T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YAPAY ZEKA YÖNTEMLERİ KULLANILARAK PID DENETLEYİCİ PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Tezi Hazırlayan
Asuman SAVAŞÇIHABEŞ

Tezi Yöneten
Yrd. Doç. Dr. Aytekin BAĞIŞ

Elektrik - Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Mayıs 2008
KAYSERİ

Yrd. Doç. Dr. Aytekin BAĞIŞ danışmanlığında **Asuman SAVAŞÇIHABEŞ** tarafından hazırlanan **"Yapay Zeka Yöntemleri Kullanılarak PID Denetleyici Parametrelerinin Belirlenmesi"** adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında **Yüksek Lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

15.05.2008

JÜRİ:

Başkan : Prof. Dr. Derviş KARABOĞA

Üye : Doç. Dr. M. Emin YÜKSEL

Üye :Yrd. Doç.Dr. Aytekin BAĞIŞ

ONAY:

Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulunun 27/05/2008 tarih ve 2008/15-03 sayılı kararı ile onaylanmıştır.

27 / 05 / 2008

Prof. Dr. Nusret AYYILDIZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren tez danışmanım sayın Yrd. Doç. Dr. Aytekin BAĞIŞ' a ve Erciyes Üniversitesi çatısı altında aldığım eğitimde katkıları olan bütün öğretim elemanları ve idari personele teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, her zaman yanımda olan, beni yetiştiren sevgili aileme teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

YAPAY ZEKA YÖNTEMLERİ KULLANILARAK PID DENETLEYİCİ PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Asuman SAVAŞÇIHABEŞ

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Nisan 2008
Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Aytekin BAĞIŞ

ÖZET

Modern kontrol tekniklerinde son yıllarda görülen büyük gelişmelere rağmen orantı-integral-türev (proportional-ingtegral-derivative, PID) tipi denetleyiciler basit ve kararlı yapılarından dolayı endüstriyel sistemlerde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Yapılan denetleme işleminden istenilen sonuçların elde edilmesi, kullanılan denetleyicinin uygun biçimde belirlenmiş olmasıyla doğrudan ilişkilidir. PID tipi denetleyicilerin belirlenmesinde, denetleyici performansını etkileyen üç parametre önemlidir. Etkili bir denetim için orantı, integral ve türev sabiti olarak isimlendirilen bu üç parametrenin denetimin amacına yönelik en uygun şekilde belirlenmiş olması gerekmektedir. Klasik yöntemlerin dışında yapay zekaya dayalı yöntemlerin kullanılması, bu parametrelerin belirlenmesinde hızlı ve etkili çözümler sağlamaktadır.

Yaygın olarak kullanılan yapay zeka optimizasyon algoritmalarından bazıları genetik algoritmalar (genetic algorithms, GA), farksal evrim algoritması (FEA, differential evolution algorithm, DE) ve parçacık sürü optimizasyonu (particle swarm optimization, PSO)' dur. Bu yöntemler özellikle problem çözümünde çok sayıda olası adayın bulunduğu durumlarda en uygun seçimin yapılması için hızlı ve etkili sonuçlar üretebilmektedir. Bu çalışmada, belirlenen denetim amaçları doğrultusunda yapay zeka optimizasyon yöntemleri kullanılarak, sistem modeli tanımlanmış bir sürecin kontrol birimi olan PID parametrelerinin elde edilmesine çalışılmıştır. Yapılan çalışma, denetleyicinin sağlaması istenen şartları ifade eden bir amaç fonksiyonu dikkate alınarak parametre ayarlama işleminin en uygun biçimde gerçekleştirilmesi esasına dayanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Kontrol Sistemleri, PID Ayarlaması, Genetik Algoritma, Farksal Evrim Algoritması, Parçacık Sürü Optimizasyonu.

DETERMINATION OF THE PID CONTROLLER PARAMETERS USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Asuman SAVAŞÇIHABEŞ

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences
M. Sc. Thesis, April 2008
Thesis Supervisor: Assist. Prof. Dr. Aytekin BAĞIŞ

ABSTRACT

Because of their simple and robust structure, PID (propotional-integral-derivative) controllers have a wide range of use in many industrial systems despite the enormous interests that modern control techniques have developed during the last decades. To implement a PID controller, its three parameters such as proportional gain (k_p), integral gain (k_i) and derivative gain (k_d) must be determined optimally. According to classical methods, the better performance is expected by using some techniques based on artificial intelligence in determination of the PID parameters for desired system specifications.

Some of the common methods of artificial intelligence are genetic algorithms (GAs), differential evolution algorithm (DE), and particle swarm optimization (PSO). With the fast and effective performance of these methods, it is possible that optimal solutions of the problem considered can be obtained. In this study, in order to produce the PID controller parameters directed by some of optimization techniques we have used artificial intelligence. For this purpose, we have developed an objective function which gives the optimum results for our controller. The simulation results obtained by different optimization algorithms for several plants with different order are comparately presented. The results show that the differential evolution algorithm is an effective and powerfull method for improved performance in PID controlled systems.

Keywords: Control Systems, PID Tuning, Genetic Algorithms, Differential Evolution Algorithm, Particle Swarm Optimization.

İÇİNDEKİLER

	KABUL VE ONAY……..	i
	TEŞEKKÜR……..	ii
	ÖZET…….	iii
	ABSTRACT……	iv
	İÇİNDEKİLER……..	v
	KISALTMALAR VE SİMGELER……	viii
	TABLOLAR LİSTESİ……..	x
	ŞEKİLLER LİSTESİ…….	xi
1.	BÖLÜM……..	1
	GİRİŞ……..	1
2.	BÖLÜM……..	3
	YAPAY ZEKA OPTİMİZASYON TEKNİKLERİ……...	3
2.1.	Evrimsel Hesaplama……..	3
2.2.	Genetik Algoritmalar (GA, Genetic Algorithms) ……...	4
2.2.1.	Temel bir Genetik Algoritmanın Yapısı……	5
2.2.2.	GA Uygulaması……	7
2.2.2.1.	Problemin Kodlanması……..	7
2.2.2.2.	Başlangıç Popülasyonunun Oluşturulması…….	9
2.2.2.3.	Uygunluk Değerlendirilmesi……...	9
2.2.2.4.	Genetik Operatörler……...	10
2.2.2.5.	Kontrol Parametreleri…….	12
2.2.2.6.	Genetik Algoritma Uygulama Alanları …….	13
2.3.	Farksal Evrim Algoritması (FEA, Differential Evolution, DE) …….	14
2.3.1.	Algoritmanın Temel Adımları…….	16
2.3.1.1.	Kodlama Ve Başlangıç Popülasyonu……...	17
2.3.1.2.	Mutasyon…….	18
2.3.1.3.	Çaprazlama……..	18
2.3.1.4.	Uygunluk Fonksiyonu……...	19
2.3.1.5.	Seçim……...	19
2.3.1.6.	Algoritmanın durdurulması……	19
2.4.	Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO, Particle Swarm Optimization)...	20

2.4.1. Algoritmanın Temel İşleyişi…… 21
2.4.1.1 Parçacık Tanımı…… 21
2.4.1.2 Başlangıç Popülasyonu…… 21
2.4.1.3 Hız Güncellemesi …… 22
2.4.1.4 Konum Güncellemesi…… 22
3. BÖLÜM…… 24
KONTROL SİSTEMLERİ…… 24
3.1. Giriş…… 24
3.2. Kontrol Sistemi Türleri…… 25
3.2.1. Açık Çevrimli Kontrol Sistemleri (Geribeslemesiz Sistemler)…… 26
3.2.2. Kapalı Çevrimli Kontrol Sistemleri (Geribeslemeli Sistemler)…… 26
3.3. Geribesleme ve Etkileri…… 27
3.3.1. Geribeslemenin toplam kazanç üzerine etkisi…… 28
3.3.2. Geribeslemenin kararlılık üzerine etkisi…… 28
3.3.3. Geribeslemenin duyarlılık üzerine etkisi…… 28
3.4. Geribeslemeli Kontrol Sistemleri…… 29
3.4.1. Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Kontrol Sistemleri…… 29
3.4.2. Zamanla Değişen ve Zamanla Değişmeyen Sistemler…… 29
3.5. Kontrol Sistemlerinin Tasarımı…… 30
3.5.1. Tasarım Koşulları…… 30
3.5.1.1. Bode Diyagramları …… 32
3.5.1.2. Nyquist Kriteri…… 33
3.5.1.3. Performans Kriterleri…… 35
3.5.2. Denetleyici Yapıları…… 35
3.5.3. Tasarımın Temel İlkeleri…… 36
3.6. Temel Denetim Organları…… 36
3.6.1. Üç Terimli Kontrol…… 37
3.6.1.1. Orantı (P) Tipi Kontrol…… 37
3.6.1.2. İntegral (I) Tipi Kontrol…… 38
3.6.1.3. Türev (D) Tipi Kontrol…… 39
3.6.1.4. PID Tipi Kontrol…… 40
3.6.2. PID Parametrelerinin Ayarlanması…… 42
3.6.2.1. Ziegler-Nichols Metodu…… 43

4.	BÖLÜM…….……..……..……..……..……..……..……..……..	45
	YAPAY ZEKA YÖNTEMLERİ KULLANILARAK PID PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ…….……..……..……..	45
4.1.	Giriş…….……..……..……..……..……..……..……..…….…	45
4.2.	Genetik Algoritma Kullanılarak PID parametrelerinin bulunması……	52
	Farksal Evrim Algoritması Kullanarak PID Parametrelerinin	
4.3.	Bulunması…….……..……..……..……..……..……..……..…….	57
	Parçacık Sürü Optimizasyonu Kullanarak PID Parametrelerinin	
4.4.	Bulunması…….……..……..……..……..……..……..……..…….	61
	İyileştirilmiş Değerlendirme Fonksiyonu Kullanılarak PID	
4.5.	Parametrelerinin Bulunması…….……..……..……..……..……	64
4.6.	FEA Kullanılarak Elde Edilen Sistemlerin Frekans Analizi…….……	69
4.7.	Farklı Süreçler İçin PID Parametrelerinin Belirlenmesi…….……..…..	72
5.	BÖLÜM…….……..……..……..……..……..……..……..……..	75
	SONUÇ…….……..……..……..……..……..……..……..……...	75
	KAYNAKLAR…….……..……..……..……..……..……..…….	77
	ÖZGEÇMİŞ…….……..……..……..……..……..……..……..	83

KISALTMALAR VE SİMGELER

PID	Proportional-integral-derivative
GA	Genetik Algoritma
GGA	Gerçek Kodlu Genetik Algoritma
FEA	Farksal Evrim Algoritması
PSO	Parçacık Sürü Optimizasyonu
EA	Evrimsel Algoritma
P_m	Mutasyon Oranı
P_c	Çaprazlama Oranı
NP	Popülasyon Büyüklüğü
CR	Çaprazlama Sabiti
D	Değişken Sayısı
G	Jenerasyon
Po	Başlangıç Popülasyonu
xj,i,G :	G jenerasyonunda, i kromozomunun j parametresi (gen)
uj,i,G+1	xj,i,G den bir sonraki jenerasyon için üretilen kromozom
r1,2,3	yeni kromozomun üretilmesinde kullanılacak rasgele seçilmiş kromozomlar
(u)	değişkenlere ait alt ve üst sınır değerleri
KKO	Karınca Koloni Optimizasyonu
Td	Gecikme Zamanı
Tr	Yükselme Zamanı
Tp	Tepe zaman
Mp	Maksimum aşma
Ts	Oturma (yerleşme) zamanı

wd	sönümlü doğal frekans
ς	sönümlenme oranı
ISE	integral of the square of the error
IAE	integral of absolute magnitude of error
ITAE	integral of time multiplied by absolute error
k_p	orantı kazanç sabiti
k_i	integral kazanç sabiti
k_d	türev kazanç sabiti
Ti	integral zaman sabiti
Td	türev zaman sabiti
Z-N	Ziegler-Nichols
IMC	internal model control
u(t)	denetim sinyali
OS	Overshoot
Mfark	Maksimum fark
MA	Memetik Algoritma
KP	Kazanç Payı
FP	faz payı

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 3.1	kp, ki ve kd'nin Geçici Durum Parametrelerine Etkisi…….....	39
Tablo 3.2	Ziegler-Nichols İçin PID Parametreleri…….....	43
Tablo 4.1	GA Kontrol Parametre Değerleri……...	52
Tablo 4.2	GGA Kontrol Parametre Değerleri…….....	53
Tablo 4.3	FarklıYöntemler Kullanılarak Elde Edilen En Küçük F Değerlerine Karşılık PID Parametreleri…….……	55
Tablo 4.4	FEA Kontrol Parametre Değerleri……..…	57
Tablo 4.5	G1, G2, G3 Sistemleri İçin FEA Kullanılarak Elde Edilen Parametreler……	58
Tablo 4.6	PSO Kontrol Parametre Değerleri…….….	61
Tablo 4.7	PSO Kullanılarak Elde Edilen Sistem Parametreleri…….	62
Tablo 4.8	İyileştirilmişdeğerlendirme Fonksiyonu Kullanılarak PID Parametrelerinin Belirlenmesi……	67
Tablo 4.9	G1, G2 ve G3 Sistemlerinin İncelenmesinde Kullanılan Algoritmalara Ait Parametre ve Sonuçlar……..	68
Tablo 4.10	Gp1 Sistemine Ait Geçici Durum Parametreleri……	72
Tablo 4.11	Gp2 Sistemine Ait Geçici Durum Parametreleri……	73

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Temel Bir GA Akış Diyagramı…….6
Şekil 2.2. GGA Akış Diyagramı…….....8
Şekil 2.3. Rulet Tekerleği Seçim Operatörü……10
Şekil 2.4. Tek Noktalı Basit Çaprazlama Operasyonu……11
Şekil 2.5. Mutasyon İşlemi……..……12
Şekil 2.6. Farksal Evrim Algoritması……..……15
Şekil 2.7. PSO Algoritmasının Genel İşleyiş Yapısı……..….23
Şekil 3.1. Bir Kontrol Sisteminin Temel Öğeleri……...…….25
Şekil 3.2. Açık Çevrimli Kontrol Sistemi Öğeleri…….…..….26
Şekil 3.3. Kapalı Çevrim Kontrol Sistemi…….…..26
Şekil 3.4. Geribeslemeli Sistem……...….27
Şekil 3.5. Birim Basamak Girişe Karşılık Denetleyici Cevabı……31
Şekil 3.6. G(s)' e Ait Bode Diyagramı……...….33
Şekil 3.7. G(s)' e Ait Nyquist Diyagramı……34
Şekil 3.6. Kontrol Edilen Sistem…….....35
Şekil 3.7. Birim Basamak Cevapları……...……38
Şekil 3.8. PID Denetleyici Modülünün Paralel Yapısı…….……..40
Şekil 3.9. PID Denetleyicili Kontrol Sistemi…….…….40
Şekil 3.10. PID Terimi Seçme Diyagramı……...……41
Şekil 4.1. PID Denetimli Kontrol Sistemi…….…..47
Şekil 4.2. Pade Yaklaşımı…….....49
Şekil 4.3. Gecikmeli Bir Sistem İçin Pade Yaklaşımı…….50
Şekil 4.4. Birim Basamak Girişe Karşılık Kullanılan Sistemlerin Cevapları……..51
Şekil 4.5. PID Parametrelerinin GA ile Elde Edilmesi……...…….52
Şekil 4.6. G1 İçin Birim Basamak Cevapları……..55
Şekil 4.7. G2 İçin Birim Basamak Cevapları …….56
Şekil 4.8. G3 İçin Birim Basamak Cevapları……..56
Şekil 4.9. G1 İçin Birim Basamak Cevabı……...59
Şekil 4.10. G2 İçin Birim Basamak Cevabı……...…..59
Şekil 4.11. G3 İçin Birim Basamak Cevabı…….....60
Şekil 4.12. G1 İçin Birim Basamak Cevabı…….63

Şekil 4.13. G2 İçin Birim Basamak Cevabı…….63
Şekil 4.14. G3 İçin Birim Basamak Cevabı……..……...64
Şekil 4.15. G1 İçin Birim Basamak Cevabı……..……...65
Şekil 4.16. G2 İçin Birim Basamak Cevabı…….....66
Şekil 4.17. G3 İçin Birim Basamak Cevabı…….....66
Şekil 4.18. G1 Süreci İçin Bode ve Nyquist Diyagramı……..……69
Şekil 4.19. G2 Süreci İçin Bode ve Nyquist Diyagramı……..70
Şekil 4.20. G3 Süreci İçin Bode ve Nyquist Diyagramı…….….71
Şekil 4.21. Gp1’e Ait Sistem Cevabı……...……73
Şekil 4.22. Gp2’ye Ait Sistem Cevabı…….....74

1. BÖLÜM

GİRİŞ

Son yıllarda teknolojinin ve çağdaş yaşamın oldukça ilerlemesi ve gelişmesi ile birlikte kontrol sistemi teriminin önemi de hızla artmıştır. Kontrol, yaşamın her alanında karşılaşılan bir terimdir. Endüstrideki üretim süreçleri, ürün imalatının doğruluğu ve üretimde maliyetin düşürülmesi, insanın karar verme dâhil olmak üzere birçok farklı görevi gerçekleştirmesi, ulaşımda bir noktadan diğer bir noktaya güvenli bir biçimde iletim hep kontrol ile iç içe olan konulardır. Mühendislik ise insanlığın yararı için doğanın gücünü ve maddeyi anlama ve kontrol etme ile ilişkilidir. Kontrol mühendisliği, toplum için kullanışlı ekonomik ürünler geliştirmek üzere sistem olarak adlandırılan çevre birimlerinin algılanması ve denetlenmesi ile ilişkilidir. Bir kontrol sistemi, istenilen sistem cevabını üretecek bir sistem konfigürasyonunu biçimlendiren bileşenlerin karşılıklı bağlantısıdır. Geçtiğimiz birkaç on yılda, kontrol sistemleri, modern medeniyet ve teknolojinin ilerlemesinde önemi gittikçe artan bir rol üstlenmiştir. Kontrol mühendisliği herhangi bir mühendislik dalı ile sınırlandırılmamasına karşın, havacılıkla ilgili, kimyasal, mekanik, çevresel, endüstriyel ve toplumsal alanlarda birçok uygulamaya sahiptir. Ayrıca, ticari, sosyal ve politik sistemlerin dinamiklerinin anlaşılmasında, bu sistemlerin modellenmesi ve kontrolü önemli bir rol oynamaktadır. Buna otomatik kontrol eklendiğinde ise kontrolün sahası daha da gelişmektedir.

Kontrol sistemlerinin tasarımında klasik, modern ya da yapay zekâya dayalı yöntemler kullanılmaktadır. Sistem tasarımının kontrol edilen sürecin işleyişine ve istenilen çıkış değerlerinin seçimine göre değişmesi tasarımda birçok metodun uygulanabilirliğine yol açmaktadır. Tasarım işleminde klasik, modern veya yapay

zeka yöntemlerinden birinin ya da birkaçının birlikte kullanılması oldukça etkili ve yararlı kontrol sonuçlarının elde edilmesini sağlayabilmektedir.

Bu çalışmada, endüstride en çok kullanılan orantı-integral-türev (PID) tipi denetleyicilerin tasarımına çalışılmış, PID parametrelerinin belirlenmesine yönelik yapay zeka optimizasyon algoritmalarından yararlanılmıştır. Kullanılan algoritmalar denetlenen sistemin girişinde yer alan PID' ye uygulanmış ve sistemin istenilen dinamik cevabının elde edilmesini sağlamak üzere PID parametreleri araştırılmıştır. Bu amaçla denetleyiciye Genetik Algoritma (GA), Gerçek kodlu Genetik Algoritma (GGA), Farksal Evrim Algoritması (FEA) ve Parçacık Sürü Algoritması (PSO) uygulanmıştır. İstenilen amaca en uygun, en düşük hatalı sistem çıkışının elde edilmesine çalışılmış ve PID parametre belirleme işlemi gerçekleştirilmiştir.

Bu tez çalışmasının ikinci bölümünde son yıllarda birçok alanda problem çözmeye yönelik yaygın olarak kullanılan yapay zeka optimizasyon teknikleri (GA, GGA, FEA, PSO) hakkında bilgiler verilmiş, algoritmaların temel işleyişi, çalışma prensipleri ana hatlarıyla anlatılmıştır.

Üçüncü bölümde kontrol sistemleri hakkında temel bilgilere yer verilmiş, kontrol sistemlerinin tasarım ilkeleri anlatılmış ve temel denetleyici yapılarından bahsedilerek örnekler yardımıyla PID ayarlanması (PID tuning) sunulmuştur.

Dördüncü bölümde üzerinde çalışılan PID denetleyici parametrelerinin ayarlanması problemi üzerinde durulmuş ve yapılan çalışma sunulmuştur. Çalışmada literatürde bulunan süreçlere ait transfer fonksiyonları kullanılmıştır. Farklı algoritmalarla elde edilen PID denetleyicili sistem sonuçları başta Ziegler-Nichols yöntemi olmak üzere yine literatürde yer alan çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar grafik ve tablolar biçiminde sunulmuştur.

Beşinci bölümde, elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

2. BÖLÜM

YAPAY ZEKA OPTİMİZASYON TEKNİKLERİ

2.1. Evrimsel Hesaplama

Yakın zamanda özellikle son yıllarda evrim prensibine dayalı algoritmalar yaygın olarak kullanılmış ve bu algoritmalarla ilgili araştırmaların ve çalışmaların sayısı hızla çoğalmıştır. Son zamanlarda bu prensibe dayalı tekniklerin hepsini temsilen ortak bir terim olarak *evrimsel hesaplama* terimi yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu gruptaki algoritmalara örnek olarak genetik algoritmalar, evrimsel programlama, evrimsel stratejiler, genetik programlama ve diferansiyel gelişim algoritması gibi örnekler verilebilir. Bunun yanı sıra literatürde bu tekniklerin çeşitli özelliklerini bir arada kullanan çok sayıda sistemler de vardır. Bu nedenle genel olarak belirtilecek olursa bir temel evrimsel algoritma aşağıdaki elemanlara ihtiyaç duymaktadır [1,2]:

- Problem için çözümlerin genetik temsili,
- Çözümlerin başlangıç popülasyonunu oluşturacak bir yöntem,
- Çözümlerin uygunluğunu değerlendirecek değerlendirme fonksiyonu,
- Genetik operatörler,
- Kontrol parametreleri.

Zor bir problemin optimizasyon sürecinde, ilk seçilen metot genellikle problemin spesifik bir sezgisel yöntemi olacaktır. Uzman bilgi kullanıldığında bu teknikler daha iyi performans sağlayacaktır. Eğer, problemin sezgisel yöntemi bilinmeyen sistem parametrelerine bağlı olarak uygulanabilir özellikte değilse (çoklu bölgesel minimum, evrimsellenememe..), bu durumda EA (Evrimsel Algoritma)' lar bu sınırlamaların üstesinden gelebilecek potansiyele sahiptirler [3].

2.2. Genetik Algoritmalar (GA, Genetic Algorithms)

Genetik Algoritma (GA), popülasyon olarak adlandırılan kromozomlardan oluşmuş çözümler kümesine dayalı olarak çalışan sezgisel bir optimizasyon yöntemidir. GA hakkındaki ilk çalışmalar ilk olarak 1975 yılında J.H.Holland tarafından yapılmıştır. Michigan Üniversitesinde doğaya uyumu esas alan dersler veren Holland, 1970'li yılların başlarında arkadaşları ve öğrencileri ile birlikte Charles Darwin'in (1859) doğal evrim teorisinden yola çıkarak genetik algoritma kuramı üzerinde çalışmaya başlamıştır.

GA 'en iyi' olanın hayatta kalma ilkesine ve doğal seçim mekanizmasını temel alan ve bu ilkelerin bilgisayarda simülasyonunun yapılmasıyla sonuca ulaşan bir yöntemdir. Doğal evrim teorisine göre, doğada mevcut canlılardan bulundukları ortamlara uyum sağlayamayan zayıf üyeler yok olurlar. Ortamlarına uyum sağlayan sağlam üyeler hayatta kalırlar. Her yeni nesil bir önceki neslin en iyi özelliklerini alır ve zamanla çevre şartlarında meydana gelebilecek değişikliklere uyum sağlayacak şekilde değişir ve gelişir. En son nesil, geçmiş nesillere göre en iyi uyumu sağlayan nesildir. Genetik Algoritmaların çalışma esasları da doğanın temel prensipleriyle paraleldir.

Genetik Algoritmalar karmaşık çok boyutlu arama uzaylarındaki global optimal çözümleri bulmak için kullanılan rasgele arama teknikleridir. Optimizasyona başlamak için, GA' lar rasgele rakam üreticisi tarafından belirlenen rasgele üretilmiş başlangıç çözümlerini kullanmaktadır. Bu metot problem hakkında bir ön bilgi bulunmadığı takdirde tercih edilir. Bu yöntemde bireylerin popülasyonları ile işleme başlanır. İkili dizinin temsil ettiği her birey parametre uzayında bir noktayı temsil eder. Her nesilde her bir birey için amaç fonksiyonunun değeri onun uygunluğu olarak değerlendirilir ve daha uygun olan bireyler seçilerek yeni bir popülasyon elde edilir. Böylece, bireylerin uygunluğuna dayalı yeni çözümler oluşturulur. Yüksek uygunluk değerine sahip bireyler daha sıklıkla seçildiği için daha uygun olan bireylerin popülasyona katılması yönünde baskı vardır. Birkaç nesil sonra en iyi bireyin optimal çözümü temsil etmesi umulur.

Genetik Algoritmalar doğal seleksiyon ve doğal genetik mekanizmasına dayalı bir algoritmadır. Her bir jenerasyonda, her bir birey bir uygunluk değerine sahiptir. Bu

uygunluk değeri, bir sonraki jenerasyonda bireyin hayatta kalma ihtimalini taşır. Böylece yüksek uygunluk değeri bir sonraki nesle taşınma şansını arttırmaktadır. Genetik Algoritmalar bazı temel yollarla geleneksel metotlardan ayrı tutulurlar [4,5,6]. Bunlar;

1. GA'lar parametrelerin kendisiyle değil, kodlanmış parametre setleriyle çalışırlar.
2. GA'lar olası çözümleri içeren bir popülasyon yapısı kullanır.
3. GA'lar türev ya da yardımcı diğer bilgileri değil, genetik operatörlere dayalı sezgisel bir araştırma kullanır.
4. GA'lar deterministik kuralları değil, olasılıksal geçiş kurallarını kullanır.

Genetik Algoritmaların literatürde çok sayıda başarılı uygulamaları mevcuttur. Ancak GA'ların zayıf performans gösterdiği durumlar da mevcuttur. Verilen belirli bir problem için GA' nın iyi bir metot olup olmadığına karar vermek için şu yaklaşım düşünülebilir: eğer hızlıca bulunacak iyi bir çözüm yeterli ise, bu durumda GA zayıf çözümlerle yarışacak ya da onlara üstün gelecek şansa sahiptir demektir.

2.2.1. Temel bir Genetik Algoritmanın Yapısı

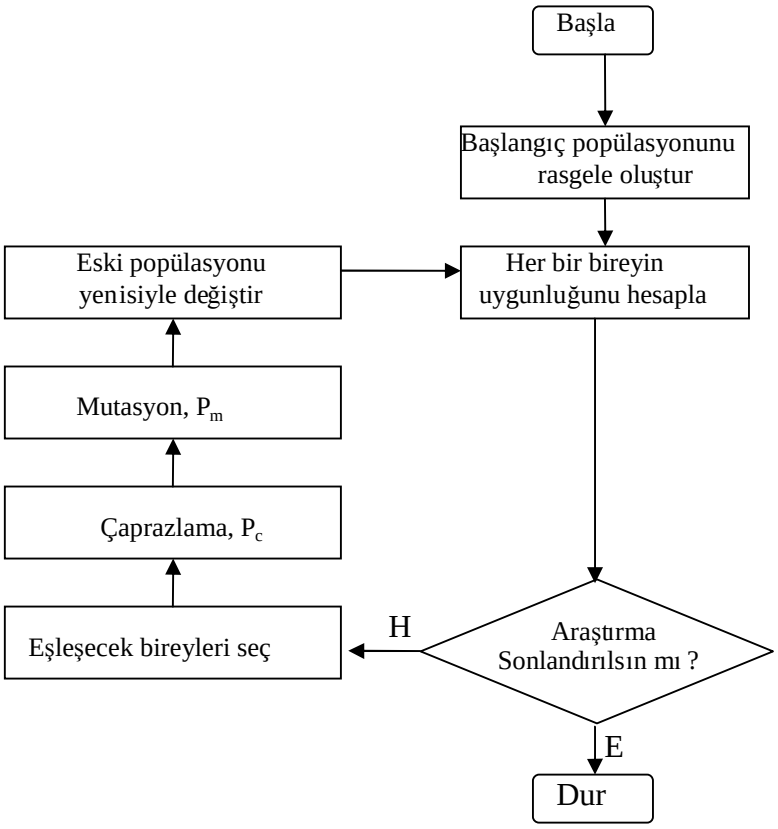
Genetik Algoritmaların en yaygın tipi şu şekilde çalışır: Rasgele oluşturulan bireylerin bir grubuyla bir popülasyon oluşturulur. Popülasyondaki bireyler daha sonra değerlendirilir. Değerlendirme fonksiyonu programcı tarafından geliştirilir ve bireylere verilen problemdeki uygunluklarına göre değerler atar. Daha sonra iki birey uygunluk fonksiyon değerlerine bağlı olarak seçilirler, uygunluk değeri arttıkça seçilme şansı da artar. Bu bireyler bir ya da birden fazla birey oluşturmak üzere rasgele mutasyona tabi tutulur. Programın ihtiyaçlarına göre bu işlem, uygun bir çözüm buluncaya kadar ya da belli sayıda jenerasyona ulaşılıncaya kadar devam eder.

Genetik Algoritma'da önce başlangıç popülasyonu oluşturulmakta ve sonra tabii seçme işlemi ile beraber çaprazlama (cross-over) ve mutasyon operatörleri bir sonraki jenerasyondaki bireyleri üretmek amacıyla kullanılmaktadır. Kalite ve uygunluk değerlendirme işlemi yeniden üreme olayında uygulanan seçme işlemini gerçekleştirebilmek için her bir bireye uygulanmaktadır. Birbirini takip eden

jenerasyonların geliştirilmesi ve değerlendirilmesi çevrimi istenilen optimal çözüm bulununcaya kadar devam etmektedir. Basit bir GA her biri algoritmanın performansını önemli derecede etkileyen beş temel elemandan oluşur. Bu elemanlar; gösterim, başlangıç popülasyonunun oluşturulma şekli, uygunluk veya kalite değerlendirme fonksiyonu, genetik operatörler ve kontrol parametreleridir. Şekil 2.1'de GA'nın temel akış diyagramı gösterilmektedir.

Özel bir problem için bir GA, aşağıdaki faktörlere sahip olmalıdır:

- Problemin mevcut çözümleri için genetik bir tanımlama
- Bu mevcut çözümler için bir başlangıç popülasyonunun oluşturulması
- Bunların uygunluğuna bağlı olarak çözüm artışını sağlayan ve gelişmede rol oynayan bir değerlendirme fonksiyonu
- Yeniden üreme esnasında çocukların kompozisyonunu değiştiren genetik operatörler
- GA'nın kullandığı değişik parametre (popülasyon büyüklüğü, uygulanan genetik operatörlerin olasılıkları vb.) değerleri



Şekil 2.1. Temel Bir GA Akış Diyagramı

Şekil 2.1’ de verilen genetik algoritmanın temel adımları şu şekilde açıklanabilir:

Adım 1. Çözümlerin bir başlangıç popülasyonunun oluşturulması

Adım 2. Popülasyondaki her bir çözüm için uygunluk değerinin hesaplanması

Adım 3. Durdurma kriteri sağlanıncaya kadar

3.1. Doğal Seleksiyon işleminin uygulanması.

3.2. Çaprazlama işleminin uygulanması(mevcut iki çözümden yeni iki yapı üretir).

3.3. Mutasyon işleminin uygulanması(çözümlerde rasgele farklılık üretir).

Adım 4. Adım 2’ye dön.

2.2.2. GA Uygulaması

GA’ nın uygulaması iki bölümde incelenebilir. İlk bölüm problemin kodlanması ve ikinci bölümün algoritmanın operatörleridir.

2.2.2.1. Problemin Kodlanması

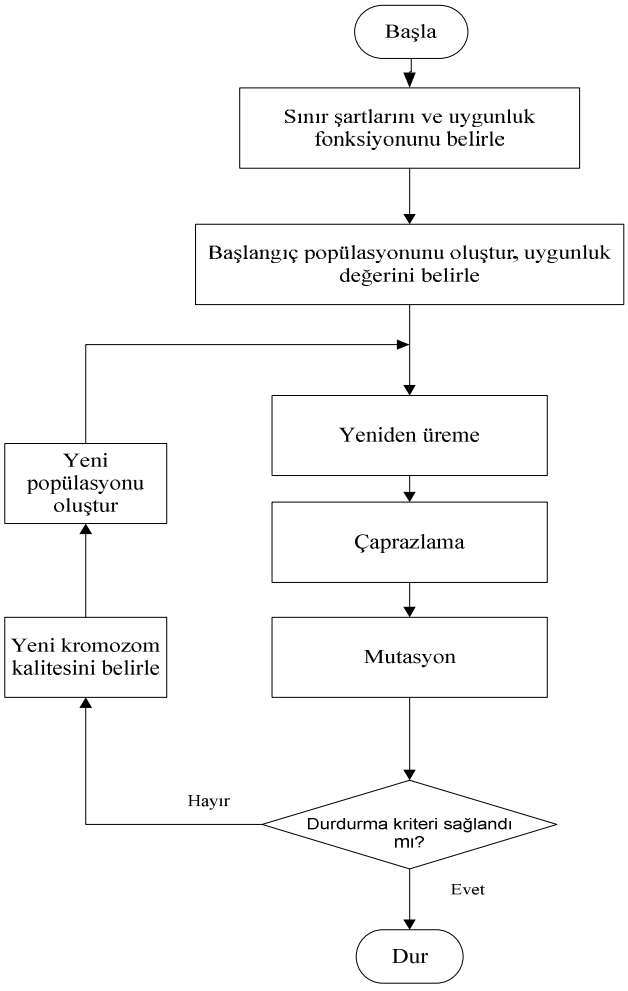
Bir problemin GA larda gösterimi için çeşitli yöntemler mevcuttur. Her problem için uygun bir gösterim belirlenmelidir. Ancak birçok probleme uygulanabilir ve sıkça kullanılan yaygın bazı metotlar mevcuttur. Bunlar ikili (binary) kodlama, gerçek değerli (real) kodlama ve ağaç (tree) kodlamasıdır.

İkili kodlama genetik algoritmalar için en iyi bilinen ve kullanılan kodlamadır. Bir problemi ifade etmede sadece 0’lar ve 1’lerin kombinasyonları kullanılmaktadır. Dolayısıyla sabit boyutlu (fixed-size) bir kodlamadır. Sabit boyutlu kodlamada sadece 0 ve 1’lere izin verildiği için ikili kodlamayı problemlere uygulamak oldukça kolaydır.

Gerçek kodlu GA (GGA), genetik operatörler yardımıyla evrim mekanizmasını uygulayan araştırma algoritmalarıdır. Ele alınan problem için çözümleri ifade eden kromozomlar ikili kod ile değil, çözüm uzayı sınırları içerisinde yer alan onluk düzendeki gerçek sayısal değerlerle ifade edilir. Bu özellik GGA’ nın ikili kodlu GA’ dan temel farkını da ortaya koymaktadır. Uygulama kolaylığı ve gerçek problemlere uygunluğu dolayısıyla birçok gerçek optimizasyon probleminin çözümünde genlerin

gerçek değerleriyle kullanılması daha yararlıdır. GGA' da başlangıç popülasyonunu tanımlandıktan sonra, kromozomlardan oluşan bu olası çözümler daha önceden belirlenen bir amaç fonksiyonundan elde edilen uygunluk değerlerine göre değerlendirilirler. Seçim yöntemi ile en uygun kromozomlar seçilirler ve çaprazlama ve mutasyon operatörlerine tabi tutulurlar. Elde edilen yeni olası çözümler istenilen kaliteye ulaşıncaya kadar bu seçme ve değerlendirme işlemi devam eder.

Çözümlerin ikili düzende tanımlanması, kullanılan bit sayısı ile ilişkili olarak çözüm kesinliğini etkiler. Eğer kromozomların değerleri çok büyük ve ondalıklı yapıya sahipse, bu kromozomların ikili kod ile temsil edilmesi çok karmaşık ve zor olacaktır. Ayrıca çözümlerin gerçek değerlerle tanımlanmış olması hesaplama etkinliğini de oldukça arttırır. Bu nedenle birçok mühendislik probleminin çözümünde GGA'ların kullanılması kullanıcıya büyük kolaylık sağlayabilmektedir.



Şekil 2.2. GGA Akış Diyagramı

Gerçek kodlu genetik algoritmanın genel akış diyagramı Şekil 2.2' de verilmiştir. Görüleceği gibi GGA'nın genel işleyişi ikili kodlanmış GA'larla aynıdır. İkili kodlu GA'da kullanılan çaprazlama, mutasyon ve seçme operatörleri GGA'da da kullanılır. Algoritmanın yapısındaki temel farklılık, çözümlerin tanımlanmasında ve genetik operatörlerin kullanılmasında ortaya çıkmaktadır. Gerçek kodlama tekniği özellikle değişken sayısının büyük olduğu problemlerin çözümünde büyük katkılar sağlayabilmektedir.

Gerçek kodlu algoritma belli sınırlar içerisinde belirlenen kromozomlardan oluşan rasgele başlangıç popülasyonunun oluşturulması ile başlar. Kromozomlar daha önceden belirlenen bir amaç fonksiyonunun ürettiği uygunluk değerine göre değerlendirilirler. En iyi uygunluk değerine sahip kromozomlar (ebeveynler) seçme yöntemi ile seçilir. Seçilen iki ebeveyne çaprazlama işlemi uygulanır. Böylece ebeveynlerin genetik bilgisinin değiştirilmesiyle yeni bir birey meydana getirilir. Algoritmanın diğer işlemi olan mutasyon da yine gerçek kodlu yönteme göre uygulanır ve yeni olası çözümlerin kaliteleri istenilen sonlandırma kriterini sağlayıncaya kadar yeni popülasyon oluşturma işlemleri tekrarlanır.

2.2.2.2. Başlangıç Popülasyonunun Oluşturulması

Uygulama çalışmalarında genetik algoritmanın başlangıç popülasyonu oluşturulmasında takip edilen yöntemler genelde farklıdır. Gerçek mühendislik problemlerinin çözümü için değil de araştırma amaçlı yapılan çalışmalarda kullanılan genetik algoritmaların başlangıç popülasyonu genelde rasgele sayı üreticisi kullanılarak oluşturulur. Eğer başlangıç için bazı çözümler biliniyorsa başlangıç popülasyonu bu çözümlerden de oluşturulabilir.

2.2.2.3. Uygunluk Değerlendirilmesi

Verilen problem için uygun bir gösterim bulunduktan sonra GA operatörleri uygulamalıdır. Temel bir GA'nın tekrar üreme, çaprazlama ve mutasyon operatörlerini içermesi gerekmektedir ve bu aşamada önemli bir kavram olan bireyin popülasyondaki

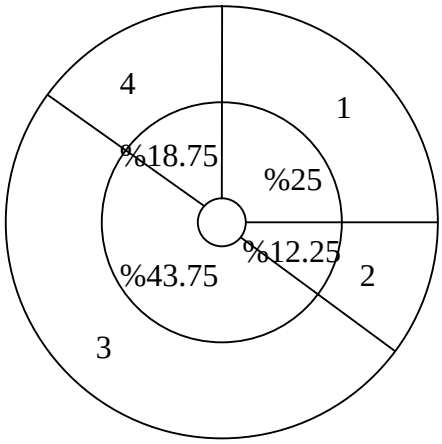
uyumunu gösteren bir uygunluk (fitness) bulunmalıdır. Uygunluk fonksiyonu f, maksimize edilecek fayda, kullanılabilirlik ve uygunluk olarak düşünülebilir.

2.2.2.4. Genetik Operatörler

Basit Genetik Algoritmaların üç temel operatörü vardır. Bunlar yeniden üreme (reproduction), çaprazlama (cross-over) ve mutasyon (mutation) dur. Bu operatörleri açıklamadan önce kromozom terimini açıklamak gerekir. Kromozom popülasyondaki her bir bireye (offspring) verilen isimdir. Her bir genetik operatör bir kromozom seti üzerine uygulanır.

- **Yeniden Üreme**

Yeniden üreme bireylerin uygunluk fonksiyonlarına bağlı olarak kopyalandığı bir metottur. Bireylerin uygunluk değerlerine göre kopyalanması yüksek katılım ihtimali olan bir ya da birkaç bireyin yeni jenerasyona geçmesi demektir. Yeniden üreme işleminin uygulanmasındaki en kolay yol bir rulet tekerleği kullanmaktır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Rulet Tekerleği Seçim Operatörü

Rulet tekerleğine göre, popülasyonun toplam uygunluk değeri üzerinden dizinin uygunluk değeri oranına göre her bir birey kopyalanır. Her bir bireyin bir çözüm olarak belirlendiği bu teknikte çözümlere kalite değerinin popülasyonun ortalama kalite değerine oranına göre tekerlek üzerinde bir delik verilir. Bu durum dört tane bireyden oluşan bir popülasyon için aşağıda belirtilmiştir. Daha sonra tekerlek, tekrar üremeye

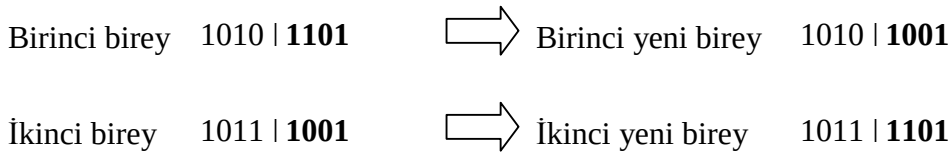
tabii tutulacak bireylerin seçimi için yeterli sayıda döndürülür. Her dönüşte top hangi bireye ait boşluğa girerse o dönüş için o birey başarılı olmuş demektir. Başarılı adaylar diğer genetik operatörlerin uygulanması için eşleştirme havuzu (mating pool) nda toplanırlar.

- **Çaprazlama**

Tekrar üremeden sonra bireyler parçalarını yer değiştirir. Bu işlem çaprazlama olarak adlandırılır. Dolayısıyla çaprazlamanın yeni ve daha uygun bireyler üretmesi beklenir.

Eşleştirme havuzunda bulunan bireylerin birer çifti seçilir ve çaprazlama operatörü bu iki çözümden yeni iki çözüm meydana getirmek için uygulanır. Eski çözümler ve çaprazlama uygulandıktan sonra ortaya çıkan yeni çözümler mevcut jenerasyonda tutulur veya yer değiştirirler. Kötü yapılar atılır ve popülasyon büyüklüğü sabit kalır.

Çaprazlama operatörünün en basit hali şöyle açıklanabilir: Eski bireyler üzerinden rasgele bir yer seçilir ve buradan kesilir. Bireylerin kesme noktasından sonraki kısımları iki yeni birey üretmek için birbiriyle yer değiştirir ve bu sayede daha iyi bireyler oluşturmak amaçlanır.



Şekil 2.4. Tek Noktalı Basit Çaprazlama Operasyonu

- **Mutasyon**

Doğada bazen bazı kural dışı durumlar oluşur. Doğadaki bu istisnalar mutasyon olarak adlandırılır. Mutasyonlar her zaman için iyi sonuçlara yol açmazlar. Bazen mutasyon bir bireyden faydalanmayı yok edebilir. Fakat bazen de tersi durum oluşabilir. Dolayısıyla mutasyon bir bireyden faydalanmayı arttırmak üzere kullanılan bir işlemdir.

Mutasyon operatörü olmayan bir genetik algoritma, elemanların tekrar üreme ve çaprazlama operasyonlarının da değişmediği varsayılırsa, optimal çözümü ancak elemanların başlangıç popülasyonunda bulunması halinde bulabilir. Mutasyon yeni çözüm elemanlarının üretilmesini sağlar.

Eski dizi 1 **1** 0 1 0 0 1 0 1 **1**



Yeni dizi 1 **0** 0 1 0 0 1 0 1 **0**

Şekil 2.5. Mutasyon İşlemi

2.2.2.5. Kontrol Parametreleri

Kullanıcı tarafından seçilen genetik operatörler gibi algoritmanın kontrol parametreleri de probleme uygulanın algoritmanın performansını önemli ölçüde etkiler. Genetik Algoritmanın temel kontrol parametreleri popülasyon büyüklüğü, maksimum jenerasyon sayısı, çaprazlama oranı ve mutasyon oranı'dır.

- **Populasyon Büyüklüğü**

Popülasyon büyüklüğü için belirlenen değer algoritmanın performansı üzerinde etkilidir. Bu değer aşırı küçükse araştırma uzayı yeterince örneklenemeyecek ve araştırma belli bir alt optimal noktaya doğru sürüklenecektir. Yüksek bir değer olduğunda ise bir jenerasyonluk çalışma oldukça uzun sürecektir ve bu zaman açısından önemlidir. Dolayısıyla popülasyon büyüklüğü için uygun değer belirlenmelidir.

- **Çaprazlama Oranı**

Popülasyondaki bireylere uygulanacak çaprazlama operatörünün frekansını belirleyen bir parametredir. Düşük çaprazlama oranı yeni bireylere çok az sayıda yeni yapının eklenmesine neden olmaktadır. Bu nedenle tekrar üreme operatörü algoritmada oldukça etkili operatöre dönüşmekte ve araştırmanın yakınsama hızı düşmektedir. Yüksek çaprazlama oranı araştırma uzayının çabucak araştırılmasına neden olmaktadır. Ama bu

değer aşırı yüksekse çaprazlama operatörü yeni yapıları üretemeden güçlü olan yapılar çabucak bozulduğundan algoritmanın performansı düşmektedir.

- **Mutasyon Oranı**

Yüksek mutasyon oranı araştırmaya aşırı bir rasgelelik kazandıracak ve araştırmayı çok hızlı olarak ıraksatacaktır. Yani popülasyona istenmeyen tahribat verecektir. Aksi durumda düşük mutasyon oranı kullanıldığında ise araştırma uzayının tamamen araştırılması engelleneceğinden bu oranın uygun bir değer olarak seçilmesi algoritmanın değişimi açısından önemlidir.

Özet olarak genetik algoritmaların rasgele tekniklerin bir üyesi olduğu söylenebilir. Matematikteki diğer iki teknik hesaplama tabanlı ve nümeratif metotlardır. Araştırmacılar rasgele tekniklerin zamanda ve uzayda diğer iki metottan daha iyi olduğunu savunmaktadırlar.

2.2.3. Genetik Algoritma Uygulama Alanları

Karmaşık problemleri hızlı ve optimale yakın olarak çözebilen GA'lar çeşitli problem tiplerine uygulanabilmektedir. GA'lar özellikle çözüm uzayının geniş, süreksiz ve karmaşık olduğu problem tiplerinde başarılı sonuç vermektedir.

Genel uygulama alanları:

- Optimizasyon
- Otomatik programlama ve bilgi sistemleri
- Mekanik öğrenme
- Fonksiyon Maksimizasyonu
- Gezgin Satıcı Problemi
- Bulanık (Fuzzy) Algoritmaları
- Sinir Ağları

İşletmelerdeki uygulama alanları:

- Finans, Pazarlama
- Çizelgeleme problemi
- Gezgin satıcı problemi
- Sistem güvenliği problemi
- Hücresel üretim problemi

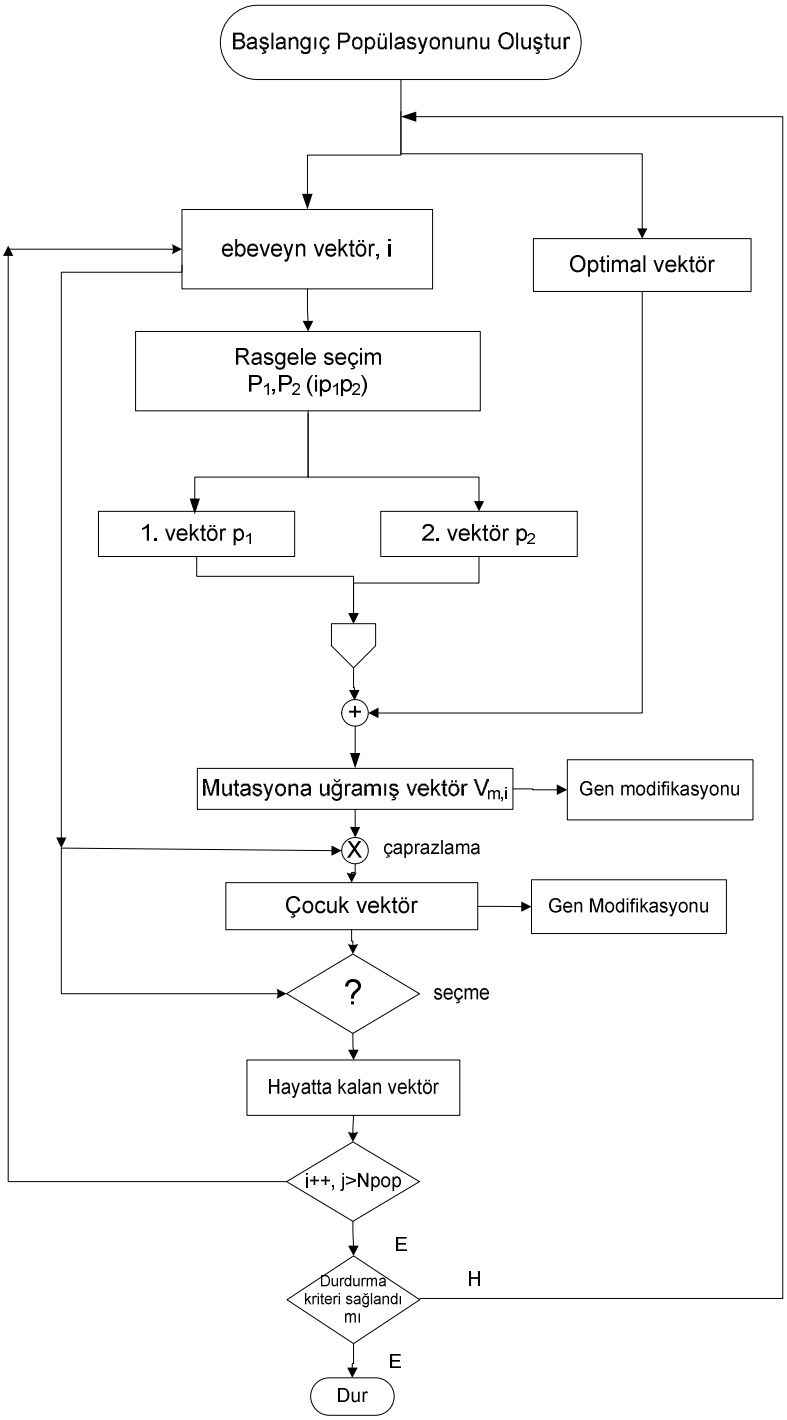
2.3. Farksal Evrim Algoritması (FEA, Differential Evolution, DE)

Farksal Evrim Algoritması (FEA), özellikle sürekli verilerin söz konusu olduğu problemlerde etkin sonuçlar verebilen, basit ama güçlü popülasyon tabanlı bir algoritmadır [3].

Genetik algoritmalara benzer biçimde çaprazlama, mutasyon ve seçme operatörlerini kullanır. Gerçek değerli tasarım parametrelerini içeren fonksiyonları minimize etmek amacıyla kullanılan bir araştırma algoritmasıdır. Farksal Evrim Algoritması, küresel optimizasyon için basit, ama güçlü popülasyon tabanlı bir algoritmadır[7]. Algoritmanın temel işleyişi Şekil 2.6' da verilmiştir [8].

FEA, Rainer Storn tarafından ortaya atılan Chebyshev polinomsal uyum problemini çözmek için Kenneth Price tarafında geliştirilmiştir [9,10]. Price ve Storn' un çalışmaları, FEA' nın her alanda kullanılabileceğini ortaya koymuş ve diğer sezgisel yöntemlere göre avantajlarının ortaya çıkartılmasında çok yararlı olmuştur.

Farksal evrim algoritması temelde üç avantaja sahip olan bir sezgisel algoritmadır. Bu avantajlar, başlangıç parametre değerlerinden bağımsız olarak gerçek global minimumu bulma, az sayıda kontrol parametresi bulma ve hızlı yakınsama' dır.



Şekil 2.6. Farksal Evrim Algoritması

FEA genetik algoritmalar gibi popülasyon tabanlı bir algoritmadır ve onlara benzer biçimde, çaprazlama, mutasyon ve seçme operatörlerini kullanır. Mühendislik optimizasyon problemleri için FEA, umut verici bir yaklaşım olarak gözükmektedir.

2.3.1. Algoritmanın Temel Adımları

FEA' nın basit yapısı, kullanım kolaylığı, hızı ve dinçliği en önemli avantajları arasında yer almaktadır. FEA'nın önemli parametreleri: NP (Number of Population-popülasyon büyüklüğü), CR (Crossover Rate-çaprazlama sabiti), F (Scaling Factor-ölçekleme faktörü) olarak sayılabilir. D parametresini içeren bir optimizasyon, D boyutlu bir vektör ile gösterilebilir. FEA'da, NP adet çözüm vektörünün bir popülasyonu başlangıçta rasgele meydana getirilir. Bu popülasyon mutasyon, çaprazlama ve seleksiyon operatörleri uygulanarak başarılı bir şekilde geliştirilir [11].

FEA tipik bir gelişim algoritmasıdır. Algoritmanın temel adımları şu şekildedir:

- Başlangıç popülasyonunu oluştur
- Popülasyonu değerlendir
- Durdurma kriteri sağlanıncaya kadar aşağıdaki işlemleri yap
    - Mutasyon
    - Rekombinasyon
    - Değerlendirme
    - Seçme

Algoritma başlangıçta NP tane D boyutlu amaç değişken vektörlerinin x_{jiG} rasgele dağıtılmış başlangıç popülasyonunu (P_0) üretir. Daha önce tanımlanmış olasılık dağılım fonksiyonuna dayalı olarak çalışan genetik algoritma gibi gelişim tabanlı algoritmaların tersine farksal evrim algoritması rasgele seçilmiş amaç vektör çiftlerinin farklarına dayalı bir mutasyon işlemi kullanır. Algoritma popülasyon tabanlıdır. Aynı anda birçok noktada araştırma yapmaktadır. İterasyonlar boyunca, operatörler yardımıyla problemin çözümü için daha iyi sonuçlar araştırılmaktadır. Klasik ikili GA' dan farklı olarak değişkenler gerçek değerleriyle temsil edilmektedir. GA' da da gerçek değerlerle kodlama kullanılmaktadır (Hrstka ve Kucerova, 2004, Michalewicz, 1992). Ancak Price ve Storn genetik operatörlerdeki birtakım değişikliklerle, gerçek değerlerle kodlamanın kullanıldığı problemlerin çözüm performansını arttırmaya çalışmışlardır. GA' daki çaprazlama, mutasyon ve seçim operatörleri FEA' da da kullanılmaktadır. Farklı olarak her bir operatör tüm popülasyona sırayla uygulanmamaktadır. Kromozomlar tek tek ele alınmakta, rasgele seçilen diğer üç kromozom kullanılarak da yeni bir birey elde

edilmektedir. Bu işlemler sırasında mutasyon ve çaprazlama operatörleri kullanılmış olmaktadır. Mevcut kromozomla elde edilen yeni kromozomun uygunlukları karşılaştırılarak uygunluğu daha iyi olan, yeni birey olarak bir sonraki popülasyona aktarılmaktadır. Böylelikle seçim operatörü de kullanılmış olmaktadır. Üretilen çözümlerin kalitesi, amaç fonksiyonuna ürettikleri değerle (uygunluk degeri) ölçülmektedir. FEA' nın diğer sezgisellere önemli bir üstünlüğü de kolayca kodlanabilmesidir.

FEA' na ait temel tanımlamalar aşağıda verilmiştir:

NP : popülasyon büyüklüğü (kromozom sayısı)
D : değişken sayısı (gen sayısı)
CR : çaprazlama oranı
G : jenerasyon
F : ölçekleme faktörü
xj,i,G : G jenerasyonunda, i kromozomunun j parametresi (gen)
nj,i,G+1 : mutasyon ve çaprazlamaya tabi tutulmuş ara kromozom
uj,i,G+1 : *xj,i,G* den bir sonraki jenerasyon için üretilen kromozom (child-trial)
*r*1,2,3 : yeni kromozomun üretilmesinde kullanılacak rasgele seçilmiş kromozomlar
(u) : değişkenlere ait alt ve üst sınır değerleri

2.3.1.1. Kodlama Ve Başlangıç Popülasyonu

Probleme ait değişken sayısı her bir kromozoma ait gen (boyut) sayısını belirlemektedir (D). NP ise kullanıcı tarafından belirlenen kromozom sayısıdır. Her zaman üçten büyük olmalıdır. Çünkü FEA da yeni kromozomların üretilmesi için mevcut kromozom dışında üç adet kromozom gerekmektedir (*r1,2,3*). Başlangıçta NP adet D boyutlu kromozomdan meydana gelen başlangıç popülasyonu (P0) aşağıdaki gibi üretilir .

Başlangıç popülasyonu üretildikten sonra, aşağıda açıklanan operatörler Gmax sayısınca uygulanarak algoritma tamamlanır. Son jenerasyondaki en iyi birey çözüm vektörüdür.

2.3.1.2. Mutasyon

Mutasyon, mevcut kromozomun bir kısım genleri üzerinde, rasgele belirlenmiş miktarlarda değişiklikler yapmaktır. Bu değişiklikler sayesinde kromozomunun temsil ettiği çözüm noktası, çözüm uzayında hareket etmektedir. Mutasyonun hedefine ulaşabilmesi için, doğru yönde doğru miktarda hareketi sağlayacak değişikliklerin belirlenmesi gerekmektedir. Diferansiyel gelişim algoritmasında, mutasyon işlemine tabi tutulacak olan kromozom dışında ve birbirlerinden de farklı olan üç kromozom seçilir (*r1,2,3*). Seçilen kromozomlardan ilk ikisinin farkı alınır. Daha sonra bu fark kromozomu F parametresiyle çarpılır. F parametresi genellikle 0-2 arasında değerler almaktadır. Elde edilen ağırlıklandırılmış fark kromozomu seçilen üçüncü kromozom (*r3*) ile toplanır. Böylece mutasyon sonucu çaprazlamada kullanılacak olan kromozom elde edilmiş olur (*nj,i,G+1*).

2.3.1.3. Çaprazlama

Çaprazlama yapılırken, mutasyon sonucu elde edilen fark kromozomu ve *xi,G* kromozomu kullanılarak yeni jenerasyona aday, deneme kromozomu (*ui,G+1*) üretilir. Deneme kromozomuna ait her bir gen CR olasılıkla fark kromozomundan 1-CR olasılıkla mevcut kromozomdan seçilir. FEA' da kullanılan bu çaprazlama yöntemi, ikili GA' da kullanılan düzenli çaprazlamanın (uniform crossover), CR eklenmiş hali olarak da tanımlanabilir. Düzenli çaprazlamada her bir gen ayrı olarak değerlendirilip eşit olasılıkla iki ebeveyn kromozomundan birinden seçilmektedir. FEA' da ise esit olasılık yerine CR olasılığı söz konusudur. 0 ile 1 arasında üretilen rasgele sayı CR' den küçükse gen, *nj,i,*G+1' den aksi takdirde mevcut kromozomdan seçilir. Amaç belirlenen oranda genin yeni fark kromozomundan alınmasıdır. Buradaki $j = j$rand koşulu, en az bir tane genin üretilen yeni kromozomdan alınmasını garanti etmek amacıyla konulmuştur. Rasgele seçilen *j*rand noktasındaki gen CR' ye bakılmaksızın *nj,i,*G+1' den seçilir.

2.3.1.4. Uygunluk Fonksiyonu

Mutasyon ve çaprazlama operatörleri kullanılarak hedef kromozomla birlikte üç farklı kromozom kullanılarak yeni bir kromozom (deneme kromozomu) elde edilmiştir. Yeni jenerasyona (G=G+1) geçecek olan kromozomun belirlenmesinde kriter uygunluk değerleridir. Hedef kromozomun uygunluk değeri zaten bilinmektedir. Bu aşamada hesaplanacak olan *ui,G+1'* e ait uygunluk değeridir. Problemin amaç fonksiyonuna *ui,G+1'* e ait tüm *uj* değerleri girilerek kromozomun değeri hesaplanır.

2.3.1.5. Seçim

Seçim operatörü ile mevcut jenerasyon ve üretilen yeni kromozomlar değerlendirilerek yeni jenerasyon oluşturulur. Kromozomların yeni jenerasyonda yer alma olasılıkları uygunluklarına bağlıdır. FEA' da karsılaştırma birebir yapıldığından seçim için karmaşık prosedürü olan seçim operatörlerine ihtiyaç duyulmamaktadır. Karsılaştırılan kromozomlardan uygunluğu yüksek olan kromozom yeni jenerasyonun bireyi olarak atanmaktadır. Seçim operatörüne ait işlem Denklem (7)' de görülmektedir.

2.3.1.6. Algoritmanın durdurulması

Anlatılan operatörler kullanılarak yeni jenerasyonlar elde edilmektedir. Amaç sürekli daha iyi uygunluk değerine sahip kromozomlar elde etmek ve optimumu yakalamak ya da optimuma yaklaşmaktır. Bu döngü G=Gmax olana kadar devam ettirilmektedir. Algoritmanın durdurulması kriteri olarak, popülasyondaki en iyi ve en kötü uygunluk değerleri arasındaki farkın çok küçük bir rakama ulaşması olarak da belirlenebilmektedir [12].

2.4. Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO, Particle Swarm Optimization)

Biyolojik sistemlerden esinlenilerek ortaya çıkarılmış birçok yöntem hesaplama problemlerinin çözümünde kullanılmaktadır. Örneğin yapay sinir ağları insan beyninin basitleştirilmiş bir modelidir, genetik algoritma ise insan evriminden esinlenilerek ortaya çıkarılmıştır. Biyolojik sistemlerin başka bir çeşidi olan sosyal sistemler, özellikle bireyin çevresiyle ve diğer bireylerle olan etkileşimini ve kolektif (ortak) davranışlarını incelemektedir. Bu davranışlar sürü zekası olarak adlandırılmaktadırlar. Hesaplama alanında kullanılan ve sürülerden esinlenilerek ortaya konulan iki popular metot vardır. Bunlar "Karınca Koloni Optimizasyonu" (KKO) ve "Parçacık Sürü Optimizasyonu" (Particle Swarm Optimization (PSO)) dur. KKO, karıncaların davranışlarından esinlenilerek ortaya konmuş bir yöntemdir ve ayrık optimizasyon problemlerinde başarılı uygulamaları vardır [13]. PSO kavramı esasında sosyal yasamın basitleştirilmiş bir benzetimidir. Daha sonra bu benzetim bir optimizasyon yöntemi olarak kullanılmaya başlanmıştır. Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), 1995 yılında J.Kennedy ve R.C.Eberhart tarafından; kus sürülerinin davranışlarından esinlenilerek geliştirilmiş popülasyon tabanlı stokastik optimizasyon tekniğidir [14]. Özellikle doğrusal olmayan problemlerin çözümü için tasarlanmıştır. Çok parametreli ve çok değişkenli optimizasyon problemlerine çözüm bulmak için kullanılmaktadır. PSO, genetik algoritmalar gibi evrimsel hesaplama teknikleriyle bir çok benzerlik gösterir.

Sistem rasgele çözümler içeren bir popülasyonla başlatılır ve nesilleri güncelleyerek en optimum çözümü araştırır. PSO da parçacık olarak adlandırılan olası muhtemel çözümler, o andaki optimum parçacığı izleyerek problem uzayında dolaşırlar. PSO' nun klasik optimizasyon tekniklerinden en önemli farklılığı türev bilgisine ihtiyaç duymamasıdır. PSO' yu uygulamak, algoritmasında ayarlanması gereken parametre sayısının az olması sebebiyle oldukça basittir. PSO, fonksiyon optimizasyonu, bulanık kontrole dayalı sistemler, yapay sinir ağı eğitimi gibi bir çok alanda basarıyla uygulanabilmektedir [15,16,17].

2.4.1. Algoritmanın Temel İşleyişi

2.4.1.1. Parçacık Tanımı

PSO, hayvanlar arasındaki etkileşimden esinlenerek oluşturulmuş bir optimizasyon tekniğidir. Parçacık olarak adlandırılan bireyler arama uzayının en anlamlı bölgesine doğru hareket eder ve popülasyona rehberlik ederler. Algoritma araştırma uzayında parçacıkların arama davranışlarına göre iteratif bir teknik kullanır. Her iterasyonda algoritmanın çözüm adayları olan bireylerin hızları ve konumları (pozisyonları) güncellenir. Bu bireyler aşağıdaki gibi p vektörü olarak tanımlanır:

$$\vec{p}_i = (p_{i1}, p_{i2}, p_{i3}, \cdots, p_{iN}) \tag{2.1}$$

Her bir parçacık araştırma uzayında üç faktöre bağlı olarak hareket eder [18]. Bunlar,

- Konum (x_k^t, k anındaki i. parçacık)
- Hız (v_k^t)
- Uygunluk faktörü $f(x_k^t)$

dür.

Hız, araştırma yönüne benzer şekilde konumu günceller. Uygunluk faktörü ise popülasyondaki hangi parçacığın en uygun değere sahip olduğunu belirler ve her bir parçacığın zamana bağlı olarak en iyi konumunu belirler.

2.4.1.2. Başlangıç Popülasyonu

Başlangıç popülasyonu için popülasyon boyutu belirlenir (genellikle 15-30 aralığında). Parçacıklar araştırma uzayı boyunca rastgele dağıtılırlar ve konumları

$$x_0^{\,t} = x_{\min} + rand(x_{\max} - x_{\min}) \tag{2.2}$$

şeklinde belirlenir. Burada xmax, üst limit vektörü, xmin ise alt limit vektörüdür. Her bir parçacık için uygunluk değerinin üretilmesinde mevcut iterasyona kadar her bir parçacığın en iyi pozisyonu ($p^t=x^t_0$) ve tüm popülasyon içindeki en iyi konuma sahip olan parçacığın pozisyonu (p_0^t) dikkate alınır. Başlangıç hızı aşağıdaki gibi rasgele üretilir:

$$v_0^t = \frac{x_{\min} + rand(x_{\max} - x_{\min})}{\Delta t} = \frac{konum(pozisyon)}{zaman} \tag{2.3}$$

2.4.1.3. Hız Güncellemesi

Algoritmanın işleyişinde parçacıkların hızı bir sonraki adımda kullanılacak parçacıkları belirlemek amacıyla Eşitlik (2.4)' e göre güncellenir. Bu işlem araştırma yönünü belirler aynı zamanda deterministik ve olasılıksal parametreler içerir. Mevcut haraket, hafızada tutulan parçacık ve popülasyon etkisini birleştirir. Yeni hız vektörü

$$v_{k+1}^i = wv_k^i + c_1 rand(\frac{p_i - x_i}{\Delta t}) + c_2 rand(\frac{p_k{}^g - x_k{}^i}{\Delta t}) \tag{2.4}$$

ile belirlenir. Burada ilk terim mevcut hareketi, ikinci terim parçacık etkisini ve son terim ise sürü etkisini ifade eder. c1 ve c2 katsayıları değerleri [1.5-2.5] aralığında değişen katsayılardır ve w, eylemsizlik faktörü [0.4-1.4] dür.

2.4.1.4. Konum Güncellemesi

Konum hız vektörü kullanılarak Eşitlik 2.5 ile güncellenir. Durdurma kriteri ise belirli sayıda hareket için belirlenen toleranstan daha küçük olan en iyi uygunluktaki maksimum değişimdir. Durdurma kriteri, s hareket sayısını ifade edecek şekilde Eşitlik 2.6' da verilmiştir.

$$x_{k+1}^i = x_k^i + v_{k+1}^i \Delta t \tag{2.5}$$

$$\left| f\left(p_k^g\right) - f\left(p_{k-g}^g\right) \right| \le \varepsilon, g = 1,2,\ldots,s \tag{2.6}$$

Adım 1.Başlangıç popülasyonunu oluştur(p adet parçacık)
Adım 2. sonlandırma kriteri sağlanıncaya kadar

i den p ye kadar
2.1 p_i parçacığı ile sistemi çözümle
2.2 uygunluk (p^t) < uygunluk (x^t_0)ise $p_t = x^t_0$
2.3 uygunluk (p^t) < uygunluk (p^g_0)ise $p_t = p^g_0$
2.4 i. parçacığın hızını Eşitlik (2.3) ile hesapla
2.5 i. parçacığı Eşitlik (2.4) ile güncelle

Adım 3. Adım 2.' ye dön.

Şekil 2.7. PSO Algoritmasının Genel İşleyiş Yapısı

Şekil 2.7.' de algoritmanın temel işleyişi verilmiştir. Verilen algoritma işleyişinden anlaşılacağı üzere algoritma problemin çözümü için rasgele bir başlangıç parçacık popülasyonunun oluşumu ile başlar. Popülasyondaki her bir parçacığın belirlediği çözüm için aday parametrelerle sistem çözümü yapılır. Elde edilen çözümden problemin yapısına göre önceden belirlenen bir sınırlama ile parçacığın uygunluğu belirlenir. Bu işlem popülasyondaki tüm parçacıklar için tekrarlanır ve en iyi uygunluk değerine sahip olan parçacık küresel en iyi olarak belirlenir. İkinci iterasyon için yeni parçacık değerleri belirlenir. sonraki adımlarda her parçacık için yerel en iyi parçacık, önceki adımlardaki en iyi uygunluk değerini alan aynı indisli parçacık olarak belirlenirken, küresel en iyi parçacık ise o iterasyona kadarki tüm parçacıklar içinden en iyi uygunluk değerini veren parçacık olarak belirlenir ve bunlara göre güncellenir.

3. BÖLÜM

KONTROL SİSTEMLERİ

3.1. Giriş

Kontrol sistemi, diğer cihaz ya da sistemlerin işleyişini yönetmek, komuta etmek, yönlendirmek ya da düzenlemek amacıyla bir araya getirilmiş cihaz ya da cihazlar topluluğudur. Bir kontrol sistemi, belirli bir fonksiyonu sağlamak üzere bir arada çalışan birçok bileşenin karşılıklı bağlantısı olarak da ifade edilir [19].

Son yıllarda çağdaş uygarlığın ve teknolojinin gelişmesi ve ilerlemesi ile birlikte, kontrol sistemlerinin önemi gittikçe artmaya başlamıştır. Uygulamada, günlük etkinliklerimizin her yönü bu tür kontrol sistemleriyle etkilenmektedir.

Kontrol sistemleri üretilen ürünlerin kalite kontrolünde, otomatik montaj hatlarında, makine ve aletlerin kontrolünde, uzay teknolojilerinde, bilgisayarlı kontrol sistemlerinde, ulaşım güç sistemlerinde, robotik ve benzeri endüstri sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunun yanında sosyal ve ekonomik sistemlerin kontrolünde bile otomatik kontrol kuramı uygulanmaktadır.

Bir kontrol sistemi üç temel öğeye sahiptir:

1. kontrolün amaçları (kontrol sisteminin çıkışını etkilemek üzere sisteme uygulanan giriş değerleri)
2. kontrol sisteminin elemanları (sistemi oluşturan elektriksel, mekanik, hidrolik, pnomatik v.b. elemanlar topluluğu)
3. sonuçlar (kontrol edilmek istenen fiziksel büyüklüğe ait çıkış değerleri)

Bu üç öğenin birbiriyle bağlantısı Şekil 3.1' de gösterilmiştir. Amaçlar sürücü işaretler ile belirlenir, sonuçlar ise y çıkışları ya da kontrol edilen değişkenleri etkiler. Genel itibariyle bir kontrol sisteminin amacı, önceden belirlenmiş bir şekilde kontrol sistemi öğelerini ve girişleri kullanarak, çıkışları kontrol etmektir.



Şekil 3.1. Bir Kontrol Sisteminin Temel Öğeleri

3.2. Kontrol Sistemi Türleri

Kontrol sistemlerinin birçok varyasyona ve çeşitli kombinasyonlara sahip yaygın iki sınıfı vardır: *lojik ya da ardışık kontrol* ve *geribeslemeli ya da lineer kontrol* [20]. Bununla birlikte lineer kontrolün faydasıyla lojik tasarım kolaylığını birleştirmeye çalışan *fuzzy* (bulanık) *lojik kontrol* de mevcuttur [21].

Kullanım amacına bağlı olarak kontrol sistemleri farklı şekillerde sınıflandırılırlar. Sistem parametrelerine göre sınıflandırma, sistem çalışırken parametrelerin zamana bağlı olarak değişmesine bakılarak yapılır. Sistem parametreleri zamandan bağımsız ise o sisteme zamanla değişmeyen sistem denir.

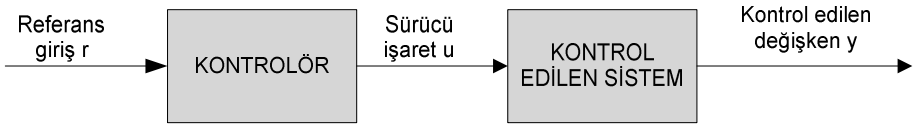
Kullanılan işaret türüne göre sistemler, sürekli verili ve ayrık verili olarak sınıflandırılırlar. Sürekli verili bir sistem, sistemin bütün itibariyle zaman değişkeni t' nin bir fonksiyonu olduğu sistemdir. Ayrık verili kontrol sistemi ise sistemin bir ya da birden çok bölgesinden işaretlerin bir darbe dizisi şeklinde alındığı ya da sayısal olarak kodlandığı türüdür.

Otomatik kontrol sistemleri, ait olduğu sistemi insan müdahalesi gerektirmeksizin arzu edilen değerlerde tutmayı amaçlayan sistemlerdir. Oda sıcaklığını, istenilen değerde sabit tutan klimalar, otomatik kontrol sistemlerine örnektir. Otomatik kontrol sistemleri mekanik prensiplere göre çalışabilecekleri gibi (örneğin araçlarda bulunan karbüratörler), programlanmış bir mikroişlemci tarafından da yönetilebilirler.

Denetim etkisine göre otomatik kontrol sistemleri ikiye ayrılır:

3.2.1. Açık Çevrimli Kontrol Sistemleri (Geribeslemesiz Sistemler)

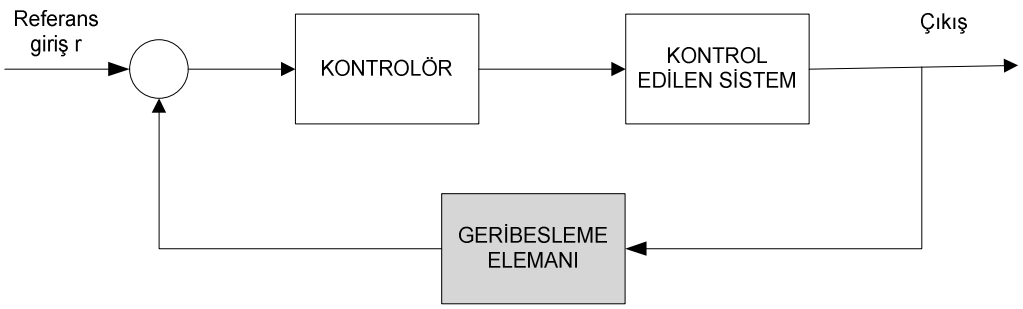
Açık çevrimli kontrol sistemi Şekil 3.2.' de görüldüğü gibi bir denetleyici ve denetlenen bir sistemden oluşur. *u* çıkışlı kontrol ediciye *r* komutu (giriş işareti de denilebilir) uygulanır. Bu sürücü işaret, denetlenen sistem çıkışındaki *y* işaretini daha önce tanımlanan şartlara göre etkiler. Basit olarak kontrolör, bir filtre, kuvvetlendirici, ya da başka bir kontrol elemanı olabilir ya da daha karmaşık durumlarda kontrolör bir mikroişlemci olabilir. Bu tür kontrol sistemlerine basit yapısı ve ekonomik oluşundan ötürü karmaşık olmayan birçok uygulamada rastlamak mümkündür.



Şekil 3.2. Açık Çevrimli Kontrol Sistemi Öğeleri

3.2.2. Kapalı Çevrimli Kontrol Sistemleri (Geribeslemeli Sistemler)

Bir veya birden fazla geribesleme yoluna sahip sistemler kapalı çevrimli sistem olarak adlandırılır. Açık çevrimli kontrol sistemlerinin adaptif kontrolü ve hatasız çalışabilmesi için, sistem çıkışından girişine bir bağlantı oluştularak geribesleme yapılması gerekmektedir. İstenilen kontrolü elde etmek için, kontrol edilen işaret *y,* geribeslenmeli ve referans işaret ile karşılaştırılarak yeni bir sürücü işaret hatayı gidermek amacıyla sisteme uygulanmalıdır. Bu sürücü işaret, giriş-çıkış işaretleri arasındaki fark ile orantılı olmalıdır. Şekil 3.3.' de kapalı çevrim bir sistem blok yapısı verilmiştir.



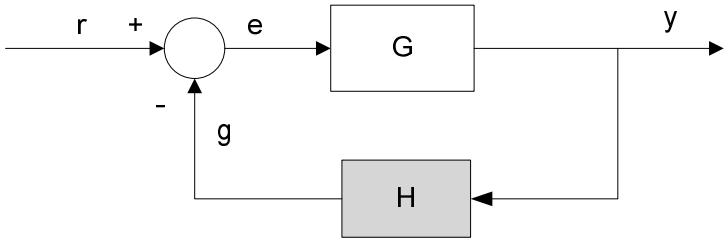
Şekil 3.3. Kapalı Çevrim Kontrol Sistemi

Geribesleme etkisi negatif ve pozitif geribesleme olmak üzere iki türlüdür. Pozitif geribeslemede çıkış giriş ile aynı yönde etki ederken, negatif geribeslemede bu etki ters yöndedir. Negatif geribesleme endüstriyel sistemlerde kullanılır ve daima hatayı minimum değerde tutmaya çalışır. Pozitif geribesleme iç döngülerle birlikte kullanılır.

3.3. Geribesleme ve Etkileri

Kontrol sistemlerinde geribesleme kullanmanın amacı oldukça karmaşıktır. Sistem hatasının azaltılması sorunu geribeslemenin bir sistem üzerindeki önemli etkilerinden sadece biridir. Oysa geribesleme, kararlılık, band genişliği, dış bozucular ve gürültüler, toplam kazanç ve duyarlılık gibi sistem davranış karakteristikleri üzerinde etkilidir [22].

Geribesleme kavramının bir kontrol sistemi üzerindeki etkisini anlayabilmek için bu kavramı geniş bir şekilde incelemek gerekir. Kontrol amacı ile kullanıldığında geribeslemenin varlığı kolayca fark edilir. Geribesleme neden ve etki ilişkilerinin bulunduğu yerlerde mevcuttur. Çünkü, ayrıca geribeslenmemiş olmasına rağmen, birçok fiziksel sistemin yapısında geribeslemenin varlığı görülür.



Şekil 3.4. Geribeslemeli Sistem

Şekil 3.4’ de gösterilen basit geribeslemeli sistemin yapısındaki r işareti giriş işaretini, y, çıkış işaretini ve e hata işaretini belirtirken g geribesleme işaretidir. G ve H parametreleri sabit kazançlardır. Bu haliyle sistem çıkışı Eşitlik 3.1 ile verilir:

$$\frac{y}{r} = \frac{G}{1+GH} \tag{3.1}$$

Geribeslemenin önemli bazı etkileri şunlardır:

3.3.1. Geribeslemenin toplam kazanç üzerine etkisi

Geribesleme, geribeslemesiz sistem kazancı G' yi (1+GH) ile etkiler. Dolayısıyla, G kazancını arttırır ya da azaltır. Şekil 3.4' deki sistem negatif geribeslemelidir ve geribesleme işareti eksi yönde uygulanmıştır.

3.3.2. Geribeslemenin kararlılık üzerine etkisi

Kararlılık bir sistemin giriş işaretini takip etme yeteneğidir. Başka bir ifadeyle, bir sistemde çıkışın kontrol edilememesine kararsızlık denir. Geribesleme ile kararlı bir sistem kararsız hala getirilebilir. Örneğin GH=-1 için, sonlu bir giriş için sistemin çıkışı sonsuz olur ve sistem kararsızdır. Bunun yanında geribeslemenin bir başka özelliği de kararsız bir sistemi kararlı hale getirebilmesidir. Dolayısıyla geribesleme kararlılığa katkıda bulunabilir, ya da ters yönde etkileyebilir.

3.3.3. Geribeslemenin duyarlılık üzerine etkisi

Duyarlılık konusu kontrol sistemlerinin tasarımında önem taşır. Çünkü bütün fiziksel elemanlar, çevre koşullarına ve kullanım süresine göre değişime uğrarlar ve bir kontrol sisteminin de ömrü boyunca tüm parametrelerinin sabit kalacağı genellikle düşünülemez. Genelde iyi bir kontrol sistemi parametre değişimlerine karşı duyarsız, ancak giriş komutlarına karşı duyarlı olmalıdır. Sistem kazancı M kabul edilirse, G' deki değişimlere karşılık M' nin duyarlılığı

$$S_G^M = \frac{\partial M}{\partial G} = \frac{1}{1+GH} \tag{3.2}$$

olarak ifade edilir. Eşitlik 3.2, M'deki yüzde değişimin G' deki yüzde değişime oranıdır ve aynı zamanda sistemin kararlı kalması koşuluyla, GH pozitif değerinin arttırılmasıyla duyarlılık fonksiyonunun genliğinin azaltılabileceğini göstermektedir. Yani geribesleme sistem duyarlılığını arttırabilir ve azaltabilir.

3.4. Geribeslemeli Kontrol Sistemleri

Kontrol sistemleri genellikle ana amaçları doğrultusunda sınıflandırılır. Genel olarak, kontrol sistemlerinin özel niteliklerine göre farklı şekillerde sınıflandırılırlar. Yaygın sınıflandırma yöntemlerinin bilinmesi ve sistemin analiz ve tasarımına başlanmadan önce amaca en uygun olanının belirlenmesi önemlidir.

3.4.1. Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Kontrol Sistemleri

Bu sınıflandırma analiz ve tasarım yöntemlerine göre yapılır. Doğrusal geribeslemeli kontrol sistemleri, sadece analiz ve tasarım basitliği nedeniyle oluşturulmuş bir model olmasına karşın fiziksel sistemler belirli bir ölçünün ötesinde doğrusal olmadığından uygulamada bu model gerçek değildir.

Kontrol sistemleri tasarlanırken, sistem doğrusal kabul edilerek öncelikle doğrusal sistem modeline dayanan bir çözüm geliştirilir. Tasarlanan denetleyici değerlendirilirken doğrusal olmayan sistem modeli uygulanır veya benzetim yapılarak yeniden tasarlanır.

3.4.2. Zamanla Değişen ve Zamanla Değişmeyen Sistemler

Bir kontrol sisteminin parametreleri, sistem çalışırken zamana bağlı olarak değişiyor ise o sistem zamanla değişen sistemdir. Fiziksel sistemler çoğunlukla bu şekilde değeri değişen elemanlara sahiptir.

Sürekli verili bir sistem, sistemin farklı işaretlerinin tamamı sürekli bir *t* zaman değişkeninin fonksiyonu olan sistemdir. Bu sistem doğru akım (da) ve alternatif akım (aa) şeklinde iki sınıfa ayrılır. Ayrık verili kontrol sistemlerinin sürekli verili kontrol sistemlerinden farkı, sistemin bir ya da birçok noktasında işaretlerin bir darbe dizisi ya da sayısal kodlanmış biçimde ele alınmasıdır. Bu tür kontrol sistemleri *örneklenmiş verili* ya da *sayısal kontrol sistemleri* olarak adlandırılır.

3.5. Kontrol Sistemlerinin Tasarımı

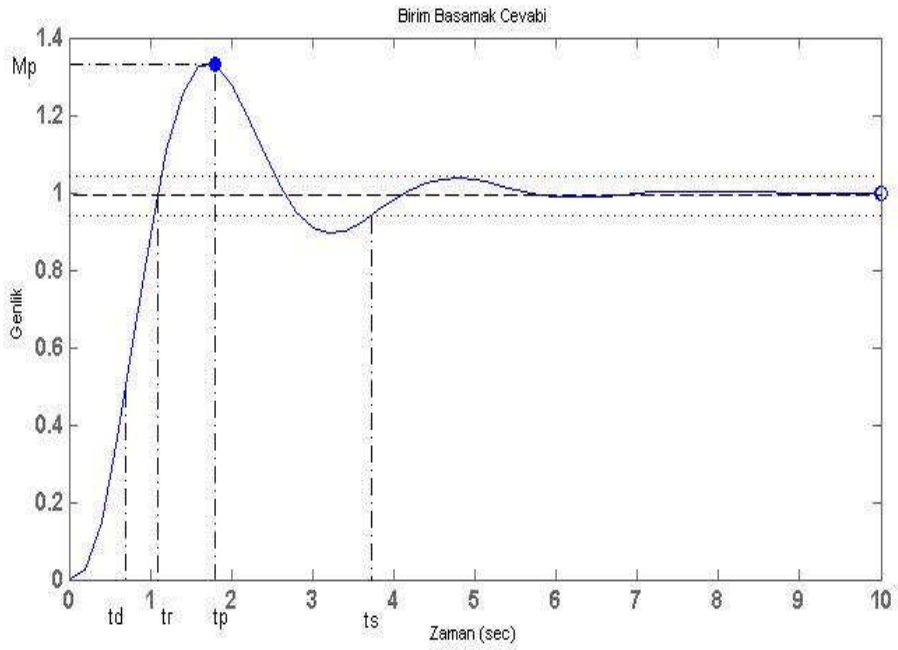
Giriş işareti kontrol değişkeni ve çıkış işareti kontrol edilen büyüklük olan bir sistem ele alınarak kontrol sistem tasarımı üç adımda belirlenir:

- Tasarım koşulları (Sistemin ne yapması gerektiğinin belirlenmesi)
- Denetleyici yapısının kontrol edilen sisteme nasıl bağlanacağının belirlenmesi
- Kontrol parametrelerinin istenilen hedeflere göre belirlenmesi

3.5.1. Tasarım Koşulları

Tasarım kriterleri genellikle sistemin ne yaptığını değerlendirmek ve ne yapması gerektiğini belirlemek amacıyla kullanılır. Bu kriterler uygulamaya göre değişir ve genel itibariyle kararlılık, kararlı durum hatası, geçici durum cevabı, frekans cevabı ile ilgili kısımlardan oluşur. Doğrusal kontrol sistemlerinin tasarımı zaman ya da frekans bölgesinde gerçekleşebilir. Örneğin kararlı durum hatası, birim basamak, rampa ya da parabolik giriş için tanımlanabilir. Zaman bölgesinde bazı kriterler kolaylıkla değerlendirilir. Bunlar, maksimum aşma, yükselme zamanı, oturma zamanı gibi birim basamak giriş için tanımlanan kriterlerdir ve zaman tanım bölgesi tasarımlarında kullanılmaktadır. Bunun dışında kazanç payı, faz payı gibi büyüklükler de frekans tanım bölgesi kriterleridir. Bunlar ise bode diyagramı, kutupsal yer eğrisi, genlik faz eğrisi ile birlikte kullanılmalıdır ve kararlılığın ölçütleridir.

Şekil 3.5’ de bir kontrol sistemine ait birim basamak cevabı verilmiş ve sistemin geçici durum zaman bölgesi cevabı ile ilgili kriterleri gösterilmiştir. Bu kriterler tasarlanan denetleyicinin uygunluğunun belirlenmesinde önem taşıyan geçici durum parametreleridir.



Şekil 3.5. Birim Basamak Girişe Karşılık Denetleyici Cevabı

Gecikme zamanı, t_d: Dinamik sistem cevabının nihai değerinin yarısına ilk kez geldiği noktaya ulaşması için geçen süredir.

Yükselme zamanı, tr: Sistem cevabının nihai değerinin %10-%90' ı, %5-%95' i arasında geçen süredir. Matematiksel olarak Eşitlik 3.3 ile ifade edilir:

$$t_r = \frac{\pi - \arctan\left(\dfrac{\sqrt{1-\zeta^2}}{-\zeta}\right)}{w_d} \tag{3.3}$$

Tepe zamanı, t_p: sistem cevabının nihai değeri aşarak ilk kez bir maksimum noktaya ulaşması için geçen süredir. w_d sönümlü doğal frekansı, w_n doğal frekansı ve ζ sönümlenme oranını gösterdiğinde tepe zamanı Eşitlik 3.4 ile verilir:

$$t_p = \frac{\pi}{w_d} = \frac{\pi}{w_n\sqrt{1-\zeta^2}} \tag{3.4}$$

Maksimum aşma, M_p: Dinamik sistem cevabının referans noktasına olan maksimum aşma değeridir. Bu parametre sistemin kararlılığında etkilidir. Aşma miktarı Eşitlik 3.5 ile ifade edilir:

$$M_p = e^{-\zeta\pi/\sqrt{1-\zeta^2}} \tag{3.5}$$

Oturma (yerleşme) zamanı, t_s: Oturma zamanı, sistem cevabında salınımların izin verilir aralıklarda olması yani belirli bir bandın içine ilk kez girmesi için geçen süredir. Bu aralık değeri genellikle nihai değerin %2 veya %5'lik aşma değeri olarak belirlenir. ζ ' ye bağlı olarak ts' in pay'ı 3.91 ile 4.74 arasında sabit bir değerdir. %2 ts, Eşitlik 3.6' daki gibi ifade edilirken %5 ts için ifadenin pay'ı 3 olmaktadır.

$$t_s = \frac{4}{\zeta w_n} \tag{3.6}$$

Frekans cevabı incelemesinde, ele alınan sistemin sinüzoidal bir giriş işareti için kararlı durum cevabı incelenir, giriş sinyalinin frekansındaki değişime karşılık sistem cevabı gözlemlenir.

Bir işaretin sinüzoidal transfer fonksiyonu işaretin genlik ve faz açıları ile frekans parametreleri kullanılarak tanımlanır. Sinüzoidal transfer fonksiyonlarının incelenmesinde yaygın olarak kullanılan iki farklı yöntem mevcuttur [23]. Bunlar, Bode diyagramı ve Nyquist diyagramıdır.

3.5.1.1. Bode Diyagramları

Bode diyagramı, açık çevrim transfer fonksiyonu L(jω)=G(jω)H(jω)' nın genliğinin desibel cinsinden ve fazının da derece cinsinden grafiksel olarak gösterimidir. Bu grafiklere bakılarak kapalı çevrimli sistemin kararlılığı belirlenebilir. Bode diyagramı için kararlılığın iki şartı vardır:

- genlik kazanç eğrisinin 0dB' i kestiği frekans değeri (w_g, genlik geçiş frekansı) için faz eğrisi (-180°) derecenin üstünde (0° ile 180°) olmalıdır. Bu durumda faz payı pozitif olacaktır.

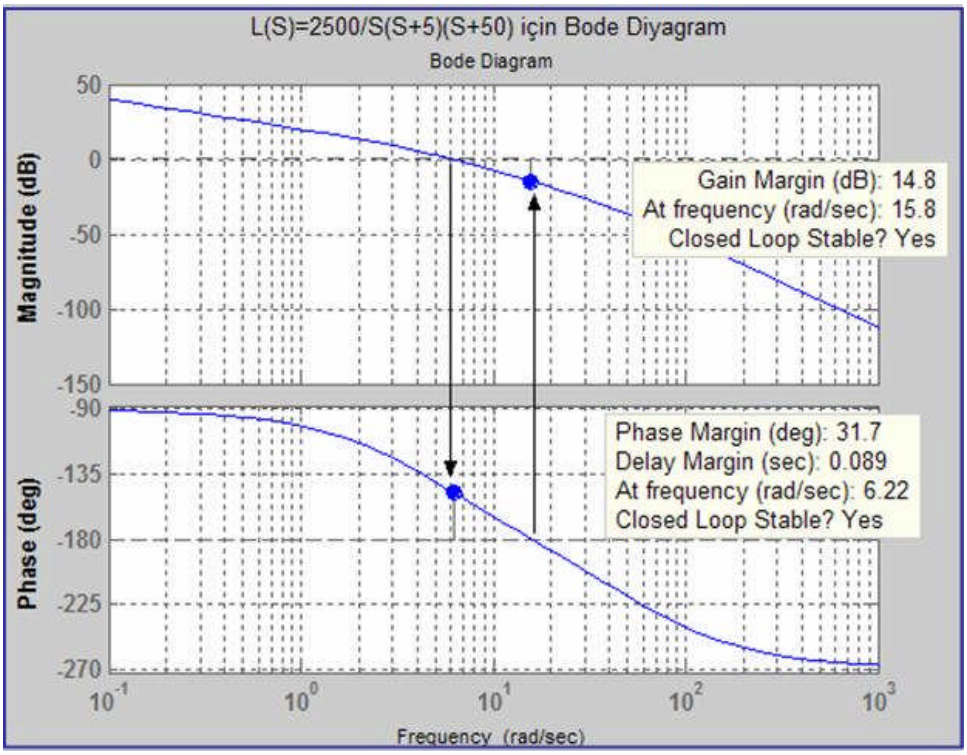
  faz payı=(w_g'deki faz kayması)-(-180°)

- Faz eğrisinin -180°'' yi kestiği frekans değeri (w_p, faz geçiş frekansı) için genlik eğrisi 0dB' nin altında kalmalıdır. Bu durumda kazanç payı pozitif olacaktır.

  kazanç payı=(0dB)-(w_p' deki kazanç)

$$L(s) = \frac{2500}{s(s+5)(s+50)} \tag{3.7}$$

Transfer foksiyonu Eşitlik 3.7 ile verilen *L(s)* sistemi için bode diyagramı genlik ve frekans eğrisi Şekil 3.6' da gösterilmektedir.



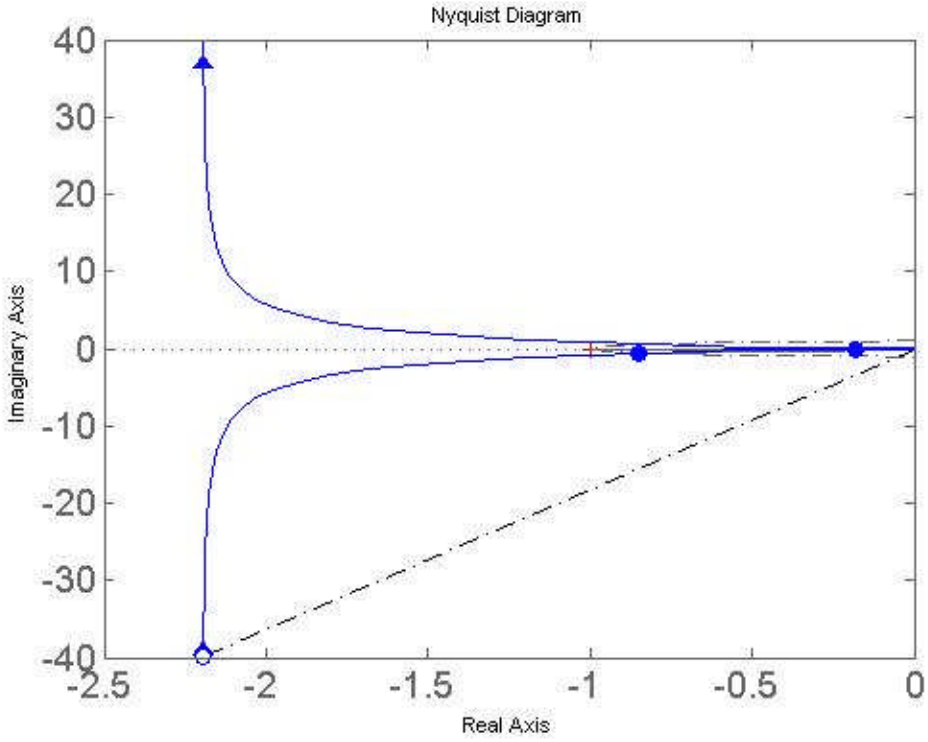
Şekil 3.6. G(s)' e Ait Bode Diyagramı

Kararlılık şartlarını sağlaması ve kazanç payı ile faz payının sıfır olması nedeniyle *L(s)* kararlı bir sistemdir.

3.5.1.2. Nyquist Kriteri

Nyquist kriteri, açık çevrimli sistemin Nyquist eğrisine göre, kapalı çevrimli sistemin s düzleminin sağ yarısında sıfır ve kutupları arasındaki farkı veren yarı grafiksel bir metottur. Açık çevrim transfer fonksiyonunun nyquist yer eğrisi, ω frekans değeri 0 ile ∞ arasında değişirken reel ve imajiner eksenlerde gösterimidir. Nyquist eğrisinde eğrinin (-1±jw) kritik noktası özel bir önem taşır. Kararlı bir sistemde Nyquist eğrisinin negatif reel ekseni kesme noktası bu kritik noktanın sağında kalmalıdır. *L(s)* sistemi için

Nyquist eğrisi Şekil 3.7’ de görülmektedir. Şekilden de açıkça görüldüğü gibi sistem kararlılık şartını sağlamaktadır.



Şekil 3.7. G(s) e Ait Nyquist Diyagramı

Kontrol sistemlerinin tasarımında ve analizinde Nyquist kriterinin bazı özellikleri bu yaklaşımı çekici kılar [19]:

1. Nyquist kriteri sistemin mutlak kararlılığı, kararlı sistemin göreli kararlılığı ve kararsız sistemin kararsızlığı konusunda bilgi sağlar. Sistem kararlılığının nasıl düzeltilebileceği konusunda bilgi verir.
2. G(s)H(s) Nyquist yer eğrisi ile frekans tanım bölgesi karakteristikleri hakkında bilgi edinilir.
3. G(s)H(s) Nyquist yer eğrisi özellikle bilgisayar yardımıyla çok kolay oluşturulabilir.
4. Nyquist yer eğrileri ile kök yer eğrileri güçlükle işlenebilen ölü zamanlı sistemler kolaylıkla değerlendirilebilir.

3.5.1.3. Performans Kriterleri

Kontrol sistemlerinin ölçümünün ve matematiksel modellenmesinin öneminin artışıyla otomatik kontrol kavramı gelişmiştir. Modern kontrol teorisine göre sistem mühendisleri, istenilen sistem performansını nitelik olarak belirtebilirler. Bu nedenle sistem performansının gelişimi için kullanılacak performans indisleri hesaplanabilir ve ölçülebilir. Kullanılan bazı performans indisleri ISE (integral of the square of the error), IAE (integral of absolute magnitude of error) ve ITAE (integral of time multiplied by absolute error) dir [24].

$$ISE = \int_0^t e^2(t)\,dt \tag{3.8}$$

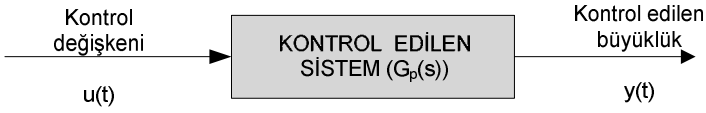
ISE hata değeri sistemin zaman cevabının geçici durumda çalışması halinde oluşan hatalarının (e(t)) kareleri toplamı ile ifade edilir. Bu Eşitlik 3.8' deki gibi yazılır.

$$IAE = \int_0^t |e(t)|dt \tag{3.9}$$

IAE ise sistemin zaman cevabının geçici durumda çalışması halinde oluşan hata değerlerinin toplamı ile ifade edilir. IAE hata değeri Eşitlik 3.9 ile hesaplanmaktadır.

3.5.2. Denetleyici Yapıları

Kontrol edilen doğrusal bir sitem Şekil 3.6' da gösterildiği gibidir. Kontrolün amacı y(t) ile verilen sistem çıkışının istenilen şartları sağlamasını gerçeklemek için bir tasarım uygulamaktır. Yani u(t) kontrol işaretini, tasarım amaçlarını sağlayacak şekilde belirli bir zaman aralığında belirlemektir. Bunun için çeşitli bağlantılarda denetleyici tasarımları mevcuttur. Bunlardan bazıları seri (kaskat) bağlantı, geribeslemeli bağlantı, durum geribeslemeli bağlantı, seri-geribeslemeli bağlantı, ileri beslemeli bağlantıdır [25].



Şekil 3.6. Kontrol Edilen Sistem

3.5.3. Tasarımın Temel İlkeleri

Denetleyici yapısı belirlendikten sonra tasarım koşullarını sağlayan bir denetleyici türü eleman değerleriyle birlikte tespit edilir. Bir denetleyici seçildikten sonra ikinci işlem denetleyici parametre değerlerini belirlemektir. Bu parametreler denetleyiciyi oluşturan transfer fonksiyonuna ait katsayılardır. Dikkat edilmesi gereken husus, parametrelerin her birinin tasarım koşullarını ve sistem davranışını nasıl etkilediğini belirlemektir. Örneğin bir parametre değeri aşım miktarını sağlarken, diğer parametre yükselme zamanı koşulunu sağlayıp aşım miktarını sağlamayabilir. Dolayısıyla bu parametrelerin seçimi oldukça büyük önem taşımaktadır.

3.6. Temel Denetim Organları

Endüstriyel kontrol sistemlerinde genellikle üç farklı denetim etkisi söz konusudur. Bunlar:

- Orantı denetim etkisi (P)
- İntegral denetim etkisi (I)
- Türev denetim etkisi (D)

dir. Bu etkilerin bir arada kullanılmasıyla PD, PI ve PID tipi denetim organları gerçeklenir. Kontrol bloğunun ya da organının görevi, ölçme elemanı üzerinden geri beslenen çıkış büyüklüğünü referans giriş büyüklüğü ile karşılaştırmak ve ortaya çıkabilecek hata değerinin yapısına ve kendi denetim etkisine bağlı olarak uygun bir denetim işareti üretmektir. Bunlar içerisinde PID (Proportional-Integral-Derivative) (Orantı- İntegral- Türev) tipi denetleyiciler yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunun üç ana nedeni vardır:

- geçmişteki çok sayıdaki başarılı uygulamaları
- geniş uygulama alanı
- uygulama ve kullanım kolaylığı

3.6.1. Üç Terimli Kontrol

PID tipi kontrol, üç terimli kontrol (three term control) olarak da isimlendirilir. PID tipi kontrolörde üç terimin varlığı sözkonudur:

- Orantı tipi (P tipi) (proportional) kontrol
- İntegral tipi (I tipi) (integral) kontrol
- Türev tipi (D tipi) (derivative) kontrol

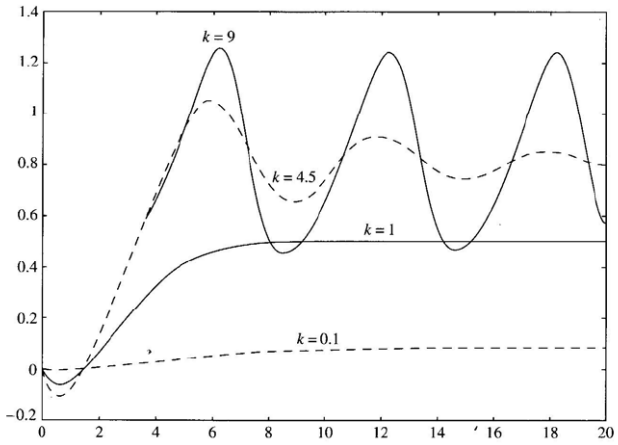
3.6.1.1. Orantı (P) Tipi Kontrol

Bir orantısal kontrol biriminin transfer fonksiyonu basitçe k_p gibi bir kazançtır. Eğer kontrol biriminin girişi e(t) ise, çıkışı $u(t)=k_p.E(s)$ 'dir. Kontrol organının girişi olan hata (e(t)), k_p sabit değeri ile çarpılarak uc(t) kontrol sinyali elde edilir. k_p terimi sistem hızını ayarlamada kullanılır. k_p değeri arttıkça sistemin cevap hızı da artar. Ancak k_p' deki artış kalıcı durum hatasını olumsuz yönde etkiler.

Lineer olmayan bazı sistemler için, sadece orantısal kontrol birimleri kullanarak iyi kontrol sistemleri elde etmek mümkün olabilir.

$$G(s) = \frac{-s+1}{(5s+1)(s+1)} \tag{3.8}$$

Eşitlik 3.8' deki transfer fonksiyonuna sahip birim geribeslemeli bir sistem ele alındığında, k_p=0.1, 1, 4.5, 9 değerleri için sistemin birim basamak cevapları Şekil 3.7'deki gibi elde edilir. Burada birim basamak referans girişleri için, kararlı-durum sistem çıkışlarının farklı k_p ler için farklı olduğu görülmektedir.



Şekil 3.7. Birim Basamak Cevapları

k_p arttıkça, cevabın daha da hızlandığı ancak daha osilasyonlu olduğu görülmektedir. k_p 9'dan küçük ise cevap bir sabite yaklaşacak ve sistem kararlı olacaktır. Eğer k_p 9'dan büyük ise, cevap aşırı osilasyonlu olacak ve sistem kararsız hale gelecektir. Birim basamak cevabı bir sabite yakınsamayan, kararsız olarak tanımlanan ve lineer olmayan (nonlinear) bir sistem düşünülürse, sistemin kararsız hale geldiği en küçük k_p, *nihai kazanç* (ultimate gain) olarak adlandırılır.

3.6.1.2. İntegral (I) Tipi Kontrol

Orantı etkide ortaya çıkan kalıcı durum hatasını gidermenin yolu, denetim organına hatanın integrali ile orantılı bir denetim etkisi ilave etmektir. Kontrol sistemi için gerek duyulan doğruluğu arttırmak yani hatayı azaltmak için kullanılır. Denetim organına bir integral alıcı ilavesi, hata sıfır olana kadar değişimi sürdüren bir denetim etkisi sağlar. Uygulamalarda integral etki daha çok orantı etki ile birlikte kullanılır.

Eğer k_i kazançlı bir integral kontrol biriminin girişi e(t) ise, çıkışı

$$u(t) = k_i \int_0^t e(\tau) d\tau \tag{3.9}$$

ya da

$$U(s) = k_i E(s) / s \tag{3.10}$$

dir. Böylece integral denetleyicinin transfer fonksiyonu k_i / s dir.

3.6.1.3. Türev (D) Tipi Kontrol

Bu kontrol tipi, hatanın zamana göre türevi ile orantılı bir çıkış etkisi üretir. Sistem cevabındaki sönüm etkisini arttırmak için kullanılır. Sürekli durum hatası üzerinde doğrudan bir etkisi yoktur. Bu nedenle denetim organlarında yalnız başına kullanılmaz.

Eğer k_d türev sabitli bir türev kontrol biriminin girişi e(t) ise, çıkışı $k_d\, de(t)/dt$'dir ya da Laplace domeninde, $k_d\, sE(s)$'dir. O nedenle, türev kontrol biriminin transfer fonksiyonu $k_d s$'dir. Bu bir birleşik transfer fonksiyonudur ve uygulaması zordur. Pratikte şu şekilde oluşturulur:

$$D = \frac{k_d s}{1 + \frac{k_d s}{N}} \tag{3.11}$$

Burada 3'den 10'a kadar olan N değer aralığı üretici tarafından kararlaştırılır ve eğitici faktör olarak adlandırılır. Bu eğitici faktör kontrol biriminin yapımını kolaylaştırır. Ayrıca yüksek frekans kazancını sınırlandırır; bu nedenle yüksek frekans gürültüsü aşırı kuvvetlenmeyecektir. Genellikle düşük frekanslı olan kontrol işaretleri için Eşitlik 3.11'deki transfer fonksiyonu yaklaşık $k_d s$ olabilmektedir.

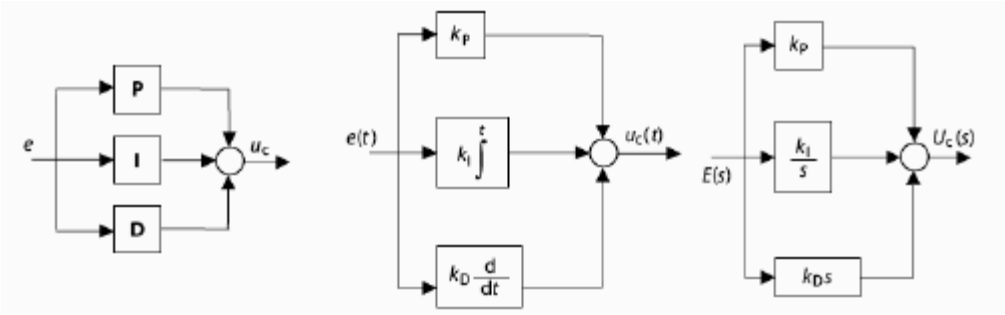
Tablo 3.1' de denetleyici parametrelerinin artışına bağlı olarak geçici durum parametrelerindeki değişim verilmektedir [26].

Tablo 3.1 k_p, k_i ve k_d'nin Geçici Durum Parametrelerine Etkisi

Artan parametre	**yükselme zamanı, t_r**	**aşma M_p**	**oturma zamanı t_o**	**kararlı durum hatası, ess**
k_p	azalır	Artar	etkilenmez	azalır
k_i	azalır	Artar	artar	*yok edilir*
k_d	etkilenmez	Azalır	azalır	etkilenmez

3.6.1.4. PID Tipi Kontrol

Orantısal, integral ve türev denetleyicilerinin kombinasyonu bir PID denetleyici olarak adlandırılmaktadır. Üç temel denetim etkisinin (P, I, ve D) birleşiminden oluşur. PID denetim etkisi ile bir taraftan sürekli durum hatası elimine edilirken diğer taraftan da sistemin geçici durum davranışı iyileştirilmiş olur.



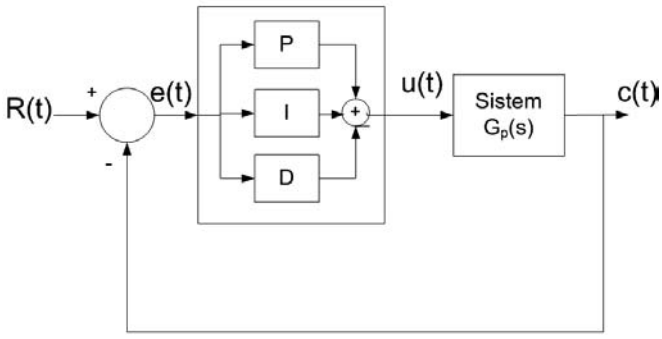
Şekil 3.8. PID Denetleyici Modülünün Paralel Yapısı

PID denetleyicin iç yapısı Şekil 3.8' deki gibidir ve transfer fonksiyonu Eşitlik 3.12' deki gibidir.

$$PID = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s = k_p\left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right) \tag{3.12}$$

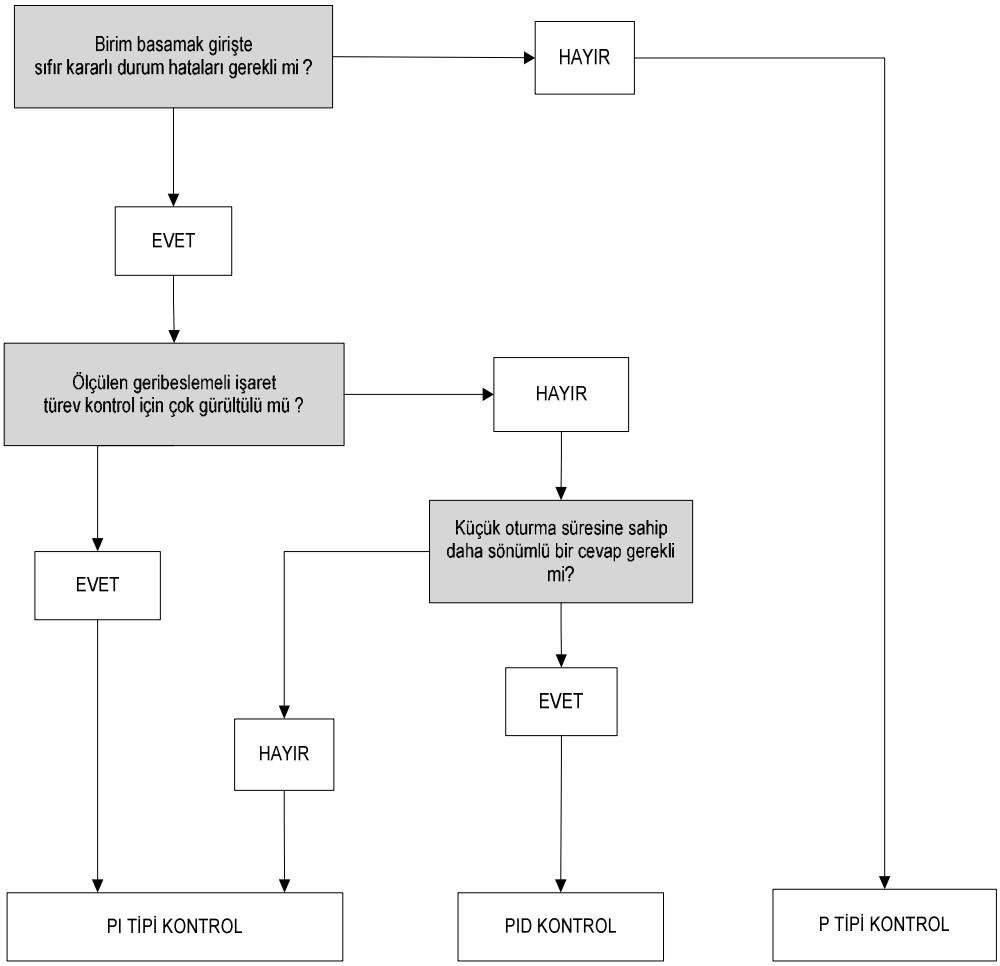
Burada *Ti, integral zaman sabiti* ve *Td, türev zaman sabiti* olarak adlandırılmaktadır. PID denetleyici için u(t) denetim sinyali sürekli zamanda Eşitlik 3.13' deki gibi yazılır:

$$u(t) = K_p[e(t) + \frac{1}{T_i}\int_0^t e(t)dt + Td\,\frac{e(t)}{dt}] \tag{3.13}$$



Şekil 3.9. PID Denetleyicili Kontrol Sistemi

PID denetleyicili bir kontrol sistemi Şekil 3.9' daki gibi tasarlanabilir. Bu şekilde r(t), referans giriş işareti; u(t), denetleyici çıkışı; c(t), sistem çıkışı ve e(t), hata işaretidir. Bu hata işareti, referans giriş ile sistem çıkış işareti arasındaki fark değeri elde edilerek bulunmaktadır. Gp(s) ise denetlenen sistem ya da süreç anlamında kullanılmıştır.



Şekil 3.10. PID Terimi Seçme Diyagramı

Kontrol mühendisinin, sürekli kararlı durum süreç offset hatalarını yok etmek üzere integral işlemini seçtiği ve aynı zamanda kapalı-çevrim sistem cevabını da hızlandırmak istediği düşünülürse, Şekil 3.10' dan, k_p' nin artmasının sadece bu etkiyi sağladığı, dolayısıyla (P) ve (I) işlemlerinin her ikisinin birden seçilmesi gerektiği, yani PI tipi denetleyici çözümün gerektiği görülmektedir [27].

Örnek 3.1.

$G_p(s) = \dfrac{10}{s(s+2)}$ şeklinde bir sistemin derecesi bir PID denetleyici kullanılarak 3' e çıkarılacaktır. Birim geribeslemeli sisteme ait kapalı döngü kutupların (-10) ve $(-2 \pm j2)$' de bulunması istenmektedir. Buna göre denetleyici için temel parametreleri (k_p, k_i, k_d) bulunuz.

$$T(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{(k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s).G_p(s)}{1 + (k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s).G_p(s)}$$
$$= \frac{10(k_d s^2 + k_p s + k_i)}{s^3 + (10k_d + 2)s^2 + 10k_p s + 10k_i}$$

İstenilen karakteristik denklem $(s+10)(s^2 + 4s + 8)$ olduğundan,

$$s^3 + (10k_d + 2)s^2 + 10k_p s + 10k_i = (s+10)(s^2 + 4s + 8)$$
$$= s^3 + 14s^2 + 48s + 80$$

Eşitliğinden,

k_p=4.8, k_i=8, k_d=1.2 olarak bulunur.

Görüldüğü gibi PID denetim organı sistemin transfer fonksiyonunun derecesini 1 arttırır. Sisteme PID eklenerek transfer fonksiyonu kutuplarının istenilen yerlere yerleştirilmesi ve dinamik davranışın etkilenmesi mümkündür.

3.6.2. PID Parametrelerinin Ayarlanması

Bilindiği gibi, PID denetim etkisi altındaki sistemlerde istenilen amaca uygun olan güvenilir bir denetim sağlayabilmek için, denetleyici yapısındaki üç adet parametrenin dikkatlice belirlenmesi gerekir. Bunlar, orantı kazanç sabiti (k_p), integral kazanç sabiti (k_i) ve türev kazanç sabiti (k_d)'dir. Bu parametrelerin uygun şekilde elde edilebilmesi

amacıyla ortaya konulan çok sayıda çalışma mevcuttur. İyi bilinen yaklaşımlar arasında Ziegler-Nichols (Z-N) metodu, Cohen-Coon metodu, hata değerlerinin toplamını esas alan minimum ISE ve IAE yöntemleri bulunmaktadır [28].

Kontrol sistemlerinde kullanılan denetleyicilerin iyi sonuç verecek şekilde ayarlanması, önemli bir kontrol problemidir. PID denetleyici parametrelerinin ayarlanmasında geleneksel PID ayarlama tekniklerinin yanı sıra yapay zekâya dayalı yaklaşımlar da sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yaklaşımlar arasında özellikle genetik algoritmaların (GA) ve bulanık mantığa dayalı yöntemlerin ön plana çıktığı görülmektedir [29].

3.6.2.1. Ziegler-Nichols Metodu

Yöntemin esası, başlangıçta integral ve türev etkilerini devre dışı bırakıp, kontrol organının sadece orantı etki ile deneye tabii tutulmasına dayanır. Yöntemde,

- Başlangıçta $T_i=\infty$ ve $T_d=0$ kabulü yapılır.
- Kapalı döngü sisteme birim basamak giriş uygulanır.
- Sistem cevabı c(t) sürekli sinüsoidal titreşim yapan bir eğri haline erişene kadar orantı kazancı k_p arttırılır.
- Bu duruma karşılık gelen orantı kazancına k_{pmax} ve titreşim periyoduna ise To denir.

k_{pmax} değeri, sistemin kararsızlık durumuna erişmeden önce ulaşabileceği en yüksek değerdir. Ziegler-Nichols'un sürekli titreşim yöntemine göre denetleyici parametreleri Tablo 3.2' ye göre hesaplanır [30].

Tablo 3.2 Ziegler-Nichols İçin PID Parametreleri

Kontrol Tipi	k_p	T_i	T_d
P	0,5 k_{pmax}	-	-
PI	0,45 k_{pmax}	0,825 To	-
PID	0,6 k_{pmax}	0,5 To	0,125 To

Örnek 3.2

$G_p(s) = \dfrac{64}{s^3 + 14s^2 + 56s + 64}$ transfer fonksiyonuna sahip olan bir sistem bir PID denetleyici kullanılarak denetlenecektir. PID' nin parametrelerini Ziegler-Nichols yöntemini kullanarak bulunuz.

Denetleyici için, $G_c(s) = k_p$ kabul edilerek kapalı döngü sistemin transfer fonksiyonu yazılır:

$$T(s) = \frac{64k_p}{s^3 + 14s^2 + 56s + 64(1 + k_p)}$$

Karakteristik denklem için Routh tablosu oluşturulur:

s3	1	56	0
s2	14	$64(1+k_p)$	0
s1	$(14.56-64(1+ k_p))/14$	0	0
s	$64(1+ k_p)$	0	0

$\dfrac{14.56 - 64(1 + k_p)}{14} = 0$ eşitliğinden k_{pmax}=11.25 bulunur. T_o değerini bulmak için yine karakteristik denklemde s→jw dönüşümü yapılır, reel bileşen sıfıra eşitlenir.

$$s \to jw \Rightarrow (jw)^3 + 14(jw)^2 + 56(jw) + 784 = 0,\ j^2 = -1$$
$$(784 - 14w^2) + j(56w - w^3) = 0$$
$$784 - 14w^2 = 0 \Rightarrow w = \pm 7.48 rad/s$$
$$To = 2\pi / w = 6.28 / 7.48 = 0.839$$

bulunur. Tablo 3.2' den yararlanarak aşağıdaki değerler elde edilir.

Kontrol Tipi	k_p	T_i	T_d
P	0,5 k_{pmax}=5,63	-	-
PI	0,45 k_{pmax}=5,06	0,825 T_o=0,697	-
PID	0,6 k_{pmax}=6,75	0,5 T_o=0,420	0,125 T_o=0,105

4. BÖLÜM

YAPAY ZEKA YÖNTEMLERİ KULLANILARAK PID DENETLEYİCİ PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

4.1. Giriş

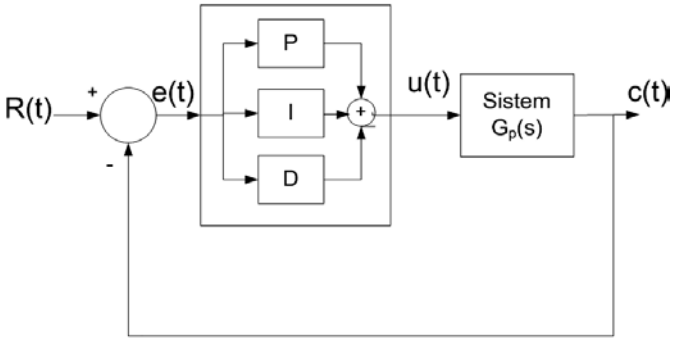
Modern kontrol tekniklerinin son birkaç on yıldır gördüğü büyük ilgiye rağmen, PID denetleyiciler birçok endüstriyel kontrol sistemlerinde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Geçmişteki çok sayıdaki başarılı uygulamaları, geniş uygulama alanı ve uygulama ve kullanım kolaylığı sayesinde PID denetleyiciler kontrol mühendisleri tarafından her zaman ayrı ve özel bir konumda tutulmuştur.

PID denetim etkisi altındaki sistemlerde istenilen amaca uygun olan güvenilir bir denetim sağlayabilmek için, denetleyici yapısındaki üç adet parametrenin dikkatlice belirlenmesi gerekir. Bunlar, orantı kazanç sabiti (Kp), integral kazanç sabiti (Ki) ve türev kazanç sabiti (Kd)' dir. Bu parametrelerin uygun şekilde elde edilebilmesi amacıyla ortaya konulan çok sayıda çalışma mevcuttur. Bir başka önemli husus ise denetleyici parametrelerini belirlemede geçen sürenin mümkün olduğunca kısa tutulmasıdır. Bu amaçla geliştirilmiş çok sayıda klasik yöntem mevcuttur. Bu yöntemler zorlu matematiksel işlemlere ihtiyaç duymalarının yanı sıra zorlu kontrol sistemlerinin tasarımında etkin sonuç vermemekte ya da istenilen sonuca ulaşmada aşırı zaman almaktadır. Bu nedenlerle yeni tekniklerin kullanımı artmıştır. Özellikle yapay zekaya yönelik çalışmalar ve yapay sinir ağları kullanımı hızla artmıştır.

İyi bilinen yaklaşımlar arasında Ziegler-Nichols (Z-N) Metodu [30], Cohen-Coon Metodu [31], hata değerlerinin toplamını esas alan minimum ISE ve IAE yöntemleri [32, 33], dahili modele dayalı yaklaşım (internal model control, IMC) [34] ile kazanç-faz paylarını dikkate alan metot [35] sayılabilmektedir. PID denetleyicilerin ayarlanması için, Ziegler ve Nichols tarafından, verilen bir sistemin geçici durum karakteristikleri dikkate alınarak bir takım kurallar geliştirilmiştir [30]. Zhuang ve Atherton, optimum

PID denetleyicilerin otomatik olarak ayarlanması için uygun bir performans kriterinin minimize edilmesine dayalı bir parametre ayarlama yaklaşımı sunmuşlardır [32]. İstenilen kazanç ve faz payı özelliklerinin karşılanması için PID denetleyici parametrelerinin ayarlanmasına yönelik bir takım temel formüller Ho ve arkadaşları tarafından ortaya konulmuştur [35]. Wang ve arkadaşları, PID denetleyici tasarımı için model indirgeme metoduna dayanan bir yaklaşım açıklamışlardır [36]. Denetleyici parametrelerinin optimizasyonu için modele bağlı olmayan bir teknik Lequin ve arkadaşları tarafından verilmiştir [37]. Liu ve Daley, endüstriyel kontrol sistemleri için birçok PID denetleyici tasarım planı ortaya koymuşlardır [38].

PID denetleyici parametrelerinin ayarlanmasında geleneksel PID ayarlama tekniklerinin yanı sıra yapay zekaya dayalı yaklaşımlar da sıklıkla kullanılmaktadır [39-46,54]. Bu yaklaşımlar arasında özellikle genetik algoritmaların (GA) ve bulanık mantığa dayalı yöntemlerin ön plana çıktığı görülmektedir. Bu çalışmaların bir kısmında, süreç denetimlerinde kullanılan PID denetleyici parametreleri bulanık kurallara bağlı olarak elde edilir. Kurallara ait tanımlayıcı değerlerin en uygun şekilde elde edilmesi görevi ise aralarında GA' ların da bulunduğu çok sayıda farklı algoritma tarafından yerine getirilir. Chen ve Huang, yüksek duyarlılıkta konumlandırma tablosu için gerçek kodlu genetik algoritma kullanarak PID tasarımı gerçekleştirmiştir [47]. Shen örnek aldığı kontrol sistemlerinde PID tasarımı gerçekleştirmek için genetik algoritma kullanmıştır[48]. Başka bir çalışmasında ise Shen kontrol parametrelerini belirlemede bulanık sinir ağları kullanmıştır [49]. Karaboğa ve Kalınlı PID tasarımı için tabu araştırma algoritmasına dayalı bir yaklaşım önermişlerdir [50]. Dandil ve arkadaşları lineer ve lineer olmayan farklı sistemler için genetik algoritma ile PID denetleyici tasarımları geliştirmişlerdir ve önerdikleri GA-PID referans model ile karmaşık tasarım yöntemlerine gerek duymadan etkin sonuçlar alınacağını göstermişlerdir [51]. Bunların dışında PID ayarlamasına yönelik yapay zekaya ve bulanık mantığa dayalı pek çok çalışma mevcuttur [55-57].



Şekil 4.1. PID Denetimli Kontrol Sistemi

PID denetleyici kullanılan basitleştirilmiş bir kontrol sisteminin blok diyagramı Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Bu şekilde r(t), referans giriş işareti; u(t), denetleyici çıkışı; c(t), sistem çıkışı ve e(t), hata işaretidir. Bu hata işareti, referans giriş ile sistem çıkış işareti arasındaki fark değeri elde edilerek bulunmaktadır. $G_p(s)$ ise denetlenen sistem ya da süreç anlamında kullanılmıştır. Bu bilgiler ışığında, bir PID denetleyici için u(t) denetim sinyalinin sürekli zamanda aşağıdaki gibi yazılması mümkündür [20, 52]:

$$u(t) = K_p[e(t) + \frac{1}{T_i}\int_0^t e(t)dt + Td\,\frac{e(t)}{dt}] \tag{4.1}$$

Aynı denetleyiciye ait transfer fonksiyonu bağıntısı S domeninde aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\begin{aligned} G_{pid}(s) &= \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \\ &= K_p(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s) \end{aligned} \tag{4.2}$$

Eşitlik 4.1 ve 4.2'de kullanılan T_i, integral zaman sabiti ve T_d, türev zaman sabiti'dir.

Genel anlamda, istenilen denetim koşullarının elde edilmesi amacına yönelik olarak sistemde kullanılan PID denetleyicinin parametrelerinin belirlenmesi işlemi, PID-ayarlama (PID tuning) olarak bilinir [52]. Yapılan bu ayarlamanın olabildiğince hızlı ve dikkatli yapılması denetim sistemlerinin tasarımında özel bir önem taşımaktadır. Sistem

tasarımı esnasında kullanılan yaklaşımın ve yararlanılan algoritmanın seçimi aşaması da bu önemin kapsamını içeren faktörler arasındadır.

Bu çalışmada amaç, kontrol edilen sisteme uygun giriş sağlayacak PID denetleyiciye ait orantı, integral ve türev kazanç sabitlerinin (sırasıyla Kp, Ki ve Kd) en uygun biçimde belirlenmesidir. Bu amaçla, literatürde yer alan ve transfer fonksiyonları Eşitlik (4.3 - 4.5) de verilen üç farklı süreç dikkate alınmıştır [53].

$$G_1(s) = \frac{e^{-0.5s}}{(s+1)^2} \tag{4.3}$$

$$G_2(s) = \frac{4.228}{(s+0.5)(s^2+1.64s+8.456)} \tag{4.4}$$

$$G_3(s) = \frac{27}{(s+1)(s+3)^3} \tag{4.5}$$

Transfer fonksiyonu Eşitlik 4.3 ile verilen sistem gecikmeli bir sistemdir. Gecikmeli sistemler tanımlanırken *pade yaklaşımı* [19] kullanılır.

Transfer fonksiyonları polinomların oranı olarak ifade edilmeyen ya da giriş işaretine belirli bir zaman geçmeden yanıt vermeyen sistemler ölü zamanlı sistemlerdir. Bilgisayarlar da sayısal işlemleri yerine getirmede belirli bir zamana ihtiyaç duyarlar ve bilgisayar kontrollü sistemlerde de ölü zaman bulunur. Bu tür sistemleri işlemek rasyonel transfer fonksiyonuna sahip sistemleri işlemekten daha zordur. Çünkü kararlılık kriteri sağlamada birçok yöntem rasyonel fonksiyonlar için geçerlidir [19].

Ölü zamanlı sistemleri ($e^{-T_d s}$ transfer fonksiyonuna sahip sistemler) rasyonel fonksiyonlara yaklaşık ifade etmenin birçok yolu vardır. Bunlardan biri üstel fonksiyonu Maclaurin serisine açmaktır:

$$e^{-T_d s} \cong 1 - T_d s + \frac{T_d^2 s^2}{2} \tag{4.6}$$

$$e^{-T_d s} \cong \frac{1}{1+T_d s+T_d^2 s^2/2} \tag{4.7}$$

Eşitlik 4.6 ve Eşitlik 4.7' de verilen açılımlarda serinin üç terimi kullanılmıştır. Bu yaklaşım büyük genlikli T_ds' ler için geçerli değildir.

Pade açılımının kullanılması halinde daha iyi bir yaklaşım elde edilir. İki terimli yaklaşım Eşitlik 4.8' deki gibidir.

$$e^{-T_d s} \cong \frac{1-T_d s/2}{1+T_d s/2} \tag{4.8}$$

Bu transfer fonksiyonunun s düzleminin sağ yarısında bir sıfırı bulunmaktadır. Bu nedenle sistem yanıtında t=0 civarında küçük bir negatif alt aşım görülebilir.

Pade yaklaşımının $e^{Td \cdot s}$ için MATLAB dilinde yazılımı Şekil 4.2' deki gibidir.

```
% pade yaklaşımı

[num, den] = pade(Td,N)
pade (Td,N)

sysx = pade (sys,N)
sysx = pade (sys,N1,…,Nm)
```

Şekil 4.2. Pade Yaklaşımı

Burada N, oluşturulacak yeni ifadenin derecesidir(Td<4 için N=1,diğer hallerde N=2 almak uygundur).
Bu gösterimden yararlanılarak exp(-0.5s) için,

[num,den]=pade(0.5,1);

kullanıldığında

num=[-1 4]; den=[1 4];

bulunur. Yani "exp(-0.5s)=(-s+4)/(s+4)" olacaktır. Dolayısıyla sistem transfer fonksiyonu G ve H gibi iki farklı biçimde ifade edilir:

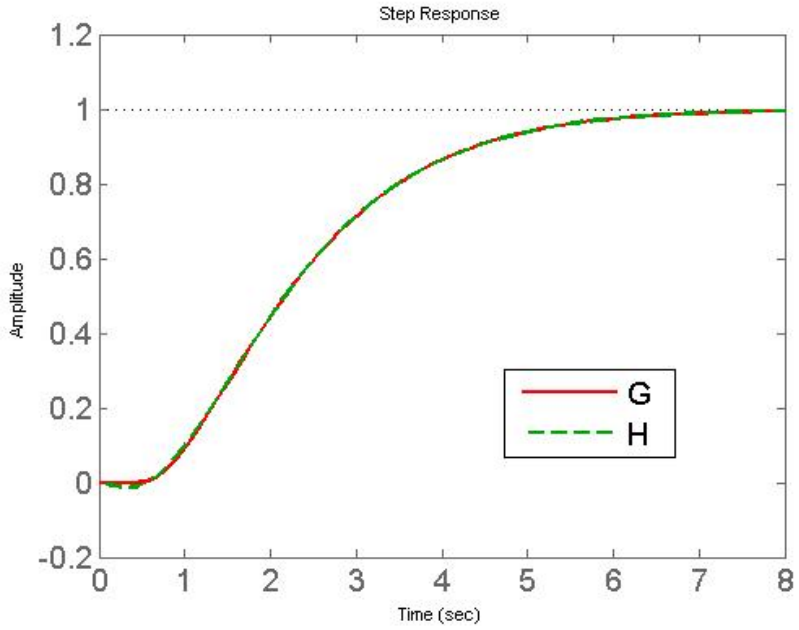
G=tf([1],[1 2 1],'inputdelay',0.5);

H=tf([-1 4],[1 6 9 4]);

Pade yaklaşımı kullanılarak,

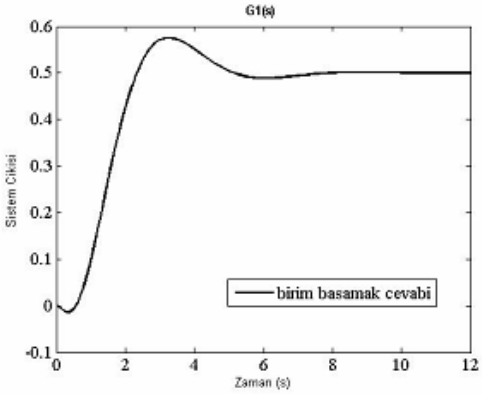
step(G,'r'); hold on; step(H,'g'); grid;

komutu ile sistem cevabı çizdirilirse, gecikmeli sistemin tanımlanmasında G ve H ifadelerinin her ikisinin de kullanımının doğru olduğu Şekil 4.3' ten görülebilir. Sistem çıkışı her iki tanım içinde aynı değişimi göstermektedir.

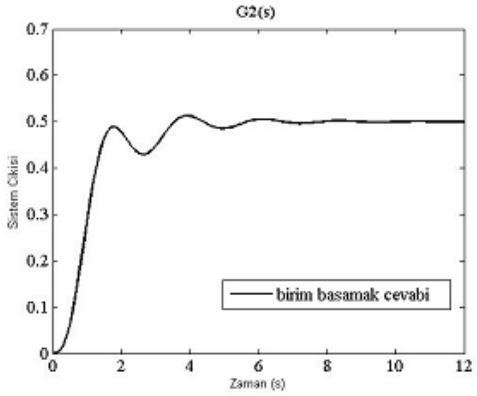


Şekil 4.3. Gecikmeli Bir Sistem İçin Pade Yaklaşımı

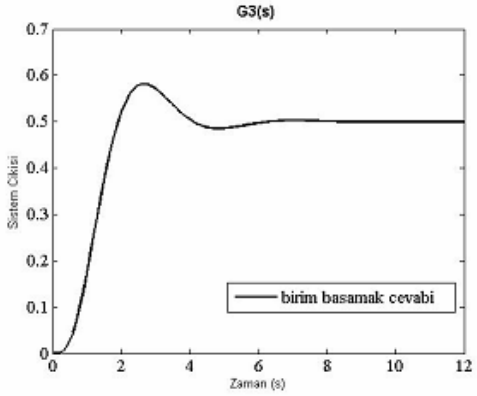
Bu çalışmada kullanılan ve transfer fonksiyonları Eşitlik 4.3-4.5 ile verilen süreçlere ait birim basamak cevapları Şekil 4.4' de verilmiştir. G1 sistemi gecikmeli bir sistemdir. Sistem cevabı zaman ekseninde 0.5' lik bir gecikme ile başlamaktadır. G2 üçüncü dereceden bir sistem ve G3 dördüncü dereceden bir sistemdir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.4 . Birim Basamak Girişe Karşılık Kullanılan Sistemlerin Cevapları

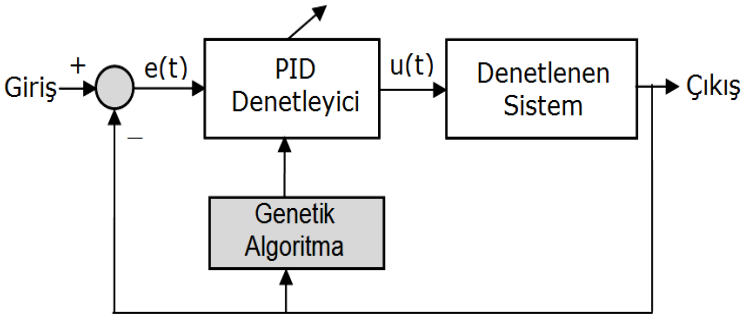
(a) G1 Sisteminin Cevabı
(b) G2 Sisteminin Cevabı
(c) G3 Sisteminin Cevabı

Bu çalışmada, PID ayarlama için farklı yapay zeka optimizasyon yöntemleri kullanılmıştır. Genetik algoritma (GA) , Gerçek kodlu genetik algoritma (GGA), Farksal Evrim Algoritması (FEA) ve Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) literatürde bulunan üç farklı süreç (sistem) in denetlenmesi için uygulanan denetleyiciler üzerinde denenmiş ve performansları tartışılmıştır.

4.2. Genetik Algoritma Kullanılarak PID parametrelerinin bulunması

PID denetleyici parametrelerinin ayarlanması için ikili kodlu ve gerçek kodlu genetik algoritma yapıları kullanılmıştır. Yapılan incelemede, Şekil 4.5' de görüldüğü gibi, PID denetimi altındaki sisteme ait birim basamak girişe karşılık sürekli zaman cevapları dikkate alınmıştır.

Genetik Algoritmanın temel kontrol parametreleri popülasyon büyüklüğü, maksimum jenerasyon sayısı, çaprazlama oranı ve mutasyon oranıdır. Popülasyon büyüklüğü için belirlenen değer algoritmanın performansı üzerinde doğrudan etkilidir.



Şekil 4.5. PID Parametrelerinin GA İle Elde Edilmesi

Transfer fonksiyonları yukarıda verilen farklı derecelerdeki bu süreçler için denetleyici ayarlaması belirlenen uygunluk fonksiyonu (değerlendirme fonksiyonu)' na göre araştırılmıştır. Kullanılan algoritmalara ait kontrol parametre değerleri Tablo 4.1 ve Tablo 4.2' de verilmiştir.

Tablo 4.1 GA Kontrol Parametre Değerleri

Popülasyon büyüklüğü	50
Çaprazlama oranı	0.8
Mutasyon oranı	0.2
Jenerasyon sayısı	100
Seçim operatörü	Rulet tekerleği
Değişken sayısı Her değişken için bit sayısı	3 (K_p, K_i, K_d) 8
Değişken sınırları	$K_p \in [0,5]$ $K_i \in [0,5]$ $K_d \in [0,5]$

Tablo 4.2 GGA Kontrol Parametre Değerleri

Popülasyon büyüklüğü	50
Çaprazlama oranı	0.9
Mutasyon oranı	0.4
Jenerasyon sayısı	30
Seçim operatörü	Rulet tekerleği
Değişken sayısı	3 (K_p ,K_i, K_d)
Değişken sınırları	$K_p \in [0,5]$ $K_i \in [0,5]$ $K_d \in [0,5]$

Tablolarda verilen değerler, algoritmalar için aynı popülasyon büyüklüğüne karşılık farklı çaprazlama ve mutasyon oranlarını ve jenerasyon sayılarını içermektedir. Bunun nedeni, süreçlere ve algoritmalara ilişkin olarak yapılan çok sayıdaki deneme ve çalışmaların arasından burada sadece elde edilen en iyi değerlerin ve bu değerlere ait algoritma parametrelerinin verilmesindendir.

Cevap eğrilerinden elde edilen yerleşme süresi (ts) ve aşım miktarı (OS) gibi değerlerden, temel performans göstergeleri olarak yararlanılmıştır. Algoritmaların etkinliği, bu göstergeler kullanılarak oluşturulan bir değerlendirme fonksiyonu yardımıyla ortaya konulmuştur. Bu fonksiyon Eşitlik 4.8'de verilmiştir.

$$F = (A \times ISE) + (B \times ts) + (C \times |(OS)|) \tag{4.8}$$

Eşitlik 4.8' de verilen A, B ve C nümerik değerlerdir. Bu katsayılar belirlenirken minimize edilmesi istenen parametre göz önüne alınır. Bu çalışmada hata değeri ISE nin minimize edilmesine çalışılmış ve A katsayısı 10 seçilmiştir. B ve C ise sırasıyla 3 ve 1 alınmıştır. Değerlendirme fonksiyonunun algoritmanın işleyişinde kullanılması ile en küçük F değerine karşılık geri beslemeli sistemin birim basamak girişe karşı tepkisi incelenmiş ve grafiksel olarak sunulmuştur.

Her iki algoritma için tamamen aynı parametre değerleri kullanılarak yapılan çalışmalarda GGA ile ulaşılan sonuçlar diğerine göre özellikle aşım değerleri açısından biraz daha iyi ve tatmin edicidir. Yapılan çalışmada elde edilen parametre değerleri ve

PID denetimli sistemlere ait birim basamak cevaplarına ait performans göstergeleri Tablo 4.3' de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Tabloda koyu renkli görülen değerler GA ve GGA' nın birbirlerine göre daha iyi olan değerlerini belirtmektedir.

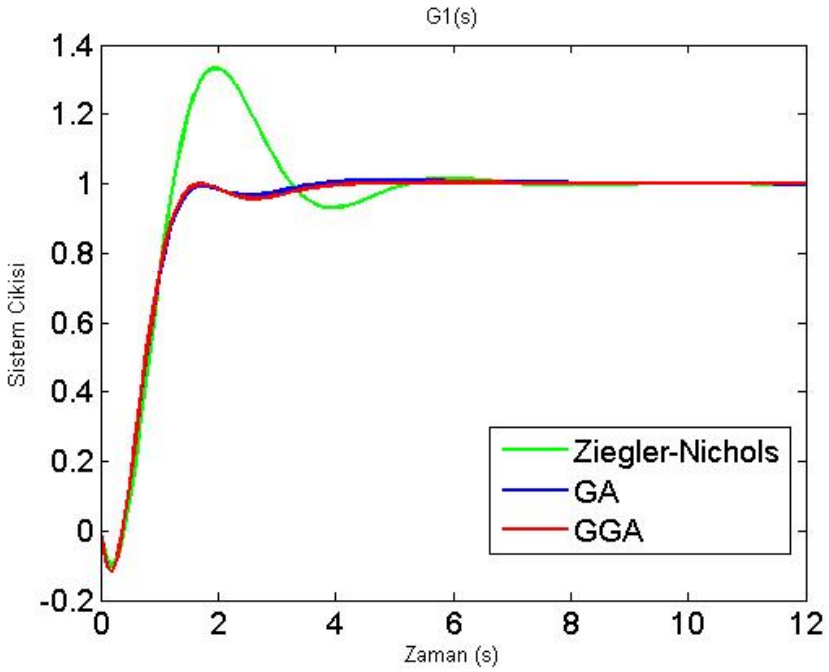
Tablo 4.3 Farklı Yöntemler Kullanılarak Elde Edilen En Küçük F Değerlerine Karşılık PID Parametreleri

sistem	parametre	Z-N [46]	Kitamori [46]	Fuzzy-PID [46]	GA	GGA
G1	**kp**	2,808	2,212	-	2,313	2,377
	ki	1,712	1,085		1,148	1,115
	kd	1,151	1,148		1,498	1,506
	ISE	0,871	0,805	0,772	**0,727**	0,725
	IAE	1,37	1,04	-	0,926	**0,916**
	ts	4,16	2,370	3,090	1,339	**1,325**
	Mp(%)	32	6,80	6,00	0,90	**0,30**
	F	-	-	-	12,165	**11,480**
G2	**kp**	2,190	çözüm yok	-	2,585	2,720
	ki	2,120			1,304	2,261
	kd	0,565			2,468	2,430
	ISE	0,526		0,533	0,401	**0,400**
	IAE	0,99		1,01	0,948	**0,927**
	ts	5,45		5,010	**3,365**	3,395
	Mp(%)	17		6,10	2,600	**2,000**
	F	-		-	16,706	**16,197**
G3	**kp**	3,072	2,357	-	2,080	2,275
	ki	2,272	1,429		1,226	1,462
	kd	1,038	0,975		1,109	1,343
	ISE	0,628	0,596	0,537	0,585	**0,350**
	IAE	1,13	0,833	0,811	0,846	**0,791**
	ts	3,722	2,300	2,632	1,378	**1,178**
	Mp(%)	32,8	10,900	1,9	**0,700**	2,700
	F	-	-	-	**10,637**	11,618

Tablo 4.3' deki değerlerden, ikili ya da gerçek kodlu genetik algoritma ile elde edilen ISE değerlerinin her üç süreç için de birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Genel olarak, GA ve GGA ile bulunan ISE değerlerinin verilen diğer üç yönteme göre daha iyi olduğunu söylemek de yanlış olmayacaktır. Genetik algoritmaların sistem performanslarına sağladığı olumlu katkı özellikle ts ve OS (overshoot) ve Mp (maksimum aşma) değerlerinden açıkça görülmektedir. GA ve GGA ile elde edilen ts ve OS göstergeleri tüm süreçlerde verilen üç yönteme göre daha iyidir. Algoritmaların

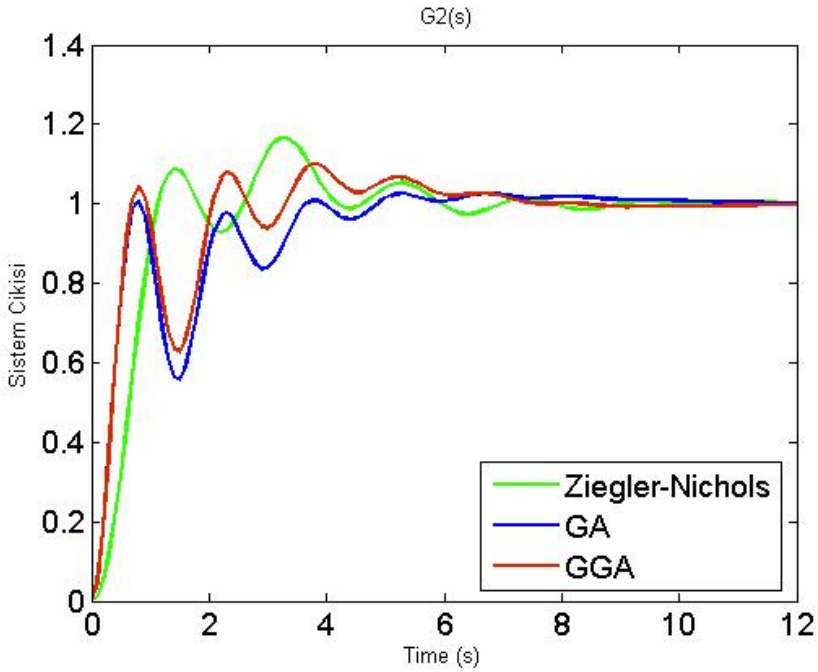
sistem davranışına sağladığı iyileştirme etkisini tablodaki aşım miktarlarından çok daha çarpıcı şekilde gözlemek mümkündür. Sistem cevaplarının oturma süreleri bakımından değerlendirildiğinde ise, GA ve GGA ile sistemde en az %30'luk bir iyileştirme gerçekleştirildiği de ortadadır.

GA ve GGA performansları birbirleri ile karşılaştırıldığında, elde edilen sonuçlar GGA' yı biraz daha öne çıkarmaktadır. Problemin tanımlanmasında ve uygulanmasında kullanıcıya sağladığı kolaylık ve sonuçlara hızlı şekilde ulaşabilmesi gibi unsurlar da düşünüldüğünde GGA' nın yapılan çalışma açısından daha verimli olduğu söylenebilmektedir.



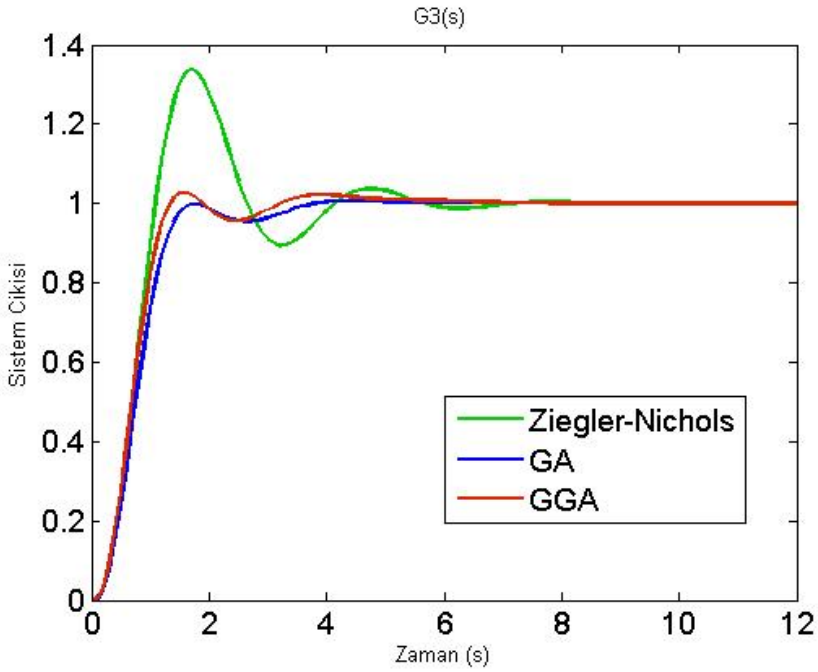
Şekil 4.6. G1 İçin Birim Basamak Cevapları

Bu karşılaştırmanın daha iyi yapılabilmesi açısından GA ve GGA için üç sürece ait basamak giriş cevabı eğrileri Şekil 4.6–4.8' de verilmiştir. Ziegler-Nichols yöntemi ile GA ve GGA algoritmalarından alınan sonuçlar eş zamanlı olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.7. G2 İçin Birim Basamak Cevapları

Grafiklerden de görüldüğü gibi referans noktasına göre maksimum aşma GA ve GGA için oldukça düşük ve tatmin edicidir. Şekillere dikkat edildiğinde, GGA ile sağlanan geçici cevabın, biraz daha hızlı ve daha az salınımlı olmasından dolayı daha tercih edilebilir bir yaklaşım olacağı görülmektedir.



Şekil 4.8. G3 İçin Birim Basamak Cevapları

4.3. Farksal Evrim Algoritması Kullanarak PID Parametrelerinin Bulunması

Bir önceki çalışmada kullanılan üç farklı sistem için (G1, G2, G3) PID tanımlama işlemi, bu kez de denetleyiciye farksal evrim algoritması uygulanarak yapılmıştır. Kullanılan algoritmanın kontrol parametre değerleri Tablo 4.4' te verildiği gibidir. Farksal evrim algoritmasında binominal çaprazlama yapılarak ve ölçekleme faktörü 0.8 alınarak çok sayıda iterasyon yapılmış, K_p, K_i, ve K_d değerleri elde edilmeye çalışılmıştır.

Tablo 4.4 FEA Kontrol Parametre Değerleri

Popülasyon büyüklüğü	30
Çaprazlama oranı	0.6
Çaprazlama tipi	Binominal(iki terimli)
İterasyon sayısı	100
Ölçekleme faktörü (F)	0.8
Değişken sayısı	3 (K_p, K_i, K_d)
Değişken sınırları	$K_p \in [0,10]$ $K_i \in [0,10]$ $K_d \in [0,10]$

Optimizasyon işlemi yapılırken değerlendirme fonksiyonu olarak ISE ve Eşitlik 4.9 ile verilen F fonksiyonları ayrı ayrı ele alınmıştır. İterasyon sayısı başlangıçta 30, daha sonra 50 ve en son 100 seçilmiş, minimum hata elde edilinceye kadar simülasyon tekrarlanmıştır. Simülasyon sonuçları Tablo 4.5' de sunulmuştur. Elde edilen en küçük hata değerlerini üreten PID parametreleri kullanılarak sistemlerin birim basamak cevapları çizdirilmiş ve elde edilen çıkış eğrileri Şekil 4.6-4.8' de verilmiştir.

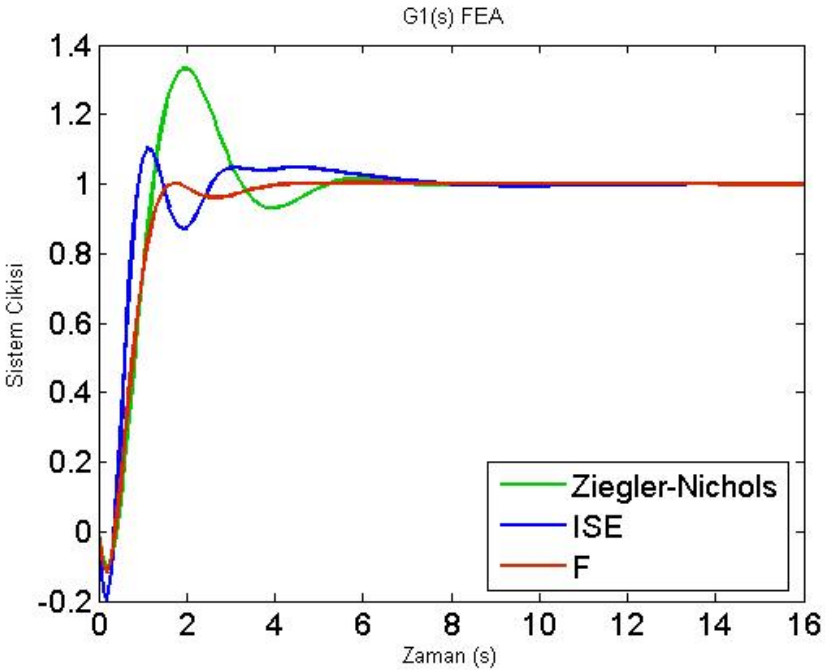
$$F=10 * ISE + 3 * ts + Mp \tag{4.9}$$

Tablo 4.5' de G1, G2 ve G3 süreçlerine ait geçici durum parametreleri farklı yöntemler için verilmiştir. Literatürde bulunan bu süreçlerin Ziegler-Nichols yöntemine göre değerlendirilmesi, bu çalışmada ele alınan ISE hata değeri ve F fonksiyonunun verdiği sonuçlar ile karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Tablo 4.5 G1, G2, G3 Sistemleri İçin FEA Kullanılarak Elde Edilen Parametreler

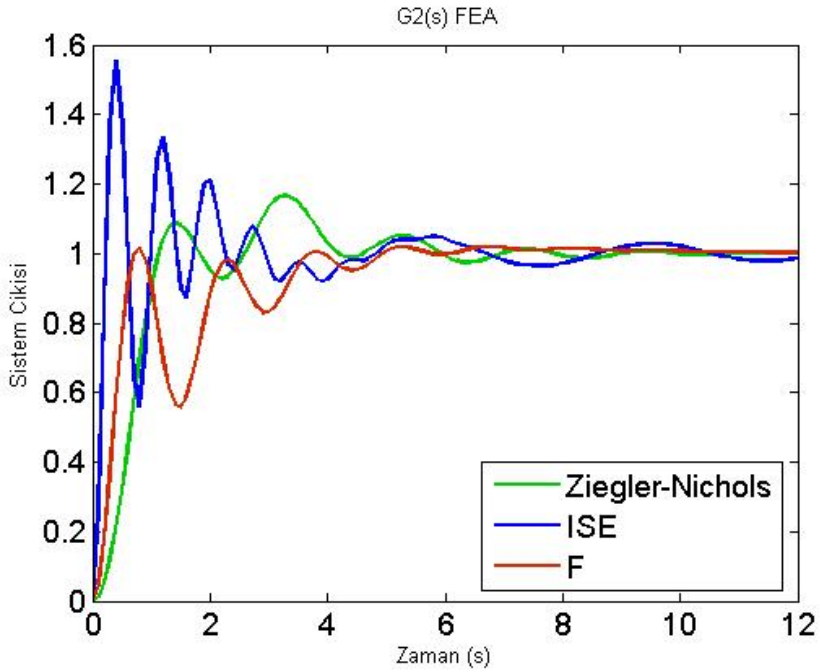
Süreç	Fonksiyon	PID	Tr	Ts	Mp(%)	ISE	IAE	F
G1	ISE	Kp=2,62 Ki=1,75 Kd=2,5	**0,4422**	2,2996	10,329	**0,6541**	0,9623	-
	F	Kp=2,38 Ki=1,12 Kd=1,4976	0,7339	**1,3106**	**0,2622**	0,7253	**0,912**	11,24
	Z-N [39]	Kp=2,808 Ki=1,712 Kd=1,151	0,6792	4,16	32	0,871	1,37	-
G2	ISE	Kp=4,245 Ki=41,037 Kd=13,933	1,1489	4,0959	5,1261	**0,2537**	**0,9256**	-
	F	Kp=2,71 Ki=1,255 Kd=2,444	**0,4229**	**3,3834**	**1,9823**	0,4006	0,9289	16,132
	Z-N [39]	Kp=2,190 Ki=2,120 Kd=0,565	0,7096	5,45	17	0,526	0,99	-
G3	ISE	Kp=2,882 Ki=3,550 Kd=3,889	**0,3683**	4,4198	22,038	**0,3913**	0,9198	-
	F	Kp=2,185 Ki=1,294 Kd=1,193	0,8382	**1,2573**	**1,1413**	0,5634	0,8164	10,55
	Z-N [39]	Kp=3,072 Ki=2,272 Kd=1,038	0,6710	3,722	32,8	0,6280	1,13	-

Şekil 4.9 Farksal Evrim Algoritmasının verdiği sonuçlardan elde edilen parametreler kullanılarak G1 sistemi için çizilmiş sistem cevabıdır. Algoritmanın maksimum aşma miktarı üzerindeki olumlu etkisi grafikten açıkça görülmektedir. Sistem cevabındaki iyileştirme, aşma miktarı ve referans noktaya oturma süresi açısından tatmin edicidir. G1 için yükselme zamanı açısından en iyi sonuç ISE hata değerinin optimize edilmesi sonucu elde edilmiştir.



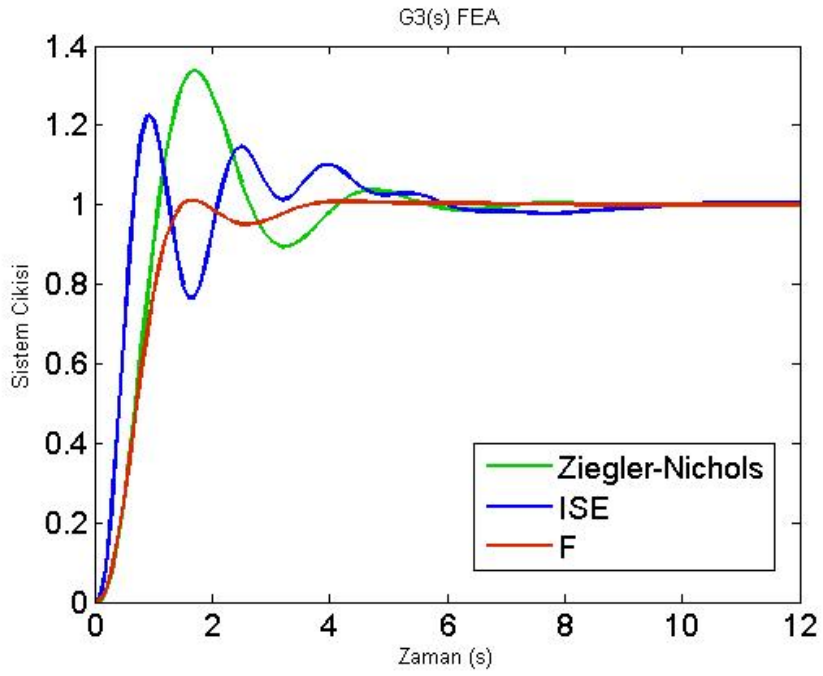
Şekil 4.9. G1 İçin Birim Basamak Cevabı

Farksal evrim algoritmasının G1 süreci için oldukça iyi netice verdiği Şekil 4.9'da açıkça görülebilmektedir. Aşma miktarının %0.26 gibi küçük bir değerde olması ve sistem cevabının hızlı bir şekilde referans noktaya ulaşması FEA algoritmasının etkinliğinin bir sonucudur.



Şekil 4.10. G2 İçin Birim Basamak Cevabı

G2 sistemi için FEA kullanılması durumunda F uygunluk fonksiyonu ile yapılan iterasyonlar sonucu Tablo 4.5' den yararlanarak geçici durum parametrelerinde ciddi iyileştirmelere ulaşıldığı görülebilmektedir. ISE ve IAE hatalarının minimum değerleri ise algoritmanın ISE fonksiyonu için bulduğu PID parametreleri sonucu elde edilmiştir. G3 sistemine FEA uygulandığında elde edilen sistem cevabı Şekil 4.11' de görülmektedir ve sistem parametreleri Tablo 4.5' deki gibidir. Sistem cevapları oturma zamanı açısından incelendiğinde FEA' nın en düşük %34' lük bir iyileştirme gerçekleştirdiği de ortadadır.



Şekil 4.11. G3 İçin Birim Basamak Cevabı

Farksal evrim algoritmasının her üç süreç için de sistem performansına olumlu katkı sağladığı verilen tablolardan açıkça görülmektedir. Özellikle ts ve Mp değerleri tüm sistemlerde Ziegler-Nichols metoduna oranla daha iyidir. Tablolarda elde edilen en iyi sonuç değerleri koyu olarak işaretlenmiştir. Algoritmanın sistem davranışına etkisi özellikle aşım miktarı ve oturma süreleri kıyaslandığında çok daha bariz olarak gözlenebilmektedir. Grafiklerde Ziegler-Nichols yöntemi ile algoritmanın verdiği sonuçlar eşzamanlı olarak gösterilmiştir. G2 sisteminde sistem cevabı izin verilebilir toleransa erişinceye kadar salınımlar sergilese de aşma miktarının çarpıcı biçimde azalması ve oturma süresinin kısalması olumlu etkiler arasında sayılabilir.

4.4. Parçacık Sürü Optimizasyonu Kullanarak PID Parametrelerinin Bulunması

Sürü halinde hareket, hayatta kalmak ve yaşamı sürdürmek için yardımcı çevre koşullarının araştırılmasında bazı organizmalar tarafından gerçekleştirilen bir davranıştır. Sürü prensibine benzerlik gösteren optimizasyon teknikleri geçtiğimiz on yılda mühendislik problemlerinin geniş bir alanında çözüm bulmaya yönelik uygulanmıştır.

PID içeren birçok kontrol uygulamalarında geleneksel parçacık sürü optimizasyonunun bazı özellikleri birleştirilerek denemeler yapılmış ve kullanılan yöntem test edilmiştir. PSO algoritması özellikle hibrit yapıda (HPSO) birçok uygulama için ele alınan, probleme ait değerlendirme fonksiyonunu minimize etmede kullanımı kolay ve uygulanabilir bir metottur. Bu çalışmada hibrit yapı kullanılmamış, hibrititerasyon 0 olarak alınmıştır. Algoritmada kullanılan parametrelere ait değerler Tablo 4.6' da verilmiştir.

Tablo 4.6. PSO Kontrol Parametre Değerleri

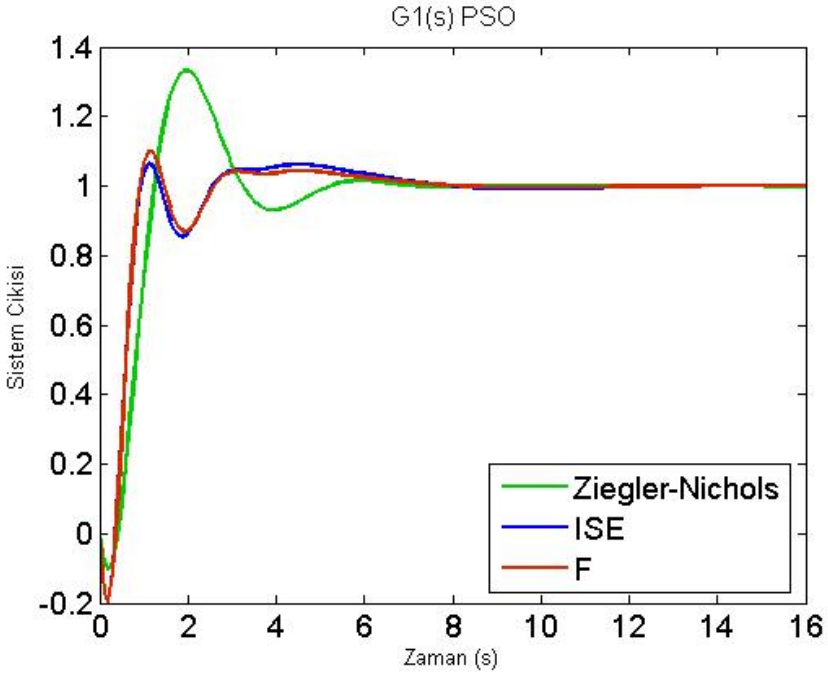
Parametre	Değer
c1	2
c2	2
w	0
bees	50
flights	100
space	[0 10]
hibriditerasyon	0
flilimit	50
Timelimit (sn)	30

Tablo 4.6' da, c1 ve c2 sırasıyla, bölgesel parametre dayanıklılığı ve küresel parametre dayanıklılığını simgelerken, w, parametre sapma hızıdır. Bu çalışmada bee (birey) sayısı 50, uçuş sayısı 100 olarak alınmış ve her bir bireyin değeri [0 10] aralığında tutulmuştur. Uçuş limiti (flilimit) 50 olarak seçilmiş ve optimizasyon sonlanıncaya kadar geçen süre (timelimit) 30 kabul edilmiştir.

Tablo 4.7 PSO Kullanılarak Elde Edilen Sistem Parametreleri

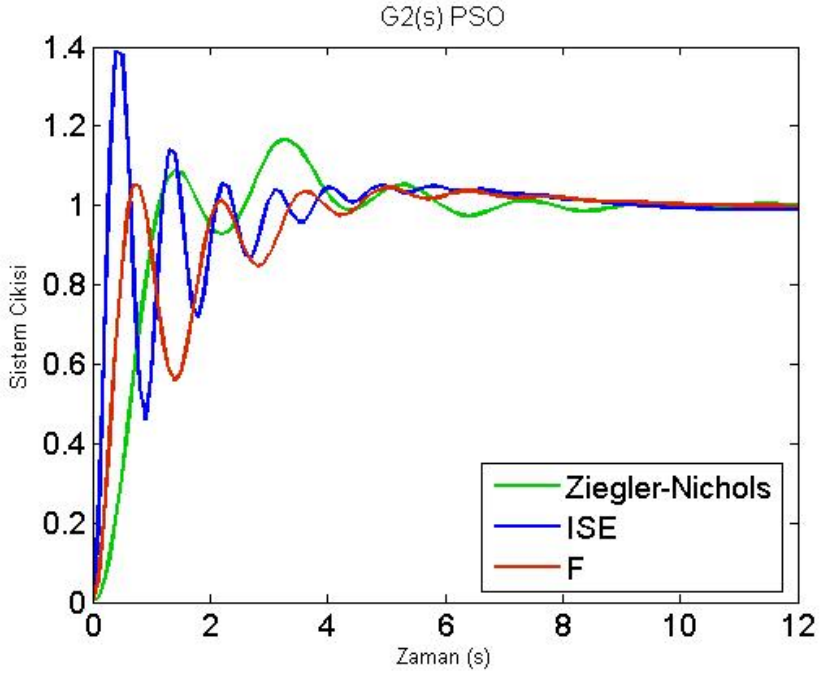
Sistem	Fonksiyon	PID	Tr	Ts	Mp(%)	ISE	IAE	F
G1	ISE	Kp=2,3823 Ki=1,7249 Kd=2,5153	**0,4081**	5,3059	**6,5241**	0,6564	**1,0155**	-
	F	Kp=2,6425 Ki=1,7076 Kd=2,4832	0,4304	**2,324**	10,225	**0,6562**	0,9513	23,07
	Z-N[39]	Kp=2,808 Ki=1,712 Kd=1,151	0,6792	4,16	32	0,871	1,37	-
G2	ISE	Kp=4,7184 Ki=4,2128 Kd=10	**0,1697**	4,9485	41,99	**0,2754**	0,8669	-
	F	Kp=2,8283 Ki=1,6523 Kd=2,8480	0,4048	**3,1712**	**6,0462**	0,3653	**0,8848**	19,207
	Z-N[39]	Kp=2,190 Ki=2,120 Kd=0,565	0,7096	5,45	17	0,526	0,99	-
G3	ISE	Kp=3,2448 Ki=2,9353 Kd=4,6179	**0,4118**	5,4221	27,943	**0,4058**	0,96	-
	F	Kp=2,6209 Ki=1,7558 Kd=2,1189	0,5671	**2,5113**	**6,2944**	0,4491	**0,7692**	18,329
	Z-N[39]	Kp=3,072 Ki=2,272 Kd=1,038	0,6710	3,722	32,8	0,6280	1,13	-

Tablo 4.7’ deki sonuçlara bakılarak parçacık sürü optimizasyonunun Z-N yöntemine göre daha az oturma zamanı, daha düşük ISE hatası ve daha az aşma miktarı sağladığı açıkça görülmektedir. Yükselme zamanı açısından ISE değerlendirmesinin daha az hata verdiği, buna karşın aşma miktarı ve oturma süreleri açısından ise F değerlendirmesinin daha tatmin edici netice verdiği görülmektedir. Aşma miktarı olarak algoritmanın F’e karşılık performansındaki iyileştirme dikkat çekicidir. Şekil 4.12-4.14’ den de açıkça görülecegi gibi salınımlar ve aşma miktarları oldukça azalmıştır.



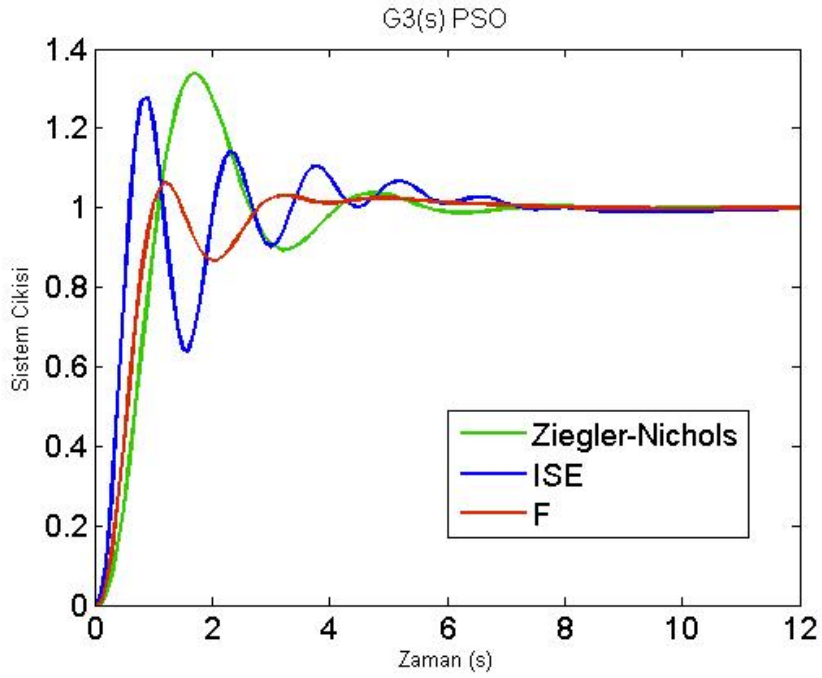
Şekil 4.12. G1 İçin Birim Basamak Cevabı

G1 için sistem çıkışı değerlendirme fonksiyonu F için daha çabuk referans noktaya oturmaktadır. Aşma miktarı olarak bakıldığında ise Şekil 4.12' den da görüleceği gibi, ISE değerlendirmesi daha düşük aşma sağlamıştır.



Şekil 4.13. G2 İçin Birim Basamak Cevabı

G2 için Şekil 4.13’ de verilen sistem cevabına bakıldığında F değerlendirme fonksiyonu için sistemin daha az sönümlü bir çıkış sergilediği ve sistem performansında oldukça belirgin bir iyileştirmeye ulaşıldığı görülebilmektedir. G3 sistemi için ise durum daha da tatmin edicidir. hem aşma miktarı açısından oldukça iyi bir çıkış gözlenmekte hem de sistem cevabındaki salınımların büyük oranda azalmış olması nedeniyle F değerlendirmesinin bu sistem için de oldukça etkin sonuçlar sağladığı ortadadır.



Şekil 4.14. G3 İçin Birim Basamak Cevabı

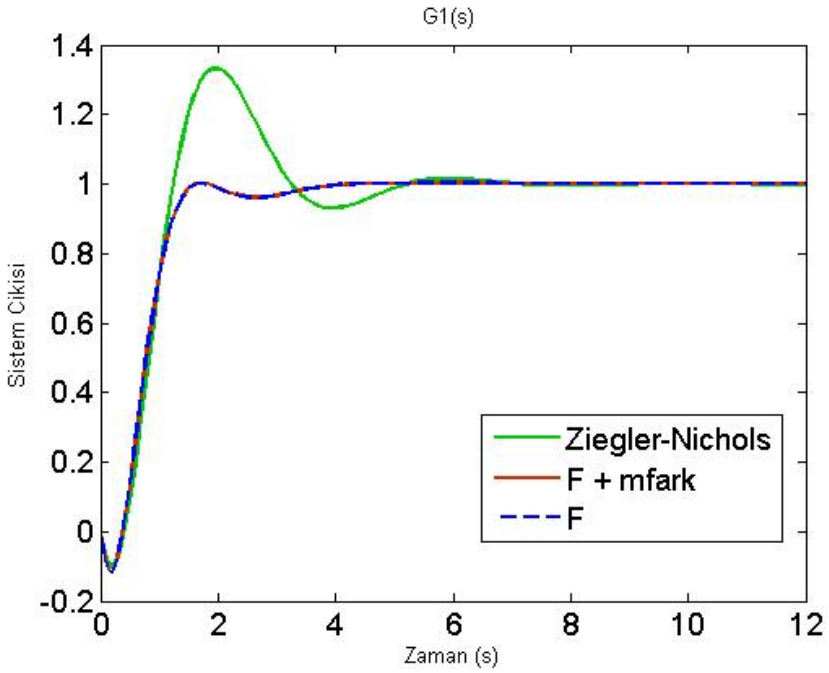
4.5. İyileştirilmiş Değerlendirme Fonksiyonu Kullanılarak PID Parametrelerinin Bulunması

Bu çalışmada kullanılan uygunluk fonksiyonu sistem cevaplarının oturma süresine ulaşıncaya kadar gösterdiği salınımlara engel olamamıştır. Sistem cevapları belirli bir tolerasta izin verilebilir aralığa gelinceye kadar iniş ve çıkışlar sergilemektedir. Bu istenemeyen bir durumdur. Bu problemin üstesinden gelebilmek ve sistem cevabını daha iyi elde edebilmek için Eşitlik 4.10 ile verilen yeni bir değerlendirme fonksiyonu kullanılmıştır.

$$F=A*(ISE) + B*(Mp)+ C*(Ts)+ D* (mfark) \quad (4.10)$$

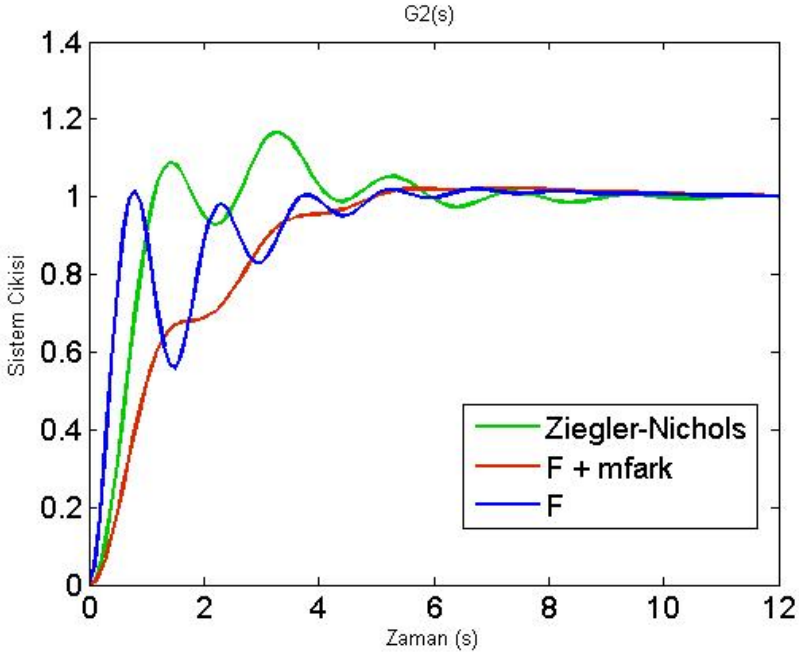
Eşitlik 4.8’ den farklı olarak burada mfark (maksimum fark) parametresi değerlendirilmeye ortak edilmiştir. mfark, zamanın her bir örnekleme anında sistem cevabında meydana gelen aşma miktarlarının referans noktayla genlik değeri olarak farkıdır. Bu fark değerleri F fonksiyonuna dahil edilerek minimize edilip salınımların azaltılması ve hatta yok edilmesi amaçlanmıştır. Eşitlik 4.10’ da kullanılan A, B, C ve D parametreleri sırasıyla 10, 3, 1 ve 100 olarak seçilmiştir.

Önceki çalışmalarda bulunan sonuçlar değerlendirildiğinde GA, GGA, FEA ve PSO algoritmalarından en etkin sonucun FEA algoritması kullanıldığı durumda elde edildiği gözlenmiştir. Bu gerçekten yola çıkarak iyileştirilmiş değerlendirme fonksiyonu ile yapılan çalışmada optimizasyon yöntemi olarak farksal evrim algoritması kullanılmıştır. Popülasyon büyüklüğü, çaprazlama oranı, iterasyon sayısı ve ölçekleme faktörü aynı tutulmuş ve uygunluk fonksiyonu için 50 ve 100 iterasyon sonucunda elde edilen değerlerden en optimum olanı seçilmiştir. Bulunan PID parametreleri yardımıyla sistem cevapları üretilmiştir. Geçici durum parametreleri ve birim basamak girişe karşılık sistem cevapları, maksimum farkın etkin olmadığı durum ve Ziegler-Nichols sonuçlarına kıyasla tablo ve şekiller yardımı ile açıklanmıştır. G1 süreci için simülasyon çalışması sonuçları Şekil 4.15’ de görülmektedir.

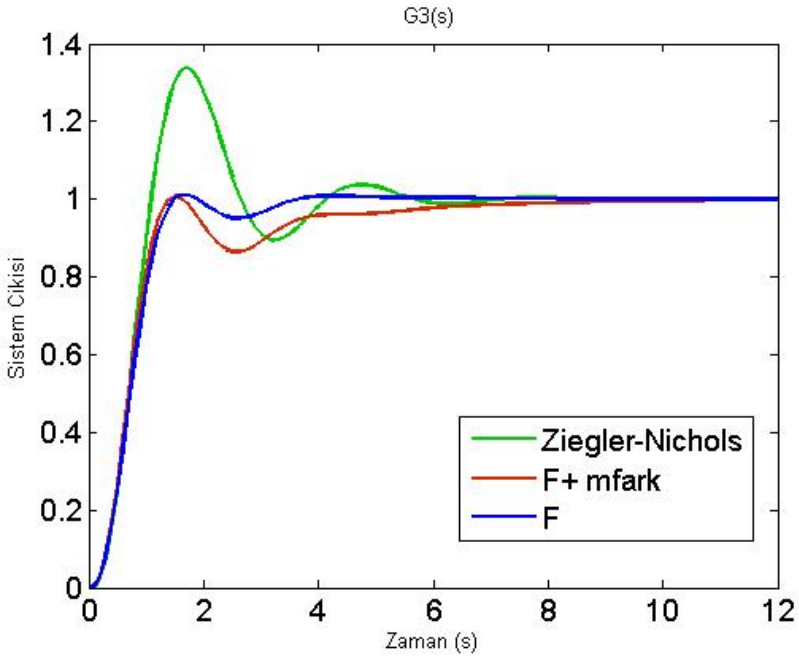


Şekil 4.15. G1 İçin Birim Basamak Cevabı

G1 süreci için sistem cevabı mfark varken F için bulunan sonuca yakın bir değişim sergilerken G2 için maksimum fark etkisi oldukça açık bir biçimde Şekil 4.16' dan görülmektedir. G3 sisteminde ise ilginç bir sonuç olarak mfark eklenmiş değerlendirme fonksiyonunun ürettiği çıkış grafiği, F fonksiyonu kullanılarak elde edilen sonucun ürettiği grafiğe göre daha fazla aşım miktarına yol açmıştır.



Şekil 4.16. G2 İçin Birim Basamak Cevabı



Şekil 4.17. G3 İçin Birim Basamak Cevabı

Yapılan cok sayıda iterasyon sonucu G1, G2 ve G3 sistemleri için elde edilen minimum F+mfark değerine karşın elde edilen sonuç Z-N eğrisi ve F ile bulunan sonuç ile eş zamanlı olarak Şekil 4.16-4.18' de sunulmuştur. Çalışmada elde edilen sonuçlar Tablo 4.8' de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Tablo 4.8 İyileştirilmiş Değerlendirme Fonksiyonu Kullanılarak PID Parametrelerinin Belirlenmesi

Süreç	Fonksiyon	PID	Tr	Ts	Mp(OS)	ISE	IAE	F
G1	F+mfark	Kp=2,38 Ki=1,12 Kd=1,49	0,7269	1,35	**0,2492**	0,7262	**0,9114**	12,35
	F	Kp=2,38 Ki=1,12 Kd=1,4976	0,7339	**1,3106**	0,2622	**0,7253**	0,912	**11,24**
	Z-N[39]	Kp=2,808 Ki=1,712 Kd=1,151	**0,6792**	4,16	32	0,871	1,37	-
G2	F+mfark	Kp=1,1523 Ki=0,7276 Kd=0,3677	2,737	3,57	2,2634	0,8422	1,5651	22,31
	F	Kp=2,71 Ki=1,255 Kd=2,444	**0,4229**	**3,3834**	**1,9823**	**0,4006**	**0,9289**	**16,132**
	Z-N[39]	Kp=2,190 Ki=2,120 Kd=0,565	0,7096	5,45	17	0,526	0,99	-
G3	F+mfark	Kp=2,486 Ki=0,97 Kd=1,2595	0,8137	3,6036	**0,7881**	0,5636	1,0334	18,11
	F	Kp=2,185 Ki=1,294 Kd=1,193	0,8382	**1,2573**	1,1413	**0,5634**	**0,8164**	**10,55**
	Z-N[39]	Kp=3,072 Ki=2,272 Kd=1,038	**0,6710**	3,722	32,8	0,6280	1,13	-

Tabloda koyu renkli değerler her üç yöntem arasında elde edilen en iyi değerleri göstermektedir.

Buraya kadar yapılan çalışmaların genel bir özeti olarak Tablo 4.9' da G1, G2 ve G3 için genel bir karşılaştırma sunulmuştur.

Tablo 4.9 G1, G2 ve G3 Sistemlerinin İncelenmesinde Kullanılan Algoritmalara Ait Parametre ve Sonuçlar

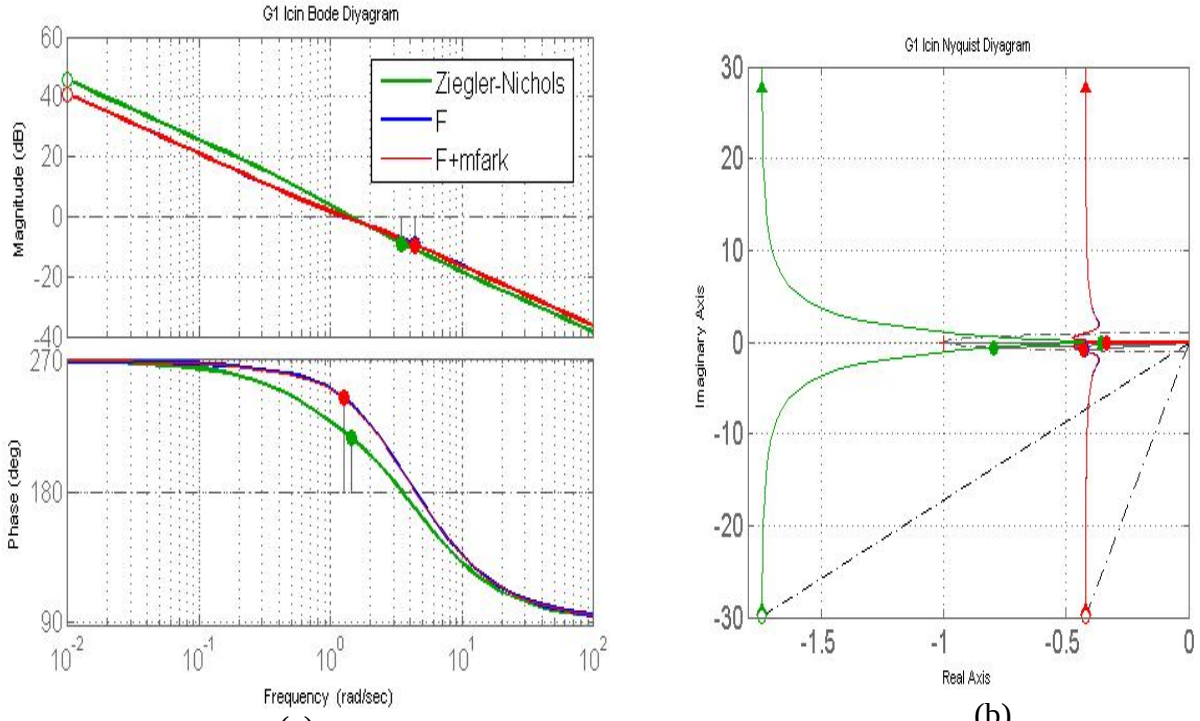
		Literatür			min (F)				min (F+mfark)	min (ISE)			
sistem	**parametre**	**Z-N**	**Kitamori**	**Fuzzy-PID**	**GA**	**GGA**	**FEA**	**PSO**	**FEA**	**GA**	**GGA**	**FEA**	**PSO**
G1	**kp**	2,808	2,212	-	2,313	2,377	2,380	2,643	2,380	2,585	2,770	2,620	2,382
	ki	1,712	1,085		1,148	1,115	1,120	1,708	1,120	1,692	1,647	1,750	1,725
	kd	1,151	1,148		1,498	1,506	1,498	2,483	1,490	2,500	2,550	2,500	2,515
	ISE	0,871	0,805	0,772	0,727	0,725	0,725	0,656	0,726	0,656	0,655	**0,654**	0,656
	IAE	1,37	1,04	-	0,926	0,916	0,912	0,951	**0,911**	0,962	0,934	0,962	1,016
	ts	4,16	2,370	3,090	1,339	1,325	**1,311**	2,324	1,350	2,331	2,406	2,300	5,306
	Mp(%)	32	6,800	6,000	0,900	0,300	0,262	10,225	**0,249**	9,307	12,990	10,329	6,524
	F	-	-	-	12,165	11,480	**11,240**	23,070	12,350	-	-	-	-
G2	**kp**	2,190	çözüm yok	-	2,585	2,720	2,710	2,828	**1,152**	4,177	3,438	4,245	4,718
	ki	2,120			1,304	2,261	1,255	1,652	**0,728**	9,845	5,000	41,037	4,213
	kd	0,565			2,468	2,430	2,444	2,848	**0,368**	10,000	5,000	13,933	10,000
	ISE	0,526		0,533	0,401	0,400	0,401	0,365	0,842	0,234	0,288	0,254	0,275
	IAE	0,99		-	0,948	0,927	0,929	0,885	1,565	0,899	0,879	0,926	**0,867**
	ts	5,45		5,010	3,365	3,395	3,383	**3,171**	3,570	4,313	4,536	4,095	4,949
	Mp(%)	17		6,100	2,600	2,000	**1,982**	6,046	2,263	42,622	24,404	5,126	41,990
	F	-		-	16,706	16,197	16,132	19,207	22,310	-	-	-	-
G3	**kp**	3,072	2,357	-	**2,080**	2,275	2,185	2,621	2,486	2,818	2,907	2,882	3,245
	ki	2,272	1,429		1,226	1,462	1,294	1,756	**0,970**	3,400	3,534	3,550	2,935
	kd	1,038	0,975		1,109	1,343	1,193	2,119	**1,260**	3,749	3,719	3,889	4,618
	ISE	0,628	0,596	0,537	0,585	0,350	0,563	0,449	0,564	**0,394**	**0,394**	0,391	0,406
	IAE	1,13	0,833	-	0,846	0,791	0,816	**0,769**	1,033	0,914	0,904	0,920	0,960
	ts	3,722	2,300	2,632	1,378	**1,178**	1,257	2,511	3,604	0,490	4,397	4,420	5,422
	Mp(%)	32,8	10,900	1,900	**0,700**	2,700	1,141	6,294	0,788	20,767	22,046	22,038	27,943
	F	-	-	-	10,637	11,618	**10,550**	18,329	18,110	-	-	-	-

4.6. FEA Kullanılarak Elde Edilen Sistemlerin Frekans Analizi

Bu bölümde, okuyucuya fikir vermesi ve farklı bir açıdan karşılaştırma yapmasına imkan sağlamak bakımından zaman domeni cevabı dikkate alınarak yapılan çalışmaların bir kısmına ait frekans domeni analizleri sunulmuştur.

Tablo 4.9' dan ve buraya kadar yapılan çalışmalardan, PID parametrelerinin belirlenmesinde en iyi sonucun farksal evrim algoritması yardımıyla elde edildiği görülmektedir. Bu noktadan hareketle, kullanılan G1, G2 ve G3 süreçlerine ait frekans analizi de yine farksal evrim algoritmasının verdiği sonuçlar üzerinden yapılacaktır.

Sistemlerin kararlılığını incelemek ve frekans cevaplarını görmek amacıyla her üç süreç için Bode ve Nyquist çizimleri Şekil 4.18-4.20’ de verilmiştir.

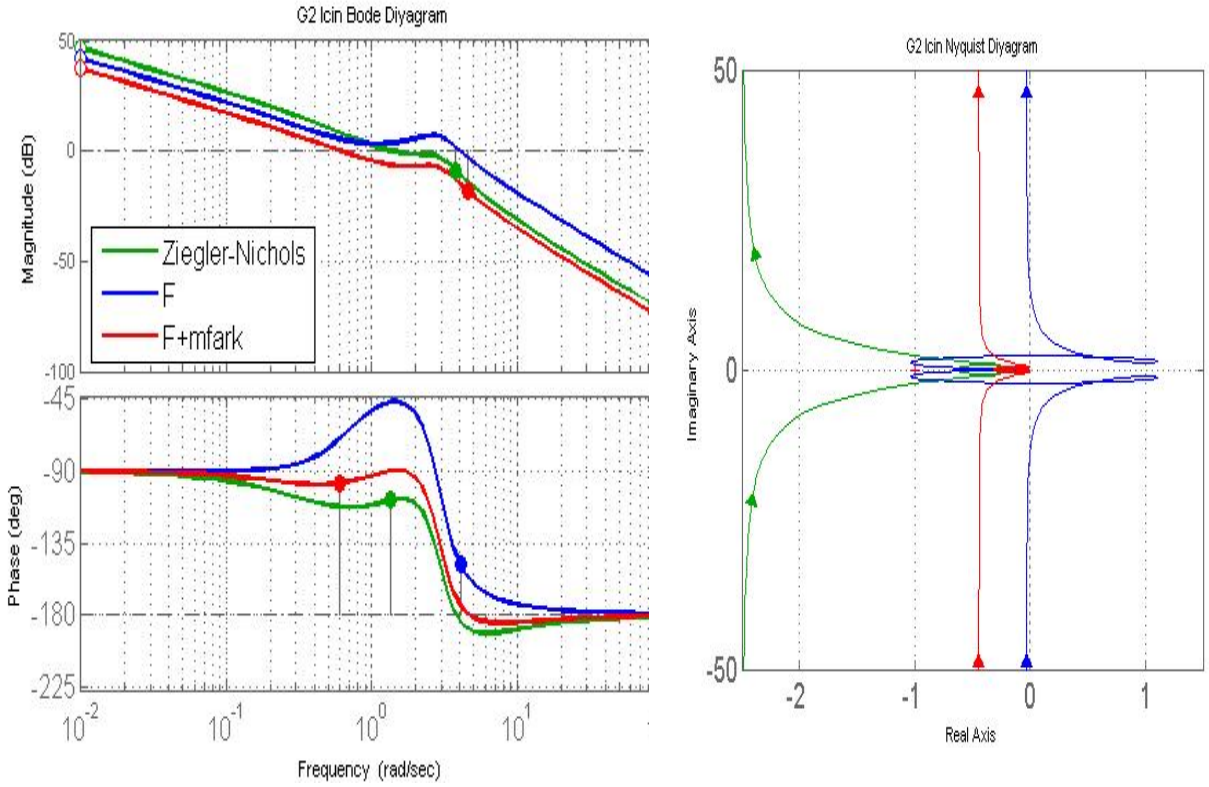


(a) (b)

Şekil 4.18. (a) G1 süreci için Bode Diyagramı
(b) G1 süreci için Nyquist Diyagramı

Bir sistemin kararlılığının tespit edilmesinde Bölüm 3.5’ de belirtildiği gibi kazanç payı (KP) ve faz payı (FP) önemli bir yere sahiptir. Kazanç payı ne kadar büyükse

sistem o oranda kararlıdır. Aynı durum faz payı için de geçerlidir. Faz payının büyük olması sistemi daha da kararlı hale getirmektedir. Şekil 4.15’ e bakıldığında G1 sisteminin F amaç fonksiyonu için genlik payı ve faz payının Z-N eğrisindeki değerlerden daha büyük olduğu görülmektedir. Dolayısıyla sistem daha kararlı hale gelmiştir. Sistemin faz payı yüksek, sönüm oranı düşüktür.



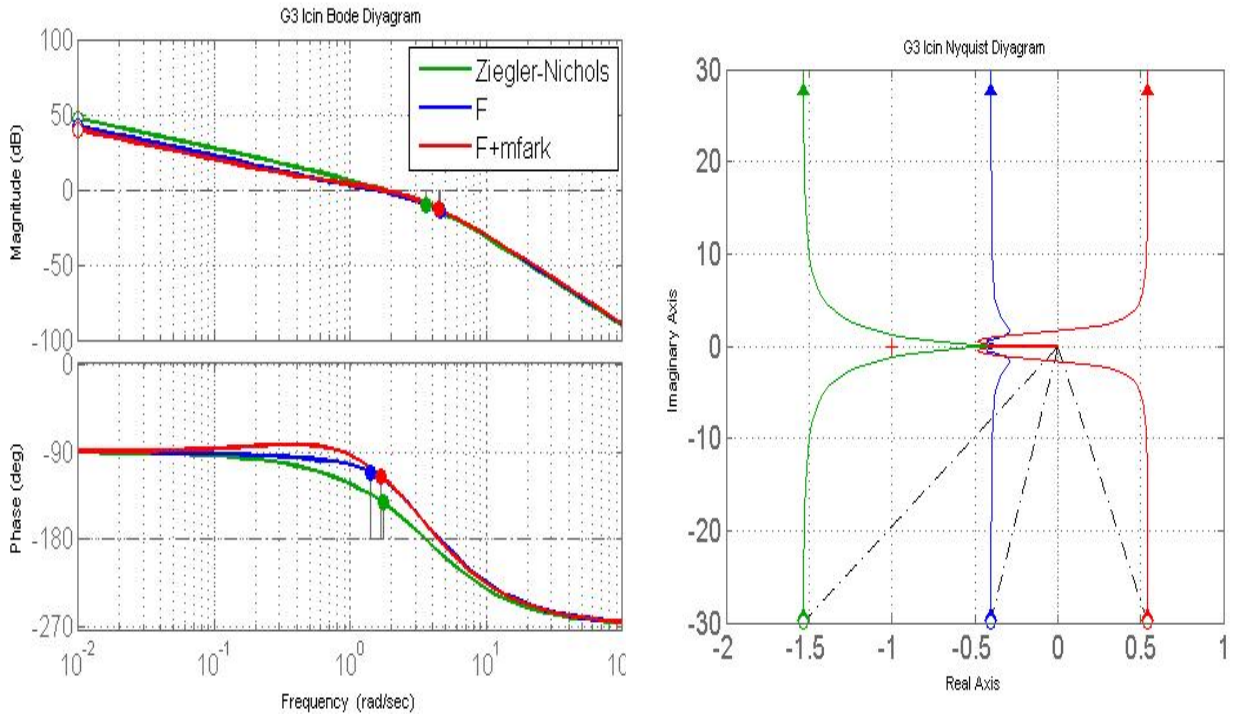
(a) (b)

Şekil 4.19. (a) G2 süreci için Bode Diyagramı
(b) G2 süreci için Nyquist Diyagramı

G2 süreci için Şekil 4.19’ a bakıldığında sistemin frekans cevabında kazanç payı ve faz payı açısından iyileştirilmiş amaç fonksiyonu ile artış gözlenmektedir. Nyquist diyagramındaki KP=8,96 dB ve FP=82,2^{o} değerleri de sistemin kararlı olduğunu ortaya koymaktadır.

Şekil 4.16’ da sistem çıkışındaki salınımlara da dikkat edilirse, az sönümlü bir sistemin çok salınımlı olacağı ve faz payının sönüm oranı ile ters orantılı olduğu görülebilir. Şekil 4.19’ daki faz payı büyüklükleri bunu doğrulamaktadır. Ayrıca bir sistem için

sönüm oranı ne kadar yüksekse, geçiş cevabı o kadar düzgün ve osilasyonsuz (ve genellikle az aşımlı) olmaktadır.



(a) (b)

Şekil 4.20. (a) G3 süreci için Bode Diyagramı
(b) G3 süreci için Nyquist Diyagramı

Bu çalışmada kullanılan zaman ve frekans bölgesi analizleri için çizimler MATLAB programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. G3 sürecine ait bode ve nyquist eğrilerinde elde edilen değerler şöyledir: ISE için KP=10.2 dB, FP=37.7^{o}, F için KP=13.9 dB ve FP=69.4^{o}, F+mfark için ise KP=12.8 dB ve FP=65.1^{o}' dir. Sistemin en kararlı halinin bu değerler de göz önünde bulundurularak F amaç fonksiyonu için verdiği cevap olduğu açıkça görülmektedir.

Bu tez çalışmasında zaman domeni incelemeleri dikkate alınmış, frekans domeni değerleri algoritmaların çalışmalarında kullanılmamıştır. Ayrı bir gerçek olarak şunun da belirtilmesi gerekir ki, iyi bir kontrol sisteminin istenilen dinamik davranışı sergilemesi kadar bağıl kararlılığının yüksek olması ve sağlam (robust) olması da önem taşır. Bir kontrol sisteminin sağlamlığının test edilmesinde frekans domeni yaklaşımından büyük ölçüde yararlanılmaktadır.

4.7. Farklı Süreçler İçin PID Parametrelerinin Belirlenmesi

Bu kısımda, farksal evrim algoritmasının performansı literatürde yer alan farklı sistemler için de denenmiştir. Bu amaçla transfer fonksiyonları Eşitlik 4.11 ve Eşitlik 4.12'de sunulan sistemler kullanılmıştır.

$$G_{p1}(s) = \frac{1}{s^4 + 6s^3 + 11s^2 + 6s} \tag{4.11}$$

$$G_{p2}(s) = \frac{1}{s(s+1)(s+5)} \tag{4.12}$$

Birinci sistem (G_{p1}) zaman gecikmesi içermeyen dördüncü dereceden bir sistem, ikinci sistem ise üçüncü dereceden bir sistemdir. Sistemlere ait olarak yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar ile literatür değerleri tablolar ve grafikler yardımıyla karşılaştırılmıştır [58].

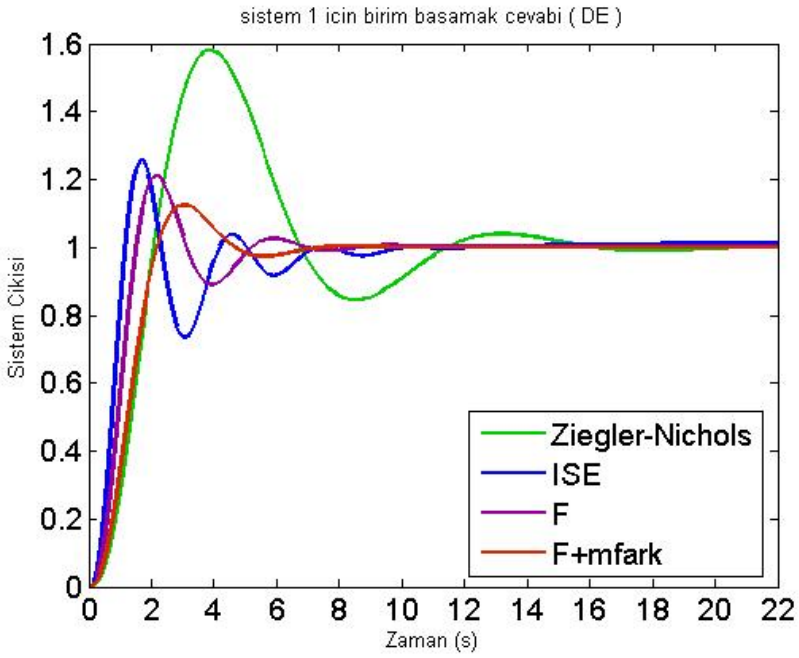
Transfer fonksiyonu Eşitlik 4.11 ile verilen sisteme ait zaman domeni analizinde elde edilen sonuçlar Tablo 4.10' da verilmiştir [58]. Bu tabloda MA, Memetik Algoritma için kullanılmıştır. Şekil 4.21' de ise sistemin birim basamak girişe karşılık cevap eğrisi kullanılan yöntemler için eş zamanlı olarak sunulmuştur.

Tablo 4.10 G_{p1} Sistemine Ait Geçici Durum Parametreleri

Metot		tr	Mp(%)	ts
Z-N [58]		2,10	58,15	14,80
GA [58]	IAE	1,20	44,97	9,30
	ISE	1,20	28,80	20,40
MA [58]	IAE	1,16	43,81	9,20
	ISE	1,07	29,20	19,90
FEA	ISE	**0,81**	25,57	6,50
	F	0,95	21,00	4,68
	F+mfark	1,41	**12,40**	**3,98**

Yükselme zamanı, aşma miktarı ve oturma süreleri dikkate alındığında Tablo 4.10' dan farksal evrim algoritmasının performansının oldukça iyi olduğu görülmektedir. Sistem geçiş cevaplarına bakılarak, en iyi çıkışın F+mfark amaç fonksiyonu kullanıldığında sağlandığı söylenebilir. Aşma miktarını en aza indirgemek amacıyla kullanılan bu amaç fonksiyonu sistem cevabının aşma miktarında güçlü bir etki sağlarken yükselme

zamanında daha az iyileştirme sağlamıştır. Genel olarak sistem çıkışında FEA' nın performansının daha iyi olduğunu Şekil 4.21' e bakarak da söylemek mümkündür.



Şekil 4.21. G_{p1}' e Ait Sistem Cevabı

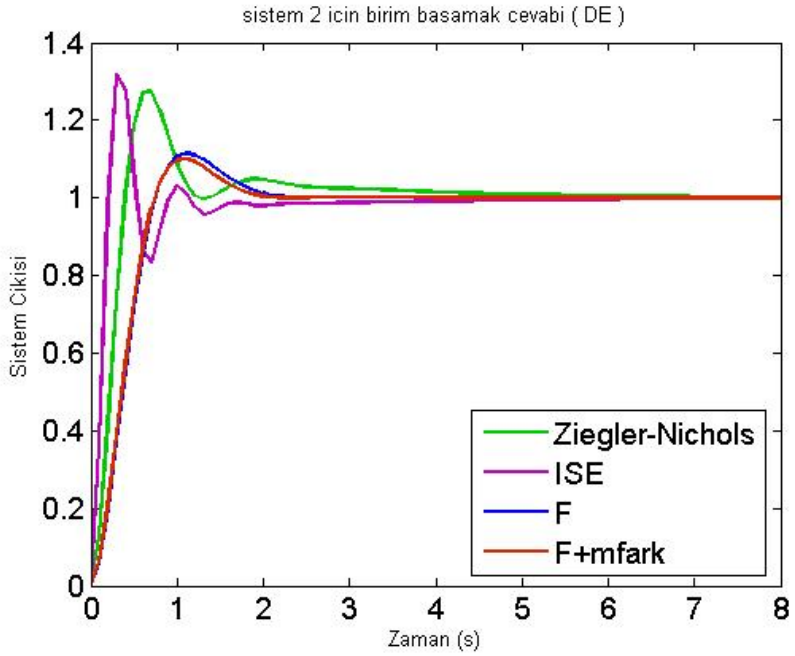
G_{p2} sistemi için yapılan çalışmaya ait sistemin geçici durum cevabının parametreleri ve çıkış eğrileri tablo ve şekil yardımıyla sunulmuştur. Tablo 4.11' den FEA' nın sistem performansı üzerindeki olumlu etkisi gözlenebilmektedir.

Tablo 4.11 G_{p2} Sistemine Ait Geçici Durum Parametreleri

Parametre	Z-N [58]	Geliştirilmiş Z-N [58]	GA [58]	MA* [58]	FEA (F)	FEA (F+mfark)	FEA (ISE)
kp	18,00	39,42	20,17	19,95	17,36	16,83	29,67
ki	12,81	12,81	0,00	0,36	0,021	0,01	0,5139
kd	6,32	30,32	30,32	30,32	13,926	14,63	93,3361
ISE	43,05	10,32	9,46	9,45	0.2785	**0,27**	0,335
tr	0,68	0,30	0,36	0,32	0.4970	0,51	**0,1466**
ts	>10	3,44	1,68	1,80	15.903	1,48	**0,8065**

*MA: Memetik Algoritma

Şekil 4.22 G_{p2}' nin geçiş cevabını göstermektedir. Görüldüğü gibi kullanılan algoritmanın sistem performansı üzerinde oturma süresi ve aşma miktarı açısından olumlu etkisi vardır.



Şekil 4.22. G_{p2}' ye Ait Sistem Cevabı

Bu çalışmada ele alınan sistemlere farklı algoritmalar uygulanarak, kullanılan metotların sistem performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara bakılarak Tablo 4.8' in de yardımıyla, sistem cevapları üzerinde tüm algoritmaların etkin sonuçlar verdiği gözlenmiş ve farksal evrim algoritmasının süreçlere ait geçici durum parametrelerinde daha iyi değerler ürettiği görülmüştür. Her bir süreç üzerinde dinamik sistem cevapları incelenmiş elde edilen bulgular tablo ve şekiller yardımıyla açıklanmıştır. Sistem performansları karşılaştırılırken dinamik cevapların zaman ve frekans domeni araştırmalarına değinilmiş ve açıklamalı olarak elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

5. BÖLÜM

SONUÇ

Endüstriyel sistemlerde sıkça kullanılan orantı-integral-türev (proportional-integral-derivative, PID) tipi denetleyicilerin kazanç parametrelerinin belirlenmesi işlemi, kontrol mühendisliğinde çözüm bulunması gereken problemlerden biri olarak halen önemini korumaktadır. PID denetleyiciye sahip sistemlerin amaca uygun şekilde denetiminin sağlanabilmesi için ilgili parametrelerin uygun bir yöntemle belirlenmesi gerekir. Bu parametrelerin uygun şekilde elde edilebilmesi amacıyla ortaya konulan çok sayıda çalışma mevcuttur. Bu çalışmada, PID denetleyici parametreleri ikili ve gerçek kodlu genetik algoritmalar, farksal evrim algoritması ve parçacık sürü optimizasyonu yardımıyla elde edilmeye çalışılmıştır. Algoritmaların etkinliği literatürde yer alan farklı derecelerdeki sistemler kullanılarak test edilmiş ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak ortaya konulmuştur.

Denetleyici girişindeki süreçlere ilk önce ikili kodlu genetik algoritma ve gerçek kodlu genetik algoritma uygulanmış, en etkin çözüm verilerin gerçek değerlerle kodlandığı durumda elde edilmiştir. Daha sonra aynı süreçlere, kullanılan amaç fonksiyonu değiştirilmeksizin farksal evrim ve parçacık sürü optimizasyon algoritmaları uygulanmış ve her durum için değerlendirme sonuçlarına bakılarak en etkin çözüm belirlenmiştir.

Sistem geçici durum cevaplarında gözlenen salınımları gidermek ve sistemi daha osilasyonsuz yapabilmek amacıyla amaç fonksiyonuna salınım değişimlerinin en yüksek değeri ile ilişkili bir ‘maksimum fark’ parametresi eklenerek çalışmalar yapılmış ve istenilen amaca ulaşıldığı grafikler yardımıyla belirlenmiştir.

Zaman domeninde yapılan simülasyonlar ve elde edilen sonuçlar kullanılan her dört yöntemin de PID ayarlamasında etkin sonuçlar verdiğini göstermiştir. Ancak

algoritmaların performansları hata fonksiyonlarına ve farklı amaç fonksiyonlarına göre karşılaştırıldığında en etkin çözümün farksal evrim algoritması kullanılarak elde edildiğİ gözlemlenmiştir. Bu noktadan hareketle sisteme frekans analizi uygulamada kullanılacak metot da belirlenmiştir.

Ayrıca, elde edilen en iyi değerleri üreten algoritma (FEA) kullanılarak, denetleyiciye frekans analizi uygulanmıştır. Elde edilen grafikler yardımıyla kullanılan süreçlere ait denetleyicinin kararlı olduğu sonucuna varılmıştır.

Yapılan çalışmada PID denetleyici parametreleri kapalı döngü sistemin zaman domenindeki birim basamak yanıtları dikkate alınarak belirlenmiştir. Bu amaçla, algoritmalar tarafından kullanılan amaç fonksiyonlarında zaman domeni yanıtlarına ait geçici durum performans göstergeleri kullanılmıştır. Benzer incelemenin frekans domeni özellikleri kullanılarak da yapılması mümkündür. PID denetimli bir sistemin kararlılığının arttırılması ve daha sağlam bir yapıya kavuşturulmasında amaç fonksiyonlarının frekans göstergelerini de içerecek biçimde geliştirilmesi ve parametre araştırmasının bu doğrultuda yönlendirilmesi ileri bir aşama olarak düşünülmektedir.

Bu tez çalışması göstermektedir ki, yapay zeka optimizasyon yöntemlerinin kullanımı sistem performansına olumlu yönde katkılar sağlamaktadır. Farksal evrim algoritması ile bu katkının daha da arttırılması ve algoritmanın en düşük hata ile çözümler üretmesi mümkündür.

KAYNAKLAR

1. Kalyanmoy, D., Multi-objective Optimization Using Evolutionary Algorithms, John Wiley & Sons, 2004.

2. Pham, D.T., Karaboğa, D., Intelligent Optimization Techniques, Springer-Verlag, 2000.

3. Karaboğa, D., Ökdem S., A Simple and Global Optimization Algorithm for Engineering Problems: Differential Evolution Algorithm, Turk J. Elec. Engin., 12(1), 2004, Tübitak.

4. Çelebi, T., Improving Data Locality By Using Genetic Algorithms, Engineering Project, Department of Computer Engineering, Marmara University, 2002.

5. Karaboğa, D., Yapay Zeka Optimizasyon Algoritmaları, Atlas-Nobel Yay., 2003.

6. Jeffers, M., A Genetic Algorithm Based Fuzzy Logic Controller, B.Eng. in Electronic Engineering Final Year Project Report, DCU, 2001.

7. Keskintürk, T., Diferansiyel Gelişim Algoritması, Yöneylem Araştırması Endüstri Mühendisliği XXVI. Ulusal Kongresi (YA/EM), 3 – 5 Temmuz 2006, Kocaeli.

8. Yang, S., Gan, Y. B., Qing, A., Antenna-Array Pattern Nulling Using a Differential Evolution Algorithm, International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 14(1), January, 2004.

9. Price, K., Storn, R., Differential Evolution, Homepage, http://www.ICSI.Berkeley.edu/~storn/code.html, March 2007.

10. Storn, R., Differential Evolution-A Simple and Efficient Heuristic Strategy for Global Optimization Over Continuous Spaces, Journal of Global Optimization, 11,

341-359, Dordrecht, 1997.

11. Bağış, A., Özçelik, Y., Farksal Evrim Algoritması Kullanarak Sistem kimliklendirme, TOK'07 Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, Eylül, 2007.

12. Price, K., Storn, R., Dr. Dobbs J., Differential Evolution, 18-24, 1997.

13. Kennedy, J., Eberhart, R. C., Swarm Intelligence, Morgan Kaufmann Publishers, USA, 2001.

14. Liu, Y., Zhang, J., Wang, S., Optimization Design Based on PSO Algorithm for PID Controllers, Proceedings of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2004.

15. Selvan, S. E., Subramanian, S., Solomon, S. T., Novel Technique for PID Tuning by Particle Swarm Optimization, Swarmfest, 2003.

16. Fukuyama Y., Yoshida, H., A Particle Swarm Optimization for Reactive Power and Voltage Control in Electric Power Systems, Proc. Congress on Evolutionary Computation, Seoul, Korea, NJ: IEEE Service Center, 2001.

17. Suganthan, P. N. Particle swarm optimiser with neighbourhood operator. Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation, 1958–1962. Piscataway, NJ: IEEE Service Center, 1999.

18. Tamer, S., Karakuzu, C., Parçacık Sürüsü Optimizasyon Algoritması ve Benzetim Örnekleri, ELECO 2006 Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Sempozyumu, Elektronik Bildirileri Kitabı, 2006.

19. Otomatik kontrol sistemleri, Benjamin C. Kuo, ceviren ve uyarlayan: Prof. Dr. Atilla Bir,1995.

20. Ogata, K., Modern control Engineering, , Prentice Hall, 4th edition, 2001.

21. John J. D'azzo, Constantine H. Houpis, Linear Control System Analysis And Design: Conventional And Modern, McGraw-Hill, 3rd edition, 1988.

22. Brown, T., Analysis and Design of Feedback Control Systems, McGraw-Hill, International Studen Edition.

23. Bağış, A., Otomatik Kontrol Ders Notları, ders 10: Frekans Cevabı Analizleri, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 2008.

24. Layton, J.M., Multivariable Control Theory , Peter Peregrinus Ltd., 1976.

25. Driels, M., Linear Control Systems Engineering, McGraw-Hill, 1995.

26. Bağış, A., Otomatik Kontrol Ders Notları, ders 9: PID Kontrol, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 2008.

27. Johnson, A.M., Moradi M.H., New Identification and Design Methods, Springer Verlag, 2005.

28. Kocaoğlan, E., Lecture notes on Linear Control Systems, senior-level control course, Middle East Technical University, Ankara, April 1988.

29. Griffin, I., Online PID Controller Tuning Using Genetic Algorithms, M.Sc. Thesis, Dublin City University, School of Electronic Engineering, Ireland, 2003.

30. Ziegler, J.G., Nichols, N.B., Optimum Settings For Automatic Controllers, Trans. Asme, 64(8),759–768, 1942.

31. Cohen, G.H., Coon, G.A., Theoretical Investigation of Retarded Control, Transactions of the ASME 75, 827-834, 1953.

32. Zhuang, M., Atherton, D.P., Automatic Tuning of Optimum PID Controllers, IEEE Proceedings on Control and Applications, 140(3), 216-224, 1993.

33. Pessen, D.W., A New Look At PID-Controller Tuning, Transactions of the ASME, Journal of Dynamical Systems Measures and Control 116, 553-557, 1994.

34. Morari, M., Zafiriou, E., Robust Process Control, Englewood Cliffs NJ, Prentice-Hall, 1989.

35. Ho, W.K., Hang, C.C., Cao, L.S., Tuning of PID Controllers Based on Gain and Phase Margin Specifications, Automatica, 31(3), 497-502, 1995.

36. Wang, Q.G., et al., PID Tuning For Improved Performance, IEEE Transactions on Control Systems Technology, 7(4), 457-65, 1999.

37. Lequin, O., Iterative Feedback Tuning of PID Controllers Comparison With Classical Tuning Rules, Control Engineering Practice 11, 1023-1033, 2003.

38. Liu, G.P., Daley, S., Optimal-Tuning PID Control For Industrial Systems, Control Engineering Practice 9, 1185-1194, 2001.

39. Zhao, Z.Y., Tomizuka, M., Isaka, S., Fuzzy Gain Scheduling of PID Controllers, IEEE Trans. Systems Man And Cybernetics, 23(5), 1392-1398, 1993.

40. Wang, P., Kwok, D.P., Optimal Design of PID Process Controllers Based on Genetic Algorithms, Control Engineering Practice, 2(4), 641-648, 1994.

41. Wu, C.J. Huang, C.H., A hybrid method for parameter tuning of PID controllers, J. Franklin Inst. 334B (4), 547-562, 1997.

42. Blanchett, T.P., Kember, G.C., Dubay, R., PID Gain Scheduling Using Fuzzy Logic, ISA Transactions 39, 317-325, 2000.

43. Bandyopadhyay, R., Chakraborty, U.K., Patranabis, D., Autotuning A PID Controller: A Fuzzy-Genetic Approach, Journal of Systems Architecture 47, 663-673, 2001.

44. Lin, C., Jan, H., Shieh, N., GA-Based Multiobjective PID Control For A Linear Brushless Dc Motor, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 8(1), 56-65, 2003.

45. Alfaro-Cid, E., McGookin, E.W., Murray-Smith, D.J., GA-Optimised PID And Pole Placement Real And Simulated Performance When Controlling The Dynamics Of A Supply Ship, IEE Proc.-Control Theory Appl., 153(2), 228-236, 2006.

46. Bağış, A., Determination of the PID Controller Parameters by Modified Genetic Algorithm for Improved Performance, Journal of Information Science and Engineering 23, 1469-1480, 2007.

47. Chen, Y.Y., Huang, P. Y., Design of PID Controller for Precision Positioning Table Using Genetic Algorithms, Proceedings of the 36th Conference on Decision and Control, USA, December, 1977.

48. Shen, J.C., New Tuning Method for PID Controller, ISA Trans., 41(4), 473-84, 2002.

49. Shen, J.C., Fuzzy Neural Networks for Tuning PID Controller for Plants With Underdamped Responses, IEEE Trans. on Fuzzy Systems, 9(2), 2001.

50. Karaboğa, D., Kalınlı, A., Tuning PID Controller Parameters Using Tabu Search Algorithm, Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 134-136, 1996.

51. Dandıl, B., Gökbulut, M., Ata, F., Genetik Algoritma ile Model Referans PID Denetleyici TAsarımı, F.Ü. Fen ve Müh. Bilimleri Dergisi, 14(2), 33-43, 2002.

52. Johnson, M.A., Moradi, M.H., PID Control: New Identification and Design Methods, Springer-Verlag, USA, 2005.

53. Takagi T., Sugeno, M., Fuzzy Identification of Systems and its Applications to Modeling and Control, IEEE Trans., Syst. Man, Cybern., SMC-15, 116-132,1985.

54. Wang, F. S., Juang, W. S., Chan, C. T., Optimal Tuning of Cascade PID Control Systems, Second IEEE Conference on Control Applications, September 1993, Vancouver, B.V.

55. Gupta, R. K., Bhunia, A. K., An Application of real-coded Genetic Algorithm (RCGA) for integer linear programming in Production-Transportation Problems with flexible transportation cost, AMO-Advanced Modeling and Optimization, 8(1), 2006.

56. Gündoğdu, Ö., Optimal-Tuning of Pid Controller Gains Using Genetic Algorithms, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, Journal of Engineering Sciences, 11(1), 131-135, 2005.

57. Pereira, D. S., Pinto, J. O. P., Genetic Algorithm Based System Identification and PID Tuning for Optimum Adaptive Control, Proceedings of the 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics Monterey, California, USA, 24-28 July, 2005.

58. Akay, R., Memetik Algoritma Kullanarak PID Denetleyici Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, 2006.

ÖZGEÇMİŞ

Adı : Asuman

Soyadı: SAVAŞÇIHABEŞ

Öğrenim Bilgisi:

İlkokul :F. Zehra Dülgeroğlu İlkokulu

Orta-Lise : Fatma Kemal Timuçin Anadolu Lisesi

Lisans : Erciyes Üniversitesi Elektronik Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans: Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Görev Bilgisi:

Gazi Üniversitesi, Araştırma Görevlisi

İletişim Bilgisi:

e-posta: asu_mans@yahoo.com