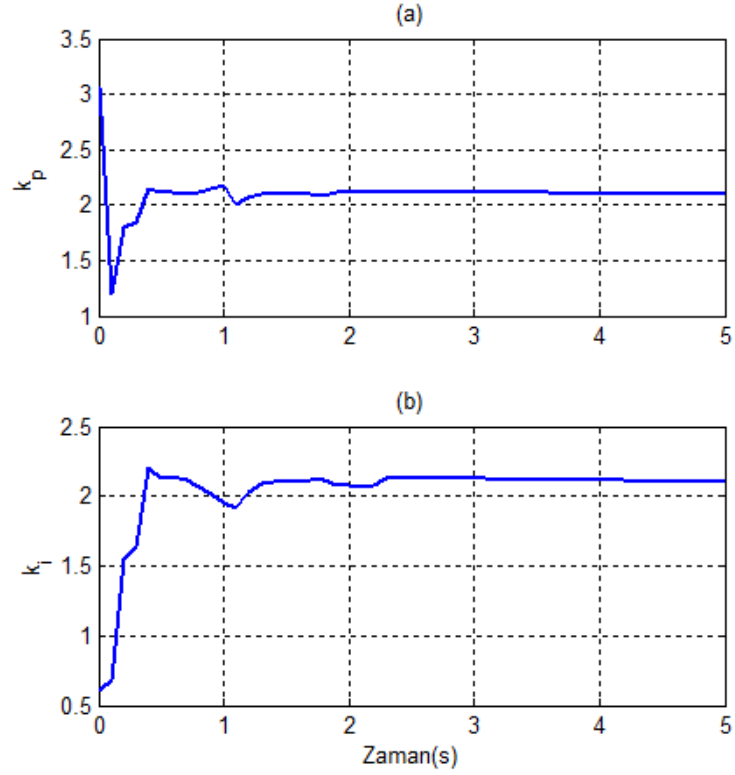
$$G(s) = \frac{1.5}{1.05s + 1} e^{-0.15} \quad (4.15)$$

Bu durumda indirgenmiş sistem için Ziegler Nichols PI kontrolör katsayıları basamak yanıtı yöntemi ile bulunarak sistem çıkışları gözlenmiştir. Önerilen yöntem ile Ziegler Nichols sistem yanıtları ve kontrol çıkışları Şekil 4.20' da görüldüğü gibidir.



Şekil 4.20 : İndirgenmiş mertebeli sistem yanıtı ve kontrol işareti.

Önerilen yöntem ile ayarlanmış kontrolör kazanç katsayılarının değişimi ise Şekil 4.21 ile verilmiştir.



Şekil 4.21 : Ayarlanan kontrolör parametrelerinin değişimi.

Çizelge 4.7’ de ZNPI ile önerilen yöntemin performans karşılaştırması yapılmıştır.

Çizelge 4.7 : Birinci mertebeye indirgenmiş yüksek mertebeli sistem yanıtlarının performans analizi.

	ZNPI	Önerilen Yöntem
%ÜA	54.09	9.86
t_r[sn]	0.23	0.51
t_s[sn]	1.92	1.27
IAE	0.8	0.69
ITAE	2.42	2.32

Mertebe indirgeme benzetim çalışması ile önerilen yöntemin yüksek mertebeli sistemler için de iyi sonuçlar verebileceği gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde önerilen yöntem ile daha düşük bir kontrol işareti gereksinimi ile daha aşısız ve daha kısa oturma zamanına sahip bir sistem yanıtı elde edildiği sonucuna

varılmıştır. Bir sonraki bölümde kontrol edilmiş ancak çok sönümlü sistem yanıtına sahip sistemin kontrolör parametrelerinin iyileştirilmesine yönelik bir yaklaşımda bulunulacak ve bu kapsamda yapılan benzetim çalışmalarına yer verilecektir.

5. ÇOK SÖNÜMLÜ SİSTEM YANITI VEREN PI KONTROLÖRLER İÇİN HATA VE NORMALİZE EDİLMİŞ İVME BİLGİSİNE DAYALI KATSAYI AYARLAMA MEKANİZMASI

Ziegler Nichols ayarlama metodu ile her ne kadar birinci mertebeden sistemler için kabul edilebilir yanıtlar elde edilse de ölü zamanlı ve yüksek mertebeli sistemler için aşım ve salınımlı sistem yanıtları ile karşılaşmakta, referans değer değişikliği ve sisteme bozucu eklenmesi durumlarında yeterli dayanıklılık sağlanamamaktadır. Bu sebeple Ziegler Nichols sistem yanıtlarını iyileştirmek adına 4. bölümde anlatılmış olan katsayı ayarlama yöntemi geliştirilmiştir.

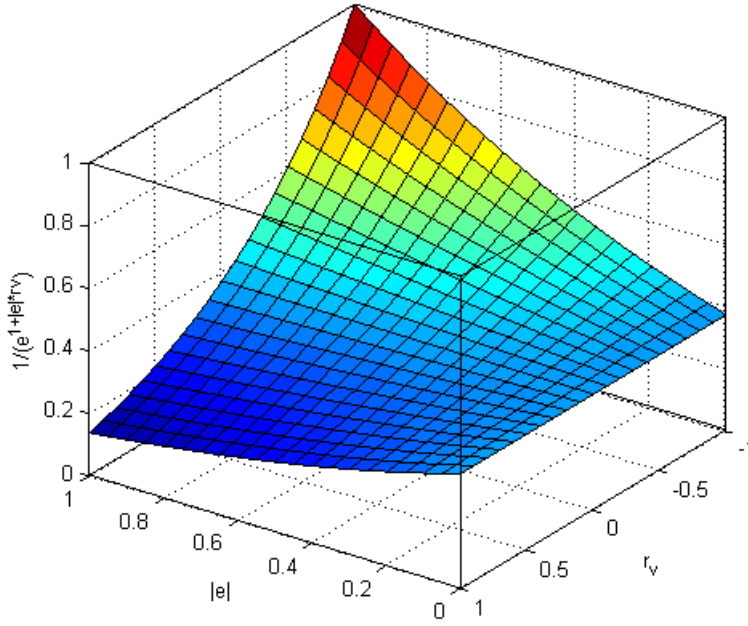
Bu bölümde ise Ziegler Nichols yönteminden farklı olarak deneme yanılma yoluyla kontrolör parametreleri belirlenen ve yavaş bir kontrol edilmiş sistem yanıtına sahip olan sistemler için kontrolör kazanç katsayılarının ayarlanmasına dair bir yaklaşımda bulunulacaktır. Aşimsız ve yavaş sistem yanıtları veren kontrolör parametrelerini iyileştirmek amacıyla sistem hatası ve sistem yanıtının hızlanma bilgisi kullanılarak bir ayarlama mekanizması geliştirilmiş ve klasik PI kontrolörünün katsayıları bu mekanizma yardımıyla güncellenmiştir. Temel olarak ayarlama stratejisi 4.bölümde anlatıldığı gibidir. Ancak, bu bölümde sistem yanıtının çok sönümlü olması sebebiyle kontrol çıkışının etki oranının değiştirilmesi amaçlanmış, katsayıları ayarlama kullanılan fonksiyonların tanım aralıkları arttırılmıştır.

PI kontrolör katsayılarından oransal kazanç değeri K_p (5.1) eşitliği yardımıyla güncellenir. Sistem yanıtının referans değerine yaklaşıyor olması ve uzaklaşıyor olması durumlarının her ikisi için de oran katsayısının güncellenmesi için aynı ifade kullanılır.

$$K_p^m = K_p \left[\frac{1}{e^{(1+|e|/r_v)}} \right] \quad (5.1)$$

Güncelleme amacıyla kullanılan fonksiyonun sistem hatası ve normalize ivmeye bağlı değişimi Şekil 5.1 ile gösterilmiştir. Bu fonksiyonun uygulanması ile hatanın büyük olduğu durumda sistem yanıtı yavaş iken oransal kazanç çarpanı değeri daha

büyük bir katsayı ile çarpılır. Sistem yanıtı hızlandıkça katsayı değeri azaltılır ve sistem yanıtında oluşabilecek aşımın önüne geçilmesi amaçlanır.



Şekil 5.1 : Çok sönümlü sistem yanıtlarında oransal kazanç ayarlamasında kullanılan fonksiyonun değişimi.

Kontrolör bileşenlerinden integral katsayısının güncellenmesi iki durum için gerçekleştirilir. Sistem yanıtının referans değerine yaklaşıyor olması durumu için integral katsayısının ayarlanmasında (5.2) ifadesi kullanılır.

Şekil 5.2 referansa yaklaşma durumunda kullanılan fonksiyonun değişimini göstermektedir. Sistem yanıtı referans değerinden çok uzak ve sistem yanıtı çok yavaş ise integral katsayısının değeri artırılır. Sistem yanıtı hızlandıkça hata değeri büyük de olsa kontrol işaretinde oluşabilecek birikmeyi önlemek için integral parametresinin değeri azaltılır.

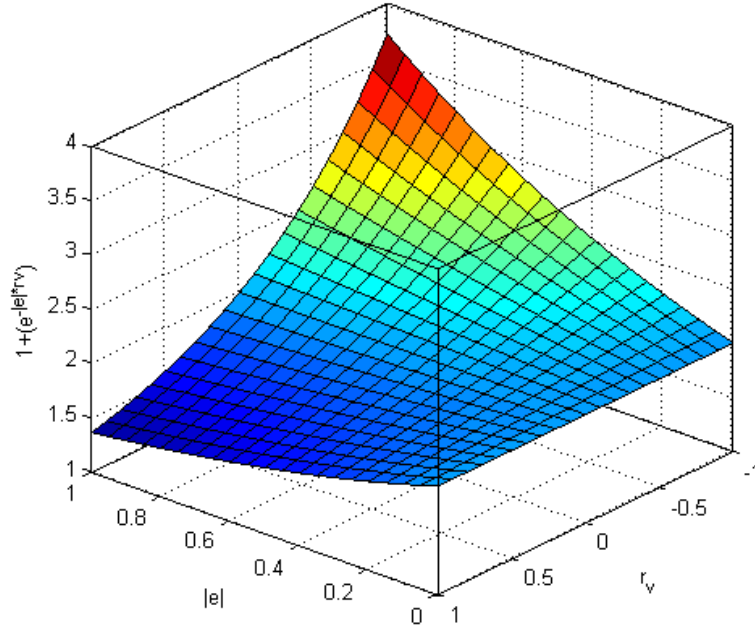
$$K_i^m = K_i \left[\left(1 + e^{-(|e|r_v)} \right) \right] \quad (5.2)$$

Sistem yanıtı referans değerinden uzaklaşıyor iken ise integral kazancı;

$$K_i^m = K_i \left[\left(1 + e^{(|e|r_v)} \right) \right] \quad (5.3)$$

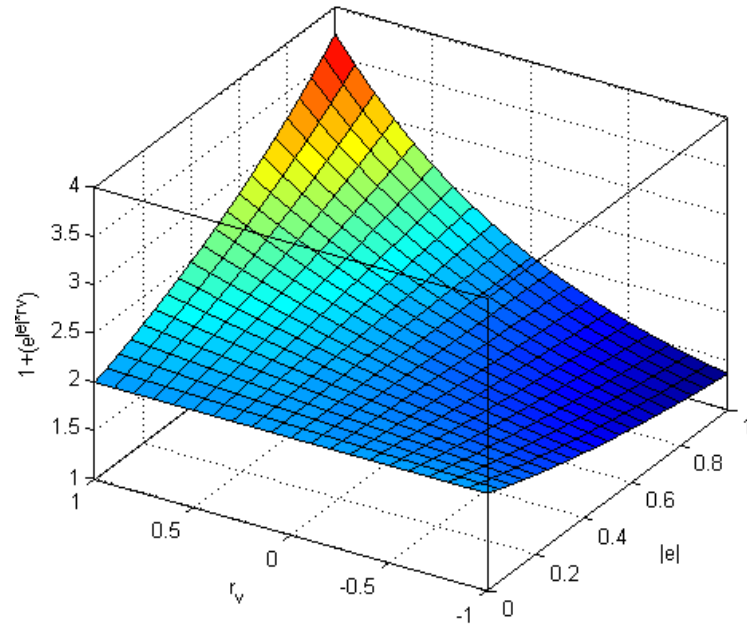
ifadesi yardımıyla güncellenir. Sistem yanıtı referans değerinden uzaklaşıyor iken yani sistem yanıtının alt aşım ya da üst aşım yapması hali için hata değeri büyüdükçe integral katsayısı azaltılır. Sistem yanıtı çok hızlı iken sistem yanıtını istenilen

noktaya geri getirebilmek amacıyla daha büyük bir çarpan kullanılarak integral katsayısı artırılır.



Şekil 5.2 : Çok sönümlü sistem yanıtlarında referansa yaklaşma durumu için integral kazanç ayarlamasında kullanılan fonksiyonun değişimi.

Sistem yanıtının referanstan uzaklaştığı durumda integral katsayısının güncellenmesinde kullanılan fonksiyonun değişimi Şekil 5.3' te verilmiştir.



Şekil 5.3 : Çok sönümlü sistem yanıtlarında referanstan uzaklaşma durumu için integral kazanç ayarlamasında kullanılan fonksiyonun değişimi.

5.1 Çok Sönümlü Sistem Yanıtları İçin Benzetim Çalışmaları

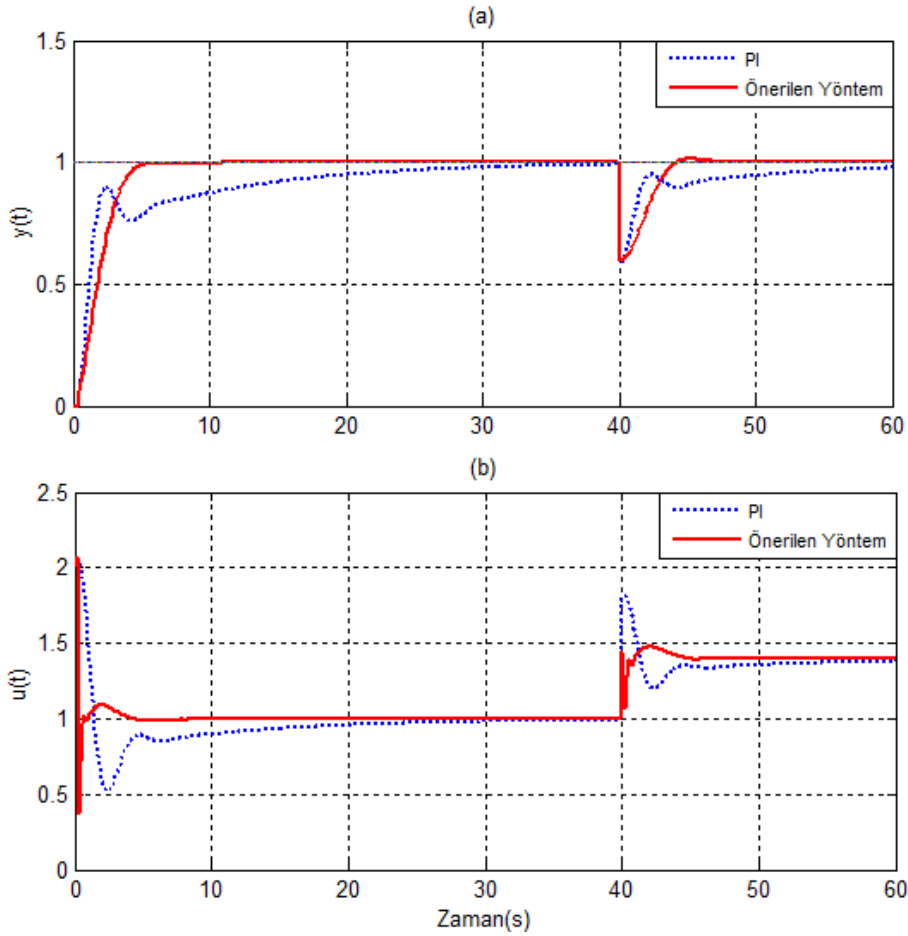
Önerilen ayarlama mekanizmasının başarımını gözlemlemek amacıyla benzetim çalışması ikinci mertebeden ölü zamanlı iki farklı sistem üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Benzetim 1:

Birinci benzetim çalışmasının gerçekleştirildiği sisteme ait transfer fonksiyonu:

$$G(s) = \frac{e^{-Ls}}{(1+s)^2}, \quad L = 0.2 \quad (5.5)$$

şeklinde. Sistemin, çok sönümlü bir basamak yanıtı elde edilecek şekilde kontrol edildiği varsayılmıştır. Klasik PI kontrolörünün $K_p=2$ ve $K_i=0.25$ olarak belirlenmesi durumunda sistemin basamak yanıtının referans değerinin altında salındığı görülmüştür. Önerilen parametre ayarlama mekanizmasının sisteme uygulanması ile elde edilen sistem basamak yanıtı ve kontrol işareti Şekil 5.4' teki gibidir.



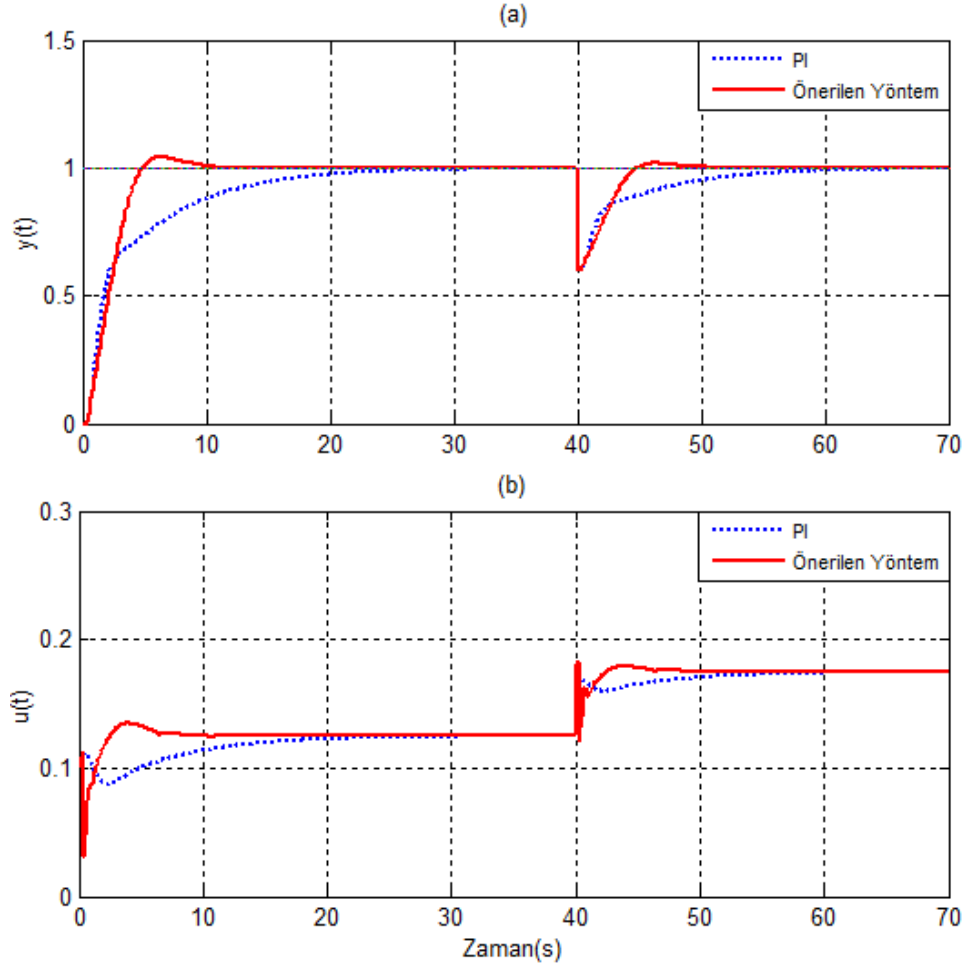
Şekil 5.4 : Birinci benzetim çalışması için sistem basamak yanıtı(a) ve kontrol işareti(b).

Benzetim 2:

İkinci benzetim çalışmasının gerçekleştirildiği sisteme ait transfer fonksiyonu aşağıdaki gibidir:

$$G(s) = \frac{16}{s^2 + 3s + 2} e^{-Ls} \quad , \quad L = 0.25 \quad (5.6)$$

Klasik PI kontrolör katsayılarının $K_p=0.1$ ve $K_i=0.03$ olarak belirlenmesi durumunda çok sönümlü ve yavaş bir sistem yanıtı elde edilmektedir. Sistem yanıtını iyileştirmek amacıyla, önerilen parametre ayarlama mekanizmasının sisteme uygulanması sonucu elde edilen sistem basamak yanıtı ve kontrol işareti Şekil 5.5'teki gibidir.



Şekil 5.5 : İkinci benzetim çalışması için sistem basamak yanıtı(a) ve kontrol işareti(b).

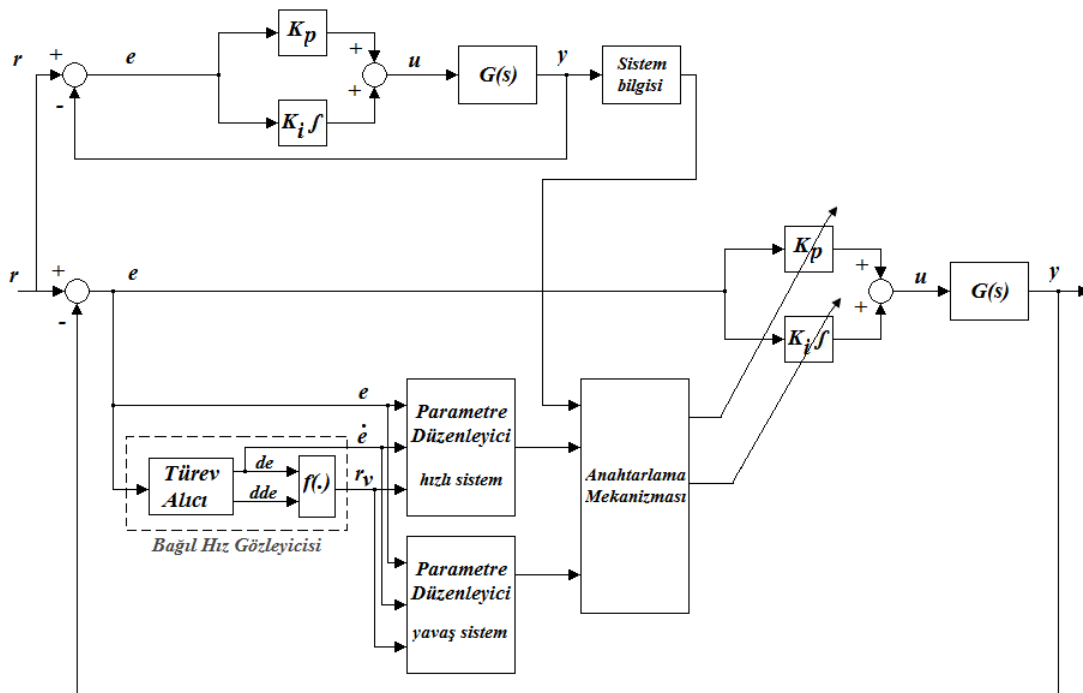
Gerçekleştirilen iki benzetim çalışmasında önerilen yöntemin başarımı incelenmiştir. Her iki çalışmada da önerilen yöntem ile kontrolör parametreleri çevrim içi olarak

güncellenerek sistem yanıtının referans değerine daha hızlı ulaşması sağlanmıştır ve bu sayede daha kısa bir oturma süresi elde edilmiştir. Bundan sonraki kısımda az sönümlü ve çok sönümlü sistem yanıtları sağlayan kontrol sistemlerinin bir arada iyileştirilmesine yönelik bir yapının oluşturulması üzerinde durulmuştur.

5.2 Az Sönümlü ve Çok Sönümlü Sistem Yanıtları Sağlayan Kontrolör

Parametrelerinin İyileştirilmesi İçin Bir Anahtarlama Mekanizmasının Oluşturulması

Şu ana dek yapılan çalışmalarda kontrolör katsayılarının iyileştirilmesi adına iki farklı sistem yanıtı ele alınmıştır. Farklı yöntemlerle belirlenen kontrolör parametreleri ile kontrol edilmiş sistem yanıtları az sönümlü ve çok sönümlü olabilmektedir. Bu çalışma süresince bu iki sistem yanıtı ele alınarak kontrolör parametrelerinin dolayısıyla sistem yanıtlarının iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla klasik PI kontrolör katsayıları için birtakım ifadeler geliştirilmiştir. Bu bölümde ise az sönümlü ve çok sönümlü sistem yanıtına sahip kontrol sistemlerinin bir arada iyileştirilmesi için ortak bir mekanizma önerilmektedir. Şekil 5.6' da bu amaçla oluşturulmuş bir yapı görülmektedir.



Şekil 5.6 : Az sönümlü ve çok sönümlü sistem yanıtı sağlayan kontrol sistemlerinin bir arada iyileştirilmesine yönelik anahtarlama mekanizması.

Bu yapıda, öncelikle parametreleri ayarlanmamış bir klasik PI kontrol sistemi bulunmaktadır. Bu sistemin çalıştırılması ile sistem yanıtının bilgisi alınır ve kontrolör parametrelerinin az sönümlü ya da çok sönümlü sistem yanıtı sağladığı belirlenmiş olur. Klasik PI kontrolöründen alınan bu sistem bilgisi anahtarlama mekanizmasının girişlerinden birini oluşturur. Anahtarlama mekanizmasının diğer iki girişi iki farklı sistem yanıtı için geliştirilmiş olan parametre iyileştirme ifadelerini içerir. Sistem bilgisinin elde edilmesi ile hangi ifadelerin kullanılacağı anahtarlama mekanizmasında belirlenir. Bu sayede tek bir kontrol yapısı ile az sönümlü ve çok sönümlü sistem yanıtlarının iyileştirilmesi sağlanabilir. Ancak, bu şekilde bir yapının bilgisayar ortamında gerçekleştirilerek benzetiminin yapılması mümkün değildir. Gerçek zaman uygulaması olarak her iki sistem tipi için bu şekilde oluşturulacak tek bir yapı ile kontrolör katsayılarının ayarlanması gerçekleştirilebilir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada klasik PI kontrolörünün parametrelerini iyileştirmeye yönelik bir ayarlama mekanizması tasarlanmıştır. Tasarlanan bu mekanizma sistem hatası ve sistem yanıtının hızlanma bilgisinden elde edilen normalize edilmiş ivme değişkenini kullanarak kontrolör katsayılarını ayarlamayı amaçlar. Ayarlama mekanizmasının tasarlanmasında kontrol edilmiş sisteme ait iki farklı sistem yanıtı gözönüne alınmıştır. İlk olarak kontrolör parametrelerinin Ziegler Nichols yöntemleri ile belirlendiği az sönümlü sistem yanıtı elde edilen durum incelenmiştir. İkinci olarak ise kontrolör parametreleri deneme yanılma yoluyla belirlenmiş ve çok sönümlü sistem yanıtı elde edilmiştir. Her iki durum için de belirlenen kontrolör parametrelerinin sisteme uygulanması ile elde edilen az sönümlü ve çok sönümlü sistem yanıtlarının iyileştirilmesinde kontrol işaretinin değiştirilmesine yönelik ifadeler oluşturulmuştur. Hatanın değişiminden yola çıkarak sistem yanıtının referans değerine göre konumu belirlenmiştir. Önerilen ifadelerde, sistem yanıtının az sönümlü veya çok sönümlü olmasının yanında referans değerine uzaklaşıyor ya da yaklaşıyor olması durumu da gözönünde bulundurulmuş, buna göre bir katsayı ayarlaması gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır.

Yapılan çalışmada; ilk olarak PID kontrolörler hakkında bilgi verildikten sonra Ziegler Nichols basamak yanıtı ve frekans yanıtı yöntemleri incelenmiştir. Ziegler Nichols frekans yanıtı yöntemi ile belirlenen katsayıları iyileştirmeye yönelik önerilmiş bir yöntem olan Arttırılmış Ziegler Nichols yöntemi kısaca anlatılmıştır. 4. ve 5. bölümlerde ise kontrolör katsayılarını iyileştirmek amacıyla önerilen yöntem detaylı bir şekilde anlatılmış, önerilen yöntemin başarımını incelemek için benzetim çalışmaları yapılmıştır. Ziegler Nichols katsayılarını iyileştirmek amacıyla birinci merteben ve ikinci mertebeden ölü zamanlı sistemler üzerinde benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen benzetim çalışmalarında önerilen yöntem, ZNPI ve AZNPI yöntemleri ile karşılaştırılmış, belirli ölçütlere göre performans analizleri gerçekleştirilmiştir. Ek olarak birinci mertebeye indirgenmiş yüksek mertebeli sistem üzerinde de benzetim çalışması yapılmıştır. Benzetim çalışmalarının sonucunda

önerilen yöntemin sistem yanıtındaki üst aşım miktarını büyük oranda azalttığı görülmüştür. Ayrıca, önerilen ayarlama mekanizmasının sisteme uygulanan bozuculara karşı sistem dayanıklılığını arttırdığı söylenebilir. Kontrol edilmiş sistem yanıtı çok sönümlü olan sistemler için ise ikinci mertebeden ölü zamanlı sistemler üzerinde benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Yapılan benzetim çalışmalarında sistem yanıtının referans değerine daha kısa sürede ulaştığı, sistemin oturma süresinin kısaldığı gözlenmiştir.

Çalışmanın son bölümünde kontrol edilmiş sistem yanıtları az sönümlü ve çok sönümlü olan sistemlerin kontrolör parametrelerinin bir arada iyileştirilmesine yönelik bir çalışma önerisinde bulunulmuştur. Kontrolör parametreleri ayarlanmamış PI kontrolöründen sistem yanıtı hakkında bilgi alınır. Elde edilen bu sistem bilgisi yardımı ile az sönümlü veya çok sönümlü sistemler için geliştirilen ifadelerden hangisinin kullanılacağına karar verilir. Bir anahtarlama mekanizması sayesinde bu seçim gerçekleştirilir ve sistem yanıtına uygun katsayı ayarlaması yapılır. Ancak, önerilen bu yapının bilgisayar ortamında benzetiminin gerçekleştirilmesi mümkün değildir. İleride gerçek zamanlı bir uygulama çalışması olarak önerilmiş olan bu anahtarlama yapısı oluşturulabilir ve gerçek zamanda yapılan katsayı ayarlamasına bağlı olarak iyileştirilmiş sistem yanıtları elde edilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Åström, K. J., and Hägglund, T., 2006: *Advanced PID Control*, ISA, Research Triangle Park, NC.
- [2] O'Dwyer, A., 2000. A summary of PI and PID controller tuning rules for processes with time delay. Part1: PI Controller Tuning Rules. *Proceedings of PID '00*, IFAC Workshop on Digital Control, Terrassa, Spain, April 4-7, pp. 175-180.
- [3] Ziegler, J. G., and Nichols, N. B., 1942. Optimum settings for automatic controllers, *Transactions of the ASME*. 64. pp. 759–768.
- [4] Åström, K. J., and Hägglund, T., 2001. The future of PID control, *Control Engineering Practice*, 9(11), pp.1163-1175.
- [5] Hang C. C., Åström, K. J., and Ho, W.K., 1991. Refinements of Ziegler-Nichols tuning formula , *IEEE Proc-D*, 138(2), pp.111-8.
- [6] Mudi R. K., Dey, C. J., and Lee, T.T., 2008. An improved auto-tuning scheme for PI controllers, *ISA Trans*, 47, pp.45-52.
- [7] Eksin, İ., Güzelkaya M., Gürleyen F., 2001. A new methodology by deriving the rule-base of a fuzzy logic controller with a new internal structure, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 14(5), pp. 617-628.
- [8] Ogata, K., 1997: *Modern Control Engineering, Third Edition*, Prentice Hall, New Jersey, pp.681-685.
- [9] Araki M., 2009. PID Controller, *Control Systems, Robotics and Automation*, Eolss Publishers Co Ltd., 2.
- [10] Ang, K. H., Chong, G. Y., and Li, Y., 2005. PID control system analysis, design, and technology, *IEEE Transactions on Control System Technology*, 13(4), pp.559-576.
- [11] Cohen, G. H., Coon, G. A., 1953. Theoretical consideration of retarded control, *Trans. ASME*, 75, pp.827-834.
- [12] Åström, K. J., and Hägglund, T., 1984. Automatic tuning of simple regulators with specifications on phase and amplitude margins, *Automatica*, 20, pp.645-651.
- [13] Xue, D., Chen Y. and Atherton, D., P., 2007: *Linear Feedback Control Analysis and Design with Matlab*, Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, p.181.
- [14] Güzelkaya M., Eksin, İ., Yeşil E., 2003. Self-tuning of PID-type fuzzy logic controllers coefficients via relative rate observer, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 16, pp. 227-236.

- [15] **Skogestad, S.**, 2003. Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning, *Journal of Process Control*, 13, pp. 291-309.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Aysel ABALI

Doğum Yeri ve Tarihi: Ankara, 03.03.1986

Lisans Üniversitesi: Yıldız Teknik Üniversitesi