



T.C.

TOKAT GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

**ZAMAN GECİKMESİNE SAHİP KESİR DERECELİ SİSTEMLERİN
SMITH ÖNGÖRÜCÜ TABANLI KONTROLÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Nisa SEÇİLMİŞ

Doç. Dr. Tufan DOĞRUEK

TOKAT- 2025

ETİK SÖZLEŞME

Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Doç. Dr. Tufan DOĞRUER danışmanlığında hazırlamış olduğum “Zaman Gecikmesine Sahip Kesir Dereceli Sistemlerin Smith Öngörücü Tabanlı Kontrolü” adlı Yüksek Lisans tezinin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

25/04/2025

Nisa SEÇİLMİŞ

JÜRİ KABUL VE ONAY



TEŞEKKÜRLER

Yüksek lisansa başladığım ilk günden itibaren benden desteğini hiç esirgemeyen, daima motive edip bilgisi ile yol gösteren çok değerli danışman hocam Doç. Dr. Tufan DOĞRUER'e,

Hayatımın her anında olduğu gibi tez çalışması sürecinde de her zaman yanımda olan ve beni sevgiyle destekleyen babam Ahmet SEÇİLMİŞ'e, annem Sevda SEÇİLMİŞ'e ve biricik ablalarım Şura ve Büşra SEÇİLMİŞ'e,

Süreci en iyi şekilde yönetmeme yardım eden, her türlü teknik desteğiyle işimi kolaylaştıran meslektaşım, canım eşim Cabir ÖZGEN'e sonsuz teşekkür ederim.

ÖZET

ZAMAN GECİKMESİNE SAHİP KESİR DERECELİ SİSTMLERİN SMITH ÖNGÖRÜCÜ TABANLI KONTROLÜ

Nisa SEÇİLMİŞ

Yüksek Lisans, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Tufan DOĞRUER

Nisan 2025, 64+vii sayfa

Smith öngörücü, zaman gecikmeleri olan sistemler için yaygın olarak benimsenen bir kontrol stratejisidir ve gecikmenin olumsuz etkilerini telafi ederek gelişmiş kararlılık ve performans sağlar. Bu tez çalışmasında, zaman gecikmesiyle karakterize edilen kesirli mertebeden sistemler için Smith öngörücü tabanlı kontrolörlerin tasarımına odaklanılmaktadır. Gerçek dünyada var olan sistemleri tamsayı dereceli sistemlerden daha doğru bir şekilde modelleme yetenekleri olan kesirli dereceli sistemler, tamsayı olmayan dinamikleri nedeniyle kontrol tasarımında zorluklar ortaya koymaktadır. Önerilen yaklaşım, daha üstün bir kontrol performansı elde etmek için Smith öngörücünün yeteneklerini kesirli hesabın esnek modelleme gücüyle birleştirir. Kontrolör parametrelerini belirlemek için Ateş Böceği ve Genetik Algoritmanın üstün taraflarını birleştiren hibrit bir optimizasyon algoritması kullanılarak analiz yürütülmüştür. Zaman gecikmeleri olan çeşitli kesirli dereceden sistemler için simülasyon çalışmaları sunularak önerilen yöntemin etkinliği gösterilmiştir. Sonuçlar, geleneksel yöntemlere kıyasla sistem kararlılığında, tepki süresinde ve sağlamlıkta önemli iyileştirmeler ortaya koyarak bu yaklaşımı gelişmiş kontrol uygulamaları için umut verici bir çözüm haline getirir.

Anahtar Kelimeler: Kesir Dereceli Sistemler, Kontrolör Tasarımı, Smith Öngörücüsü, Meta-Sezgisel Algoritmalar, Optimizasyon

ABSTRACT

SMITH PREDICTOR BASED CONTROL OF FRACTIONAL ORDER SYSTEMS WITH TIME DELAY

Nisa SECILMIS

Master's Thesis, Department of Electric-Electronics Engineering

Supervisor: Doç. Dr. Tufan DOGRUER

April 2025, 64+vii pages

The Smith predictor is a widely adopted control strategy for systems with time delays, providing improved stability and performance by compensating for the negative effects of delay. This thesis focuses on the design of Smith predictor based controllers for fractional order systems characterized by time delay. Fractional order systems, which have the ability to model real-world systems more accurately than integer-order systems, present challenges in control design due to their non-integer dynamics. The proposed approach combines the capabilities of the Smith predictor with the flexible modelling power of fractional calculus to achieve superior control performance. Analysis is conducted using a hybrid optimization algorithm that combines the advantages of Firefly and Genetic Algorithm to determine the controller parameters. Simulation studies for various fractional order systems with time delays are presented to demonstrate the effectiveness of the proposed method. The results reveal significant improvements in system stability, time response, and robustness compared to traditional methods, making this approach a promising solution for advanced control applications.

Keywords: Fractional Order Systems, Controller Design, Smith Predictor, Meta-Heuristic Algorithms, Optimization

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR	vii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	6
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	9
3.1 Kesir Dereceli Sistemler ve Yaklaşım Modelleri.....	9
3.1.1 Oustaloup Yaklaşım Yöntemi	10
3.1.2 Matsuda Yaklaşım Yöntemi	11
3.1.3 Carlson Yaklaşım Yöntemi.....	12
3.1.4 CFE (Sürekli Kesir Açılımı) Yaklaşım Yöntemi	13
3.2 Kontrolör Yapıları	13
3.2.1 PID Kontrolörler	13
3.2.2 Smith Öngörücüsü.....	16
3.2.3 Performans Ölçütleri.....	19
3.3 Meta-Sezgisel Algoritmalar	21
3.3.1 Meta-Sezgisel Algoritmalar İle Kontrolör Parametrelerinin Ayarlanması	21
4. BENZETİM ÇALIŞMASI	32
4.1 Örnek 1.....	33
4.2 Örnek 2.....	38

4.3 Örnek 3.....	44
4.4 Örnek 4.....	51
KAYNAKLAR	60
ÖZGEÇMİŞ	64



ŞEKİLLER DİZİNİ

- Şekil 1.1. Birim geri beslemeli kontrol sisteminin blok diyagramı
- Şekil 3.1. PID kontrolör içeren bir kontrol sisteminin blok diyagramı
- Şekil 3.2. Smith öngörücü yapısı
- Şekil 3.3. Smith öngörücüsü düzenlenmiş yapısı
- Şekil 3.4. Smith öngörücüsü indirgenmiş yapısı
- Şekil 3.5. Meta-Sezgisel Algoritmaların sınıflandırılması
- Şekil 3.6. Ateş Böceği Algoritma Yapısı
- Şekil 3.7. Genetik Algoritma Yapısı
- Şekil 4.1. Örnek 1 için oluşturulmuş Simulink modeli
- Şekil 4.2. Farklı amaç fonksiyonları için yakınsama eğrileri (Örnek 1)
- Şekil 4.3. Farklı amaç fonksiyonlarına göre tasarlanan sistemler için birim basamak cevap eğrileri
- Şekil 4.4. Örnek 2 için oluşturulmuş Simulink modeli
- Şekil 4.5. Farklı amaç fonksiyonları için yakınsama eğrileri (Örnek 2)
- Şekil 4.6. Farklı amaç fonksiyonlarına göre tasarlanan sistemler için birim basamak cevap eğrileri
- Şekil 4.7. Örnek 3 için oluşturulmuş Simulink modeli
- Şekil 4.8. Farklı amaç fonksiyonları için yakınsama eğrileri (Örnek 3)
- Şekil 4.9. Farklı amaç fonksiyonlarına göre tasarlanan sistemler için birim basamak cevap eğrileri
- Şekil 4.10. Örnek 4 için oluşturulmuş Simulink modeli
- Şekil 4.11. Farklı amaç fonksiyonları için yakınsama eğrileri (Örnek 4)
- Şekil 4.12. Farklı amaç fonksiyonlarına göre tasarlanan sistemler için birim basamak cevap eğrileri

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1.	Oustaloup tamsayı dereceli yaklaşık transfer fonksiyonlar çizelgesi
Çizelge 3.2.	Matsuda tamsayı dereceli yaklaşık transfer fonksiyonlar çizelgesi
Çizelge 3.3.	K_p , K_i , K_d kazançlarının artışının sisteme etkisi
Çizelge 4.1.	Farklı amaç fonksiyonlarına göre elde edilen PID kontrolör parametreleri
Çizelge 4.2.	Farklı amaç fonksiyonlarına göre tasarlanan sistemler için zaman cevabı karakteristikleri
Çizelge 4.3.	Farklı amaç fonksiyonlarına göre elde edilen I-PD kontrolör parametreleri
Çizelge 4.4.	Farklı amaç fonksiyonlarına göre tasarlanan sistemler için zaman cevabı karakteristikleri
Çizelge 4.5.	Farklı amaç fonksiyonlarına göre elde edilen PID kontrolör parametreleri
Çizelge 4.6.	Farklı amaç fonksiyonlarına göre tasarlanan sistemler için zaman cevabı karakteristikleri
Çizelge 4.7.	Farklı amaç fonksiyonlarına göre elde edilen PI kontrolör parametreleri
Çizelge 4.8.	Farklı amaç fonksiyonlarına göre tasarlanan sistemler için zaman cevabı karakteristikleri

SİMGELER VE KISALTMALAR

KDKS	Kesir Dereceli Kontrol Sistemi
KDTF	Kesir Dereceli Transfer Fonksiyon
PD	Oransal-Türevsel (Proportional-Derivative) Kontrolör
PI	Oransal-İntegral (Proportional-Integral) Kontrolör
PI ^λ	Kesir Dereceli PI Kontrolör
PID	Oransal-İntegral-Türevsel(Proportional-Integral-Derivative) Kontrolör
PI ^λ D ^γ	Kesir Dereceli PID Kontrolör
IAE	Hatanın Mutlak Değerinin İntegrali (Integral Absolute Error)
ISE	Hatanın Karesinin İntegrali (Integral Squared Error)
ITAE	Hatanın Zaman Ağırlıklı Mutlak Değerinin İntegrali (Integral Time-weighted Absolute Error)
ITSE	Hatanın Zaman Ağırlıklı Karesinin İntegrali (Integral Time-weighted Squared Error)
GA	Genetik Algoritma
FA	Ateş Böceği Algoritması
CFE	Sürekli Kesir Açılımı

1. GİRİŞ

Kesir dereceli sistemler; tam sayı olma zorunluluğu bulunmayıp diferansiyel denklemlerle ifade edilen, türev derecelerinin bir reel sayı olduğu sistemlerdir. Kesir dereceli matematiğin temelleri, 1695 yılında L'Hospital'ın Leibniz'e yazdığı bir mektupta, bir fonksiyonun n. dereceden türevinin $D^n f(x)/Dx^n$ için $n=1/2$ olması durumunda ortaya çıkabilecek sonucu sormasıyla atılmıştır. Kesir dereceli türevin fiziksel yorumunu yapmak ve tamsayı dereceli türevlerle ilişkilendirilmiş tanımlarını oluşturmak oldukça karmaşıktır. Bu nedenle, bu konu uzun yıllar boyunca çözölemeyen bir problem olarak görölmüştür (Das, 2008). Zamanla, Euler, Fourier ve Abel gibi önlü matematikçiler bu alanda çalışmalar yapmış, farklı yaklaşımlar ve yöntemler geliştirerek kesir dereceli türev kavramına açıklık getirmeye çalışmışlardır (Keith Oldham, 1974). Kesir dereceli matematiğin esas formölü, tam sayı dereceli sistemlerin genelleştirilmiş hali Denklem 1.1'deki gibidir.

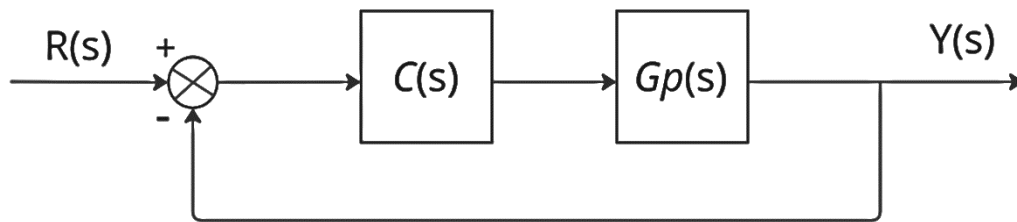
$${}_a D_t^\alpha = \begin{cases} \frac{d^\alpha}{dt^\alpha} & \alpha > 0, \\ 1 & \alpha = 0, \\ \int_a^t (d\tau) & \alpha < 0, \end{cases} \quad (1.1)$$

Burada ${}_a D_t^\alpha$ tam sayı dereceli olmayan türev ve integrali ifade eder. Denklemdeki a ve t integralin alt ve üst sınırlarını, α ise kesir derecesini belirtir. Riemann-Liouville, Grünwald-Letnikov ve Caputo bu alanda çalışma yapmış iyi bilinen matematikçilerdendir. Kesir dereceli türev ve integral alanında Riemann-Liouville denklemi oldukça yaygındır.

Kesir dereceli sistemler, belirtilen çalışma alanlarının yanı sıra kontrol mühendisliğinde de önemli bir ilgi odağı haline gelmiştir. Kesir dereceli sistemlerin kontrol mühendisliği alanındaki kullanımı, 1945 yılında Bode'nin geri besleme prensiplerine dayalı yükselteç tasarımıyla başlamıştır (Manabe, 2003). Bu tasarımın amacı, yükseltecin doğrusal

olmayan özellikler göstermesi durumunda bile doğrusal yapısını ve kararlı kazancını sürdürebilmesini sağlamaktır (Bode, 1945).

Kontrol sistemleri, bir sistemin belirli bir giriş karşısında çıkışa istenilen şekilde tepki vermesini sağlayan mekanizmalardır. Bu düzenekler, bir cihazın ya da sürecin istikrarlı, doğru ve güvenilir bir şekilde çalışmasını sağlayarak performansı artırmayı amaçlar. Bu sistemler gelişen teknolojiler ile birlikte her geçen gün kullanım alanını genişletmiştir. Bu ilginin artmasındaki en önemli etken ise kontrol sistemlerinin günlük yaşamda karşılaşılan en basit sistemlerden, endüstrideki en karmaşık sorunlara kadar karşımıza çıkmasıdır. Kontrol sistemleri kendi içinde açık ve kapalı çevrim kontrol olarak iki farklı sisteme bölünür. Açık çevrim kontrol sistemleri kontrolör ve kontrol edilen sistem olarak ikiye ayrılır. Burada giriş işaretinin bir fonksiyonu olarak çıkış işareti biçimlenir. Ayrıca açık çevrim kontrol sistemlerinde giriş değeri sistemin çıkışından etkilenmez. Kapalı çevrim kontrol sistemleri kontrolör, kontrol edilen sistem ve geri besleme elemanı olarak üçe ayrılır. Giriş işaretinin çıkış işaretine veya çıkış işaretinden üretilen bir işaretle referans giriş işareti arasındaki farka veya toplama bağlı olduğu kontrol sistemi geri beslemeli kontrol sistemidir. Şekil 1.1’de, basit bir kapalı çevrim kontrol sisteminin blok diyagramı sunulmuştur. Diyagramda, $C(s)$ yöneten sistem, $Gp(s)$ ise yönetilen sistem olarak ifade edilmektedir.



Şekil 1.1. Birim geri beslemeli kontrol sisteminin blok diyagramı

Kontrol sistemlerinde temel görev üstlenen kontrolörler, sistemin çıkış değeri ile referans değeri arasındaki farkı minimuma indirmek için çalışır. Bu kontrolörler, çıkışı referans değerinde sabit tutmayı amaçlayan bir yazılım ya da elektronik devre olarak tasarlanabilir.

Kontrolörler, temel olarak ayrık ve sürekli olmak üzere iki gruba ayrılır. Ayrık kontrolörlerde, sistemin çıkışı yalnızca belirli ayrık değerlere sahip olabilir ve bu durum, kontrolörlerin iki konumlu, üç konumlu veya çok konumlu olarak sınıflandırılmasına olanak tanır. Sürekli kontrolörler ise, çıkış değerinin belirli bir aralık içerisinde herhangi bir değeri alabilmesiyle karakterize edilir (Pradesh, 2022). Sürekli kontrolörlere, oransal (P), integral (I) ve türev (D) kontrolörler örnek olarak verilebilir. Ayrıca, bu kontrolörler birleştirilerek oransal-integral (PI), oransal-türev (PD) ve oransal-integral-türev (PID) gibi kombinasyonlar oluşturulmuştur. Bir sistem hem kesir dereceli olabilir hem de kontrolünü sağlayan kontrolör kesir dereceli bir yapıya sahip olabilir. Dinamik sistemlerde kesir dereceli kontrolör kullanımı fikri, ilk kez A. Oustaloup tarafından geliştirilmiş olan CRONE (Controle Robuste d'Ordre Non Entier) kontrolörüyle ortaya çıkmıştır (I. Podlubny L. D., 1997). Oustaloup, kontrolörlerin klasik PID kontrolörlere kıyasla sunduğu üstünlükleri de göstermiştir. Ayrıca, 1994 yılında Podlubny, PID kontrolörlerin kesir dereceli bir versiyonu olarak $PI^\lambda D^\mu$ kontrolör yapısını literatüre kazandırmıştır. Kesir dereceli PID kontrolör zaman ve frekans domenlerinde şu şekilde ifade edilmektedir:

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s^\lambda} + K_d s^\mu \quad (1.2)$$

$$u(t) = K_p e(t) + K_i D^{-\lambda} e(t) + K_d D^\mu e(t) \quad (1.3)$$

Eskiden endüstriyel süreçlerde sistemlerin kontrolünde klasik PID kontrolörler yeterli olur iken günümüzde daha karmaşık sistemleri etkili bir şekilde kontrol edebilmek için bu kontrolörlerin yerini kesir dereceli PID (FOPID) kontrolörler almaya başlamıştır (Adeel Ahmad Jamil, 2022). İlk kez Podlubny (1994) tarafından önerilen FOPID kontrolör, K_p , K_i , K_d parametrelerine ek olarak λ (integral teriminin kesir derecesi) ve μ (türev teriminin kesir derecesi) parametrelerini içermesiyle, klasik PID kontrolöre kıyasla daha esnek kontrol sistemleri tasarlamaya olanak tanımaktadır. Ayrıca, yapılan araştırmalar, FOPID kontrolörlerin klasik PID kontrolörlere göre daha üstün kontrol performansı sunduğunu göstermektedir. Bir sistemin istenen performansı gösterebilmesi ve istikrarlı bir şekilde çalışabilmesi için kontrolörlerin parametrelerinin en uygun şekilde ayarlanması büyük önem taşır.

Zaman gecikmesi, kontrol sistemlerinde büyük bir meydan okuma olarak karşımıza çıkar. Giriş sinyalindeki bir değişikliğin etkisi, çıkışta belirli bir süre gecikmeli olarak görüldüğünde, sistemin dinamik davranışı önemli ölçüde değişir. Bu değişim, kontrol işlemlerini daha karmaşık hale getirir ve istenen performansın elde edilmesini zorlaştırır. Gecikme, sistemin kararlılığını azaltarak salınımlara ve potansiyel olarak kararsızlığa yol açabilir. Bu tür durumlar, sistemin kararlılığını korumak için ek önlemler alınmasını gerektirir. Kontrol sistemlerinde zaman gecikmesi, genellikle endüstriyel proseslerde ve büyük ölçekli sistemlerde ortaya çıkar. Örneğin, kimyasal süreçlerde veya enerji üretim tesislerinde, giriş sinyalinin etkisinin çıkışta belirli bir süre gecikmeli olarak görülmesi sıkça karşılaşılan bir durumdur. Bu gecikmeler, sistemin yanıt süresini uzatarak anlık değişimlere ve bozulmalara karşı duyarlılığını azaltır. Ayrıca, operatörlerin ve kontrolörlerin hızlı ve doğru müdahalelerde bulunmasını zorlaştırır. Zaman gecikmesinin etkilerini minimize etmek için çeşitli kontrol teknikleri ve yöntemler geliştirilmiştir. Örneğin, Smith öngörücüsü, Model tahmini kontrol ve adaptif kontrol gibi yöntemler, gecikmenin etkilerini telafi etmeye ve sistemin performansını iyileştirmeye yönelik çözümler sunar. Ayrıca, kontrolör parametrelerinin optimize edilmesi ve uygun matematiksel modellerin kullanılması, gecikmeli sistemlerin daha etkin bir şekilde kontrol edilmesini sağlar.

Zaman gecikmesinin yanı sıra sistemin kesir dereceli olması, kontrol problemlerini daha da karmaşık hale getirir. Kesir dereceli sistemler ise, klasik tam sayı dereceli modellerden farklı olarak, sistemin hafıza etkilerini ve uzun süreli dinamik davranışlarını daha doğru bir şekilde temsil eder. Bu tür sistemler, daha geniş bir frekans bandında hassas yanıtlar sağlayarak, daha gerçekçi modeller sunar. Ancak, zaman gecikmesinin kesir dereceli sistemlerle birleşmesi, sistemin kararlılığını ve performansını olumsuz yönde etkiler. Gecikme etkisi, kesir dereceli modelin hassas dinamik yanıtlarını geciktirir ve kontrolör tasarımını daha da zorlaştırır. Zaman gecikmesi ve kesir dereceli sistemlerin bir arada bulunması, kontrol işlemlerini oldukça zorlaştırır ve bu durumlarda PI veya PID kontrolörlerin etkili olması genellikle mümkün olmaz. Tam sayı dereceli sistemler için tasarlanmış olan bu kontrolörler, zaman gecikmesi ve kesir dereceli dinamiklerin birleştiği sistemlerde istenen kararlılığı ve kontrol performansını sağlayamazlar. Bu durum, kontrol sistemlerinde daha gelişmiş ve hassas yöntemler kullanılmasını gerektirir. Model tahmini kontrol, kesir dereceli PID kontrolörler ve adaptif kontrol gibi ileri

teknikler, bu tür karmaşık sistemlerin etkin bir şekilde kontrol edilmesi için uygun çözümler sunar. Sonuç olarak, zaman gecikmesi ve kesir dereceli sistemlerin bir arada bulunması, sistemin dinamiklerini ve kontrol edilebilirliğini önemli ölçüde karmaşılaştırır ve daha gelişmiş kontrol yöntemlerine ihtiyaç duyulur.

Bu çalışmada, PI, PID ve I-PD kontrolörlerin sistem için en uygun parametrelerini belirlemek amacıyla Genetik Algoritma ve Ateş Böceği Algoritmalarının hibrit hali olan FAGA yöntemi kullanılacaktır. Önerilen yöntem, literatürde yaygın olarak kullanılan zaman ağırlıklı mutlak hata toplamı (ITAE), zaman ağırlıklı hata karesi toplamı (ITSE), mutlak hata toplamı (IAE) ve hata karesi toplamı (ISE) fonksiyonlarıyla karşılaştırılmış ve bu değerlendirme dört farklı örnek üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Tezin ilerleyen bölümleri aşağıdaki şekilde yapılandırılmıştır:

İkinci bölüm “**Literatür Özeti**” başlığı altında sunulmuştur. Bu kısımda, tezde çalışılan konu başlıkları hakkında geniş çaplı bir literatür taraması yapılarak daha önce yapılan bu çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir.

Üçüncü bölümde, “**Materyal ve Metot**” başlığı altında kesir dereceli sistemler ve yaklaşım modelleri ele alınarak, bu sistemlerin matematiksel temelleri ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Kesir dereceli sistemlerin temel ilkeleri, tarihsel gelişimi ve kullanım alanları açıklanmış, bu sistemlerin neden önemli olduğu üzerinde durulmuştur. Ayrıca, kesir dereceli sistemlerin tam sayı dereceli modellere dönüştürülmesi sürecinde kullanılan yöntemler tanıtılmış; bu yaklaşımların sağladığı avantajlar ve karşılaşılan sınırlamalar detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir. Ardından PID kontrolörler tanıtılmış ve tezde kullanılan Smith öngörücü yapısı detaylı anlatılmıştır. Bu kontrolörlerin parametre ayarlamalarında tercih edilen optimizasyon yöntemleri ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Dördüncü bölüm olan “**Benzetim Çalışması**”nda ise farklı dört kesir dereceli sistem örneği üzerinde çalışılmış ve bu sistemlere yönelik kontrolör tasarımları gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar detaylı olarak analiz edilerek tezde sunulmuştur.

Son bölümde ise çalışma genel olarak değerlendirilmiş, gelecekte yürütülebilecek araştırmalar için öneriler sunulmuş ve tezin sağladığı bilimsel katkılar özetlenmiştir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Kesirli dereceli kontrol sistemleri, tamsayı dereceli modellere kıyasla daha doğru ve esnek bir yapı sunarak gerçek dünya sistemlerini daha hassas bir şekilde temsil edebilmesi nedeniyle son yıllarda büyük ilgi görmektedir. Bu sistemler, doğası gereği bellek etkisini barındırdıkları ve geçmiş verilerin sistem yanıtına olan etkisini modelleyebildikleri için özellikle karmaşık sistemlerin kontrolünde tercih edilmektedir. Özyetkin (Özyetkin, 2013) ve Yüce (Yüce, 2008), kesirli türev ve integral kavramlarının kontrol sistemlerindeki etkilerini inceleyerek, farklı kesir dereceleri için tamsayı dereceli yaklaşımlar hesaplamış ve kararlılık sınır eğrisi metodu ile çeşitli kontrolör tasarımlarını test etmişlerdir. Yapılan bu analizler, kesirli dereceli modellerin, sistem davranışlarını daha geniş bir frekans aralığında temsil edebildiğini göstermektedir. Deniz (Deniz F. N., 2017), bu bağlamda, kesir dereceli sistemlerin modelleme ve kontrol uygulamalarına yönelik yeni bir tamsayı dereceli yaklaşım yöntemi geliştirmiş ve bu yöntemin kesirli dereceli zaman gecikmeli sistemler için Smith öngörücüsü tabanlı yeni bir modelleme yöntemiyle daha iyi performans sunduğunu ortaya koymuştur. Sunduğu yöntem ile zaman gecikmeli sistemlerin daha hızlı ve kararlı bir biçimde kontrol edilebilmesi sağlanmıştır.

Tan ve arkadaşları (Nusret, 2020) kesirli dereceli kontrol sistemlerinde kullanılan tamsayı dereceli yaklaşım yöntemlerini karşılaştırmış ve özellikle Matsuda ile Oustaloup yöntemlerinin ileri seviye modellemelerde daha başarılı sonuçlar verdiğini göstermiştir. Bu yaklaşımlar, kesirli türevlerin tamsayı dereceli filtrelerle temsil edilmesini sağlayarak, sayısal simülasyonlarda önemli kolaylıklar sunmaktadır. Doğruer (Doğruer, 2019), kesirli dereceli PID kontrolörlerin hata minimizasyonuna dayalı optimizasyon teknikleriyle geleneksel PID kontrolörlere kıyasla daha yüksek performans sunduğunu belirlemiştir. Özellikle, ITSE, ISE ve ITAE gibi hata bazlı integral performans kriterleri kullanılarak kesir dereceli kontrol sistemlerinin zaman cevabı ve kararlılığı iyileştirilmiş, Genetik Algoritma ile PI, PID ve PI-PD kontrolör parametreleri optimize edilmiştir. Ayrıca çalışmalarda, optimizasyon süreçlerinde Meta-Sezgisel Algoritmaların kullanımının kontrolör başarısını artırdığı vurgulanmıştır.

Zaman gecikmeli sistemlerin kontrolü, kararlılığı sağlamak ve bozucu girişlere karşı etkili bir yanıt elde etmek açısından büyük zorluklar içermektedir. Bu tür sistemler, ölü

zamanın varlığı nedeniyle klasik kontrol stratejileriyle yeterli performans gösterememekte ve sistem kararsızlığa yatkın hale gelebilmektedir. Kaya ve Cengiz (Kaya, 2021) kararlı ters cevaplı artı zaman gecikmeli sistemler için optimal PI kontrolör tasarımı yaparak hata sinyalinin minimize etmeye yönelik analitik bağıntılar türetmiş ve MATLAB simülasyonları ile önerilen yöntemin başarısını test etmiştir. Bu tür çalışmalar, zaman gecikmeli sistemlerin kontrolünde yeni yöntemlerin ne denli gerekli olduğunu göstermektedir. Doğruer, Tan ve Yüce (Doğruer Tufan T. N., 2017) tarafından yapılan çalışmalarda, zaman gecikmesine sahip kesir dereceli sistemlerin PID kontrolörler ile optimize edilerek başarılı bir şekilde kontrol edilebileceği gösterilmiştir. Söz konusu çalışmalar, kesirli kontrolörlerin özellikle geçici rejim performanslarında klasik kontrolörlere üstünlük sağladığını ortaya koymaktadır.

Zaman gecikmeli sistemlerin denetiminde Smith öngörücüsü, ölü zamanın etkilerini telafi ederek daha kararlı ve hızlı bir kontrol sağlamak amacıyla geliştirilmiştir. Smith tarafından önerilen bu model tabanlı yaklaşım, özellikle büyük ölü zaman içeren sistemlerde geleneksel PID kontrolörlerin yaşadığı hassasiyet ve kararlılık problemlerini çözmek için kullanılmaktadır. Smith yapısı, sistemin gecikmeli kısmını modelleyerek kontrolörün bu kısmı göz ardı etmesini sağlar ve bu sayede sistem yanıtı hızlanır. Yılmaz (Yılmaz, 2020), Doe ve Smith (Doe, 2021), Smith öngörücüsünün tarihsel gelişimini ve modern adaptif kontrol teknikleriyle entegrasyonunu incelemişlerdir. Bu çalışmalar, Smith yapısının günümüz kontrol stratejilerine ne derece entegre edilebildiğini göstermesi açısından önemlidir. Uma ve Rao (Rao, 2018), gecikmeli kararsız sistemler için referans izleme ve bozucu reddetme kontrol stratejilerini içeren iki aşamalı bir Smith öngörücüsü yapısı tasarlayarak, PID kontrolörü ve gecikmeli filtrelerin sistem performansını önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermiştir. Bu tip modifikasyonlar sayesinde, klasik Smith yapısının sınırları aşılmış ve daha kompleks sistemlerde de kullanılabilir hale gelmiştir.

Astrom ve arkadaşları (K. J. Astrom, 1994), Smith öngörücüsünün entegre edici süreçlerde yük bozucularına karşı yetersiz performans sunduğunu ve bu problemi çözmek için yenilikçi bir Smith öngörücüsü yapısı geliştirilmesi gerektiğini vurgulamıştır. İntegratör içeren sistemlerde, bozucuların etkisinin kalıcı olması nedeniyle klasik yapılar yetersiz kalmakta, bu durum kontrol performansını olumsuz etkilemektedir. Majihi ve

Atherton (Majih, 2005), kararsız ve İntegratör içeren sistemlerin kararlı hale gelebilmesi için iç geri besleme döngüsü içeren bir Smith öngörücüsü geliştirerek, modifiye edilmiş PI-PD kontrolör tasarımı sunmuşlardır. Bu yeni öngörücü yapısı, özellikle referans izleme ve bozucu reddetme açısından önemli iyileşmeler sağlamaktadır. Tasarlanan yapının en dikkat çekici yanı, hem geçici rejim hem de kararlı durum performanslarında klasik yöntemlerden üstün olmasıdır.

Daha yeni araştırmalar, Smith öngörücüsünün farklı türdeki zaman gecikmeli sistemler için modifiye edilerek daha yüksek performans sunduğunu göstermektedir. Vrečko ve arkadaşları (Vrecko, 2006) tarafından yapılan çalışma, Smith öngörücüsü ve türevlerinin zaman gecikmeli sistemlerdeki performans karşılaştırmalarını ele alarak, model tabanlı tahmin yöntemlerinin klasik yaklaşımlara kıyasla daha kararlı ve etkin bir kontrol sunduğunu ortaya koymuştur. Bu çalışma, özellikle farklı sistem dinamiklerine sahip süreçler için Smith yapısının uyarlanabilirliğini ortaya koyması açısından önemlidir. Raja ve Ali (Raja, 2021), Smith öngörücüsünün kapalı döngü zaman sabitlerini belirli bir aralık yerine kesin değerlerle sunarak performansını artıran yeni bir versiyonunu geliştirmiştir. Bu yaklaşım, zaman sabiti belirsizliğini ortadan kaldırarak, kontrol sisteminde daha belirgin ve güvenilir bir yanıt elde edilmesine olanak tanımaktadır.

Sonuç olarak, kesirli dereceli kontrol sistemleri ve Smith öngörücüsü tabanlı kontrolör tasarımları, karmaşık dinamik süreçlerin daha kararlı ve optimize edilmiş bir şekilde kontrol edilmesini sağlayan önemli tekniklerdir. Bu sistemler, modern endüstriyel otomasyon sistemlerinde giderek daha fazla tercih edilmekte ve bu alandaki araştırmalar da paralel olarak artmaktadır. Günümüzde, Genetik Algoritmalar, Parçacık Sürüşü optimizasyonu, Karınca Kolonisi optimizasyonu ve Ateş Böceği optimizasyonu gibi Meta-Sezgisel Algoritmalar, PID kontrolörlerin en uygun parametrelerini belirlemek için etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Bu optimizasyon tekniklerinin daha fazla yaygınlaşmasıyla, endüstriyel otomasyon, robotik sistemler ve süreç kontrolü gibi alanlarda daha akıllı ve adaptif kontrol sistemlerinin geliştirilmesi mümkün hale gelmektedir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde kesir dereceli sisteler tanıtılmıştır. Kesir dereceli sistemlerin matematiksel alt yapısı ve yaklaşım modelleri verilmiştir. Ardından PID kontrolörler ve Smith öngörücü yapısı detaylı anlatılmıştır. Kontrolörlerin parametre ayarlamalarında tercih edilen optimizasyon yöntemleri ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

3.1 Kesir Dereceli Sistemler ve Yaklaşım Modelleri

Kesir dereceli matematik, türev ve integral operatörlerinin üslerinin herhangi bir reel sayı veya karmaşık sayı olarak ele alınıp incelendiği bir matematik dalı olarak tanımlanmaktadır. Kesir dereceli hesaplama, uzun süredir matematik alanında bilinen bir kavramdır. Türev veya integral derecelerinin reel sayı olarak ifade edilebildiği ve diferansiyel denklemlerle tanımlanan sistemler, kesir dereceli sistemler olarak adlandırılır. Kesir dereceli hesaplama alanına Liouville-Riemann, Grünwald-Letnikov ve Caputo gibi matematikçiler değerli katkılarda bulunmuşlardır. Özellikle Caputo tarafından önerilen kesir dereceli diferansiyel denklemler Denklem 3.1 ile ifade edilmektedir (Monje, 2010). Bu formül, kesirli türevlerin Laplace dönüşümünü ifade eder. α terimi kesirli derecedir ve başlangıç koşulları bu dönüşümde yer alır. α pozitif rasyonel bir sayıdır.

$$L\{D^\alpha y(t)\} = s^\alpha L\{y(t)\} - \sum_{i=0}^{[\alpha]-1} s^{\alpha-i-1} \frac{d^i y}{dt^i} \quad (3.1)$$

Denklem 3.2’de ise Grünwald-Letnikov’un ortaya koyduğu kesir dereceli türevin matematiksel ifadesi sunulmaktadır.

$${}_a D_t^\alpha f(t) = \lim_{h \rightarrow 0} h^{-\alpha} \sum_{j=0}^{\frac{t-a}{h}} (-1)^j f(t-jh) \quad (3.2)$$

1960 yılından bu yana araştırmacılar kesir dereceli sistemlere yakınsayan tamsayı dereceli modelleri iyileştirmeye yani sonsuz boyutlu sistemlerin sonlu boyutlu modellerini oluşturmaya çalışmaktadır. Tamsayı dereceli yaklaşım yöntemlerinden en önemli ve temel konularından biri kesir dereceli yaklaşım yöntemleridir. Tamsayı

dereceli yaklaşım yöntemleri zaman ve frekans bölgeleri için farklı yaklaşım yöntemleri içermektedir. Zaman bölgesinde iki temel operatör bulunur. Bunlar Euler ve Tustin operatörleridir. Tustin operatörü sonsuz darbe cevabı şeklinde verilmiştir. Tustin operatörü yüksek frekans altında ayrıştırma yaparken büyük hatalar verebilir. Euler operatörü ise doğrudan güç serisi açılımı şeklinde verilmiştir (Vinagre, Petras, Merchan, & Dorcak, 2001). Kesir dereceli operatörler içinde çok değişik ayrık zamanlı yaklaşım yöntemleri de literatürde yer almaktadır (Carlson, 1961). Frekans bölgesinde bulunan operatörler zaman bölgesine göre daha çeşitlidir ve daha sık kullanılır. Bunlardan başlıcaları Oustaloup, Matsuda, Carlson, CFE yöntemleridir.

3.1.1 Oustaloup Yaklaşım Yöntemi

Kesir dereceli sistemlerin ya da transfer fonksiyonlarının, tamsayı dereceli bir transfer fonksiyonuyla yaklaşıklık ile ifade edilmesine olanak tanıyan bir tekniktir. Bu yöntem, özellikle kontrol sistemlerinde kesir dereceli türev ve integral işlemlerinin pratikte kullanılabilirliğini sağlamak için geliştirilmiştir.

$H(s) = s^\mu$ kesir dereceli bir operatör ve $\mu \in R^+$ olmak üzere transfer fonksiyon Denklem 3.3'teki gibi hesaplanır.

$$\hat{F}(s) = C_0 \prod_{n=1}^N \frac{1 + \frac{s}{\omega_{z,n}}}{1 + \frac{s}{\omega_{p,n}}} \quad (3.3)$$

Oustaloup 1,3 ve 5. dereceden tamsayı dereceli yaklaşık transfer fonksiyonları Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Oustaloup tamsayı dereceli yaklaşık transfer fonksiyonlar çizelgesi

	1. Derece	3. Derece	5. Derece
$s^{0.1}$	$\frac{1.585s + 1}{s + 1.585}$	$\frac{1.585s^3 + 30.71s^2 + 26.34s + 1}{s^3 + 26.34s^2 + 30.71s + 1.585}$	$\frac{1.585s^5 + 68.37s^4 + 403.3s^3 + 367.9s^2 + 51.87s + 1}{s^5 + 51.87s^4 + 367.9s^3 + 403.3s^2 + 68.37s + 1.585}$
$s^{0.2}$	$\frac{2.512s + 1}{s + 2.512}$	$\frac{2.512s^3 + 41.74s^2 + 30.71s + 1}{s^3 + 30.71s^2 + 41.74s + 2.512}$	$\frac{2.512s^5 + 98.83s^4 + 531.7s^3 + 442.3s^2 + 56.87s + 1}{s^5 + 56.87s^4 + 442.3s^3 + 531.7s^2 + 98.83s + 2.512}$
$s^{0.3}$	$\frac{3.981s + 1}{s + 3.981}$	$\frac{3.981s^3 + 56.75s^2 + 35.8s + 1}{s^3 + 35.8s^2 + 56.75s + 3.981}$	$\frac{3.981s^5 + 142.9s^4 + 700.9s^3 + 531.7s^2 + 62.36s + 1}{s^5 + 62.36s^4 + 531.7s^3 + 700.9s^2 + 142.9s + 3.981}$
$s^{0.4}$	$\frac{6.31s + 1}{s + 6.31}$	$\frac{6.31s^3 + 77.14s^2 + 41.74s + 1}{s^3 + 41.74s^2 + 77.14s + 6.31}$	$\frac{6.31s^5 + 206.5s^4 + 924.3s^3 + 639.3s^2 + 68.37s + 1}{s^5 + 68.37s^4 + 639.3s^3 + 924.3s^2 + 206.5s + 6.31}$
$s^{0.5}$	$\frac{10s + 1}{s + 10}$	$\frac{10s^3 + 104.9s^2 + 48.67s + 1}{s^3 + 48.67s^2 + 104.9s + 10}$	$\frac{10s^5 + 298.5s^4 + 1218s^3 + 768.5s^2 + 74.97s + 1}{s^5 + 74.97s^4 + 768.5s^3 + 1218s^2 + 298.5s + 10}$
$s^{0.6}$	$\frac{15.85s + 1}{s + 15.85}$	$\frac{15.85s^3 + 142.5s^2 + 56.75s + 1}{s^3 + 56.75s^2 + 142.5s + 15.85}$	$\frac{15.85s^5 + 431.45s^4 + 1606s^3 + 924.5s^2 + 82.25s + 1}{s^5 + 82.25s^4 + 924.5s^3 + 1606s^2 + 431.45s + 15.85}$
$s^{0.7}$	$\frac{25.12s + 1}{s + 25.12}$	$\frac{25.12s^3 + 193.8s^2 + 66.16s + 1}{s^3 + 66.16s^2 + 193.8s + 25.12}$	$\frac{25.12s^5 + 623.6s^4 + 2117s^3 + 1111s^2 + 90.14s + 1}{s^5 + 90.14s^4 + 1111s^3 + 2117s^2 + 623.6s + 25.12}$
$s^{0.8}$	$\frac{39.81s + 1}{s + 39.81}$	$\frac{39.81s^3 + 264.3s^2 + 77.14s + 1}{s^3 + 77.14s^2 + 264.3s + 39.81}$	$\frac{39.81s^5 + 901.4s^4 + 2790s^3 + 1336s^2 + 98.83s + 1}{s^5 + 98.83s^4 + 1336s^3 + 2790s^2 + 901.4s + 39.81}$
$s^{0.9}$	$\frac{63.1s + 1}{s + 63.1}$	$\frac{63.1s^3 + 358s^2 + 89.94s + 1}{s^3 + 89.94s^2 + 358s + 63.1}$	$\frac{63.15s^5 + 1303s^4 + 3679s^3 + 1606s^2 + 108.45s + 1}{s^5 + 108.45s^4 + 1606s^3 + 3679s^2 + 1303s + 63.15}$

3.1.2 Matsuda Yaklaşım Yöntemi

Bu metot kesir dereceli sistemleri belirli bir frekans bandında modellemek için kullanılan bir yöntemdir. Seçilen noktaların s_k ve $k=0,1,2,\dots$ olduğu varsayılarak transfer fonksiyon Denklem 3.4 ve Denklem 3.5'teki gibi hesaplanır (I. Podlubny I. P., 2002).

$$H(s) = a_0 + \frac{s-s_0}{a_1} \frac{s-s_1}{a_2} \frac{s-s_2}{a_3} \dots, \quad (3.4)$$

$$a_i = v_i(s_i), v_0(s) = H(s), v_{i+1}(s) = \frac{s-s_i}{v_i(s)-a_i} \quad (3.5)$$

Denklem 3.5 kullanılarak s^a için Matsuda metodu ile elde edilen 1., 2. ve 3. dereceden yaklaşık transfer fonksiyonları Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Matsuda tamsayı dereceli yaklaşık transfer fonksiyonlar çizelgesi

	1. Derece	2. Derece	3. Derece
$s^{0.1}$	$\frac{s + 1.6}{s + 1.585}$	$\frac{s^2 + 15.72s + 1.677}{s^2 + 15.72s + 1.677}$	$\frac{s^3 + 49.67s^2 + 41.97s + 1.757}{s^3 + 41.97s^2 + 49.67s + 1.757}$
$s^{0.2}$	$\frac{s + 2.566}{s + 2.566}$	$\frac{s^2 + 20.59s + 2.824}{s^2 + 20.59s + 2.824}$	$\frac{s^3 + 49.67s^2 + 41.97s + 1.757}{s^3 + 41.97s^2 + 49.67s + 1.757}$
$s^{0.3}$	$\frac{s + 4.136}{s + 4.136}$	$\frac{s^2 + 27.28s + 4.796}{s^2 + 27.28s + 4.796}$	$\frac{s^3 + 108s^2 + 65.01s + 5.526}{s^3 + 65.01s^2 + 108s + 5.526}$
$s^{0.4}$	$\frac{s + 6.724}{s + 6.724}$	$\frac{s^2 + 36.75s + 8.266}{s^2 + 36.75s + 8.266}$	$\frac{s^3 + 163.65s^2 + 83.01s + 10.01}{s^3 + 83.01s^2 + 163.65s + 10.01}$
$s^{0.5}$	$\frac{s + 11.1}{s + 11.1}$	$\frac{s^2 + 50.71s + 14.58}{s^2 + 50.71s + 14.58}$	$\frac{s^3 + 254.85s^2 + 108.85s + 18.58}{s^3 + 108.85s^2 + 254.85s + 18.58}$
$s^{0.6}$	$\frac{s + 18.82}{s + 18.82}$	$\frac{s^2 + 72.57s + 26.67}{s^2 + 72.57s + 26.67}$	$\frac{s^3 + 413.75s^2 + 148.2s + 35.85}{s^3 + 148.2s^2 + 413.75s + 35.85}$
$s^{0.7}$	$\frac{s + 33.53}{s + 33.53}$	$\frac{s^2 + 110.3s + 51.85}{s^2 + 110.3s + 51.85}$	$\frac{s^3 + 717.25s^2 + 215s + 73.74}{s^3 + 215s^2 + 717.25s + 73.74}$
$s^{0.8}$	$\frac{s + 66.13}{s + 66.13}$	$\frac{s^2 + 187.85s + 113.1}{s^2 + 187.85s + 113.1}$	$\frac{s^3 + 1401.5s^2 + 350.15s + 170.7}{s^3 + 350.15s^2 + 1401.5s + 170.7}$
$s^{0.9}$	$\frac{s + 170.9}{s + 170.9}$	$\frac{s^2 + 424.3s + 328.6}{s^2 + 424.3s + 328.6}$	$\frac{s^3 + 1401.5s^2 + 350.15s + 170.7}{s^3 + 350.15s^2 + 1401.5s + 170.7}$

3.1.3 Carlson Yaklaşım Yöntemi

Carlson yaklaşım yönteminde kesir dereceli rasyonel transfer fonksiyonlu ifadeye sonsuz bir rasyonel kesir açılımı ile yaklaşılır. Böylece, kesirli sistemin kontrolör tasarımında kullanılabilecek bir model oluşturulur. Bu metot Newton’un iteratif metodunu esas görür.

$R_0(s) = 1$ ve $v = 1/\alpha$ bir tam sayı olmalıdır (Carlson, 1961).

$$R_n(s) = R_{n-1} \frac{(v-1)(R_{n-1}(s))^v + (v+1)G(s)}{(v+1)(R_{n-1}(s))^v + (v-1)G(s)} \quad (3.6)$$

3.1.4 CFE (Sürekli Kesir Açılımı) Yaklaşım Yöntemi

CFE yöntemi tamsayı dereceli yaklaşım hesaplanmasında en yaygın kullanılan yöntemlerden birisidir. Bu metot kesirli türev ya da integral operatörünü sürekli bir kesir olarak açar. Bu açılım belirli sayıda terimle sınırlandırılır. $R(s)$ rasyonel fonksiyonu aşağıdaki gibi sürekli kesir biçiminde olmalıdır (Krishna, 2011).

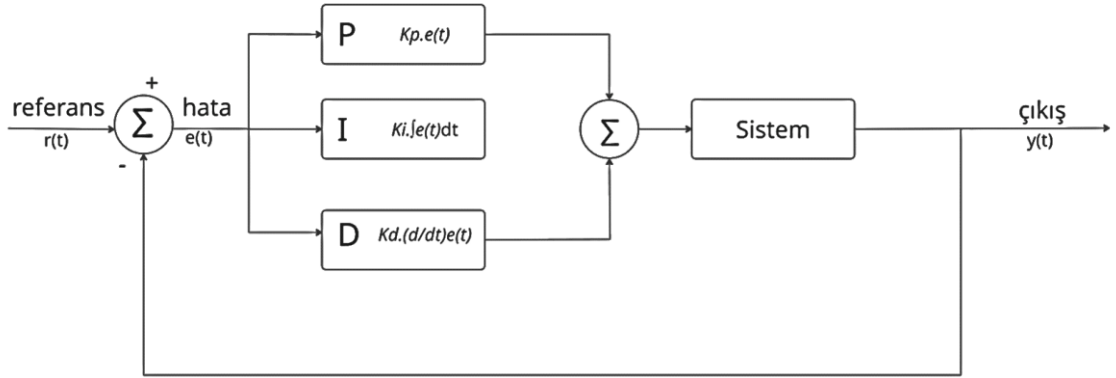
$$R(s) = \frac{1}{b_1s + \frac{1}{b_2s + \frac{1}{\ddots \frac{1}{b_{n-1}s + \frac{1}{b_ns}}}}} \quad (3.7)$$

3.2 Kontrolör Yapıları

Kontrolör yapıları, sistemin davranışını yönlendirmek için giriş sinyalini işleyerek gerekli düzeltmeleri yapan kontrol stratejilerinin uygulandığı yapılardır. Otomatik kontrol sistemlerinde kullanılan bu yapılar, sistemin kararlı, hızlı ve hassas şekilde çalışmasını sağlar.

3.2.1 PID Kontrolörler

PID kontrolör, endüstriyel otomasyon ve sistem mühendisliğinde yaygın olarak kullanılan bir kontrol sistemidir. PID, "Proportional-Integral-Derivative" (Oransal, İntegral, Türevsel) kelimelerinin baş harflerinden oluşur ve bu terimler kontrolörün her bir bileşeninin işlevini tanımlar. PID kontrolörü, bir sistemin kontrol edilen değişkenini istenilen değere (referans değeri) yönlendirmek amacıyla, hata sinyali üzerinde oransal, integral ve türevsel işlemler uygular. Bu üç bileşen, sistemi kararlı hale getirmek ve istenilen performans seviyesine ulaşmak için birlikte çalışır.



Şekil 3.1. PID kontrolör için bir kontrol sisteminin blok diyagramı

3.2.1.1 Oransal (P) Bileşen

Oransal bileşen, sistemdeki hata miktarı ile orantılı bir düzeltme sağlar. Hata, kontrol edilen çıkış ile istenen referans değeri arasındaki farktır. Bu bileşen, hata büyüklüğü arttıkça kontrol sinyalinin de artmasına neden olur. Oransal kontrolör, genellikle sistemin yanıt hızını artırmak için kullanılır. Ancak, yalnızca oransal kontrol kullanmak, sistemin dengeleme noktasına ulaşmasını engelleyebilir ve sabit hata bırakabilir. Matematiksel olarak oransal kontrol şu şekilde ifade edilir:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) \quad (3.8)$$

Burada, $u(t)$ kontrol çıkışı, $e(t)$ hata fonksiyonu ve K_p oransal kazançtır.

3.2.1.2 İntegral (I) Bileşen

İntegral bileşeni, sistemdeki sürekli hatayı ortadan kaldırmaya yönelik bir işlevi yerine getirir. Bu bileşen, hatayı zamanla entegre eder ve hatanın uzun süre devam etmesi durumunda kontrol çıkışını artırarak hata sıfırlanır. İntegral kontrol, statik hataları (örneğin, sabit bir kayma) gidermeye yardımcı olur, ancak fazla integral kazancı kullanıldığında sistemin osilasyon yapmasına yol açabilir. Matematiksel formülasyonu şu şekildedir:

$$u(t) = K_i \cdot \int e(t) dt \quad (3.9)$$

Burada K_i integral kazancı, $e(t)$ hata fonksiyonu ve $\int e(t) dt$ hatanın entegrasyonudur.

3.2.1.3 Türevsel (D) Bileşen

Türevsel bileşen, hata sinyalinin değişim hızına tepki verir. Yani, hata miktarındaki ani değişikliklere hızlı bir şekilde tepki vererek sistemin aşırı tepki vermesini engeller ve dengeye hızlı bir şekilde ulaşmasını sağlar. Türevsel kontrol, özellikle sistemdeki gürültü veya hızlı değişimlerde daha kararlı bir performans sergilemeye yardımcı olur. Ancak, türevsel bileşenin gürültüye duyarlı olması ve sistemdeki küçük hataların büyümesine yol açması mümkündür (Nise, 2011). Matematiksel olarak türevsel kontrol şu şekilde ifade edilir:

$$u(t) = K_d \cdot (d/dt)e(t) \quad (3.10)$$

Burada, K_d türevsel kazanç, $e(t)$ hata fonksiyonu ve $(d/dt).e(t)$ hatanın türevidir.

Referans giriş değeri ile geri besleme yoluyla elde edilen çıkış arasındaki fark, PID kontrolöre iletilir (Kuo, 2005). Bu hata sinyali, K_p oransal katsayı ile çarpılarak sistemin tepkisini oluşturur. Aynı zamanda, hatanın zamana bağlı toplamı K_i integral katsayısı, değişim hızı ise K_d türev katsayısı ile çarpılarak kontrol sinyaline dahil edilir. Bu üç bileşenin toplamı, kontrolörün çıkış sinyalini oluşturur. Daha sonra, bu sinyal kontrol edilen sisteme uygulanarak çıkışın istenilen değere ulaşması sağlanır. Bu işlem döngüsel olarak tekrarlanarak hata en aza indirilmeye veya belirlenen hedef değere yaklaştırılmaya çalışılır. PID kontrolörü, yukarıda açıklanan üç bileşenin toplamından oluşur. Bu bileşenlerin her biri farklı görevleri yerine getirir, ancak birlikte çalışarak sistemi istenen hedefe yönlendirirler. PID kontrolörünün genel çıkışı şu şekilde yazılabilir.

$$u(t) = K_p.e(t) + K_i \cdot \int e(t)dt + K_d \cdot (d/dt)e(t) \quad (3.11)$$

Burada, $u(t)$ kontrol çıkışı, $e(t)$ hata fonksiyonu ve K_p , K_i , K_d sırasıyla oransal, integral ve türevsel kazançlardır.

Her sistemde farklılık gösteren K_p , K_i , K_d kazanç katsayıları, sistem çıkışını doğrudan etkileyen kritik parametrelerdir. Bu katsayılar, sistemin hata azaltma performansını belirleyen ve sistem çalışmaya başlamadan önce belirlenen ayar değerleridir. Farklı

sistemlerde bu parametrelerin etkisi değişiklik gösterebilir; yani, bir sistem için uygun olan kazanç değerleri, başka bir sistemde beklenen sonucu vermeyebilir. Bu kazanç katsayılarının artışının bir sisteme olan etkisi Çizelge 3.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.3. K_p , K_i , K_d kazançlarının artışının sisteme etkisi

	Yükselme Zamanı	Oturma Zamanı	Kalıcı Durum Hatası	Kararlılık	Aşım Oranı
K_p	Azaltır	Arttırır(az)	Azaltır	Azaltır	Arttırır
K_i	Azaltır(az)	Arttırır	Azaltır(çok)	Arttırır	Arttırır
K_d	Azaltır(az)	Azaltır	Küçük değişim	Arttırır	Azaltır

PID kontrolörü, sıcaklık, hız, basınç gibi birçok endüstriyel parametreyi kontrol etmek için yaygın olarak kullanılır. Bu kontrolör, özellikle sistemdeki hataların sürekli izlendiği ve düzeltme yapıldığı uygulamalarda başarılı sonuçlar verir. Bu kontrolörün avantajları arasında hızlı yanıt verme, yüksek doğruluk ve kararlılık sağlama gibi çeşitli özellikler sayılabilir.

PID kontrolörü, doğru kazanç değerlerinin belirlenmesinin zorluğu ile bilinir. Oransal, integral ve türevsel kazançların uygun şekilde ayarlanması gerekir. Aksi takdirde, sistemin performansı düşebilir veya istenmeyen osilasyonlar meydana gelebilir. Ayrıca, PID kontrolörü, sistemdeki doğrusal olmayan davranışları düzgün bir şekilde yönetmekte zorlanabilir (Ogata, 2010).

3.2.2 Smith Öngörücüsü

Kontrol sistemleri, bir sürecin belirlenen hedeflere uygun şekilde işlemlerini sağlamak amacıyla kullanılan düzeneklerdir. Bu sistemler; endüstriyel üretim, ev otomasyonu, enerji yönetimi ve otonom araçlar gibi pek çok alanda uygulanmaktadır. Kontrol sistemleri, genel olarak açık döngü ve kapalı döngü olmak üzere iki kategoriye ayrılmaktadır (Franklin, 2014).

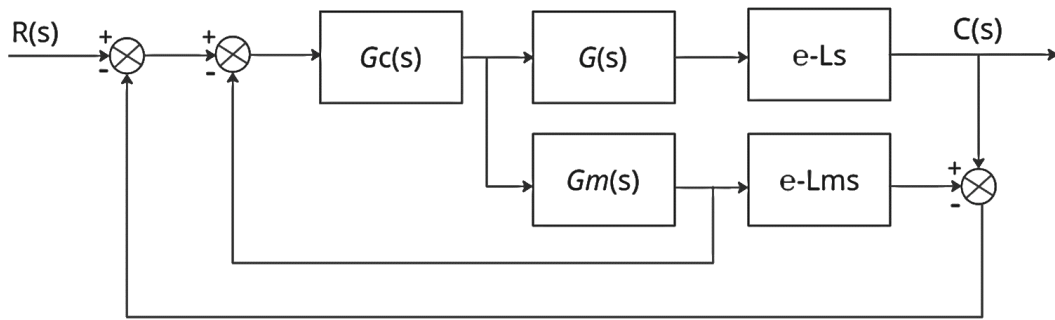
Açık döngü kontrol sistemleri, sürecin giriş değerini belirli bir şekilde ayarlayarak çalışır, ancak sistemin çıkışını geri besleme olarak kullanmaz. Kapalı döngü kontrol olarak da bilinen geri beslemeli kontrol sistemleri, açık döngü kontrol sistemlerinin yetersizliklerini

ortadan kaldırır. Bu sistemlerde, süreç devamlı olarak izlenir ve çıkış değeri girişle kıyaslanarak ortaya çıkan hata sinyaline göre düzeltici bir işlem gerçekleştirilir.

Bazı kontrol sistemlerinde, çıkışın girişe tepki vermesi belirli bir süre alabilir. Bu tarz kontrol performansını ciddi şekilde etkileyebilen ve sistemin kararlılığını riske sokabilen sistemlere zaman gecikmeli (ölü zamanlı) sistemler denir. Zaman gecikmeli sistemler, kontrol sistemlerinde yaygın bir zorluktur. Çünkü giriş ile çıkış arasındaki bu gecikme; sistemin yanıtını tahmin etmeyi, sistem kontrolünü ve hızlı tepki almayı zorlaştırabilir. Bu durum kontrol sistemlerinde doğruluğu ve kararlılığı birinci dereceden etkileyebilir. Otomatik kontrol teorisinde zaman gecikmesi, bir kontrol sisteme uygulanan referans işaretinin etkilerinin, sistem çıkışında belirli bir süre sonra ortaya çıkması durumudur. Zaman gecikmesine sahip sistemler için kesir dereceli olması tam sayı dereceli olmasından daha karmaşık bir durumudur (Arıkan, 1997).

Smith öngörücü yapısı, kapalı döngü sisteminden gecikme zamanını ortadan kaldırmayı hedefler. Bunun için gecikme zamanının sistemden kaldırılması yani kapalı döngüden çıkarılması sistem kararlılığını artırma yönünde yararlı bir adımdır. Şekil 3.2’de Smith öngörücü yapısının blok şeması verilmektedir.

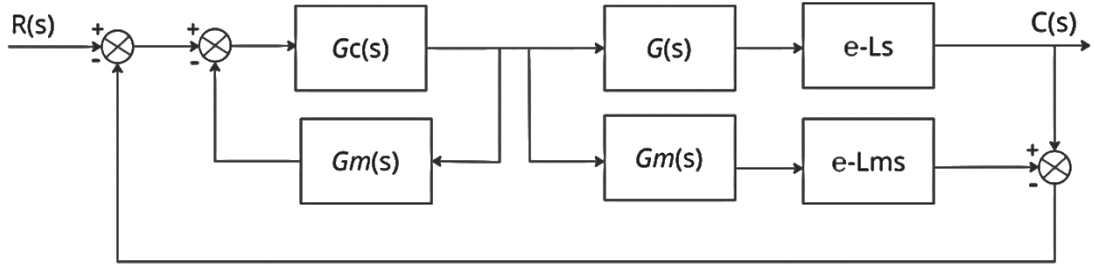
$$G_m(s)e^{-Lms} = G(s)e^{-Ls} \quad (3.12)$$



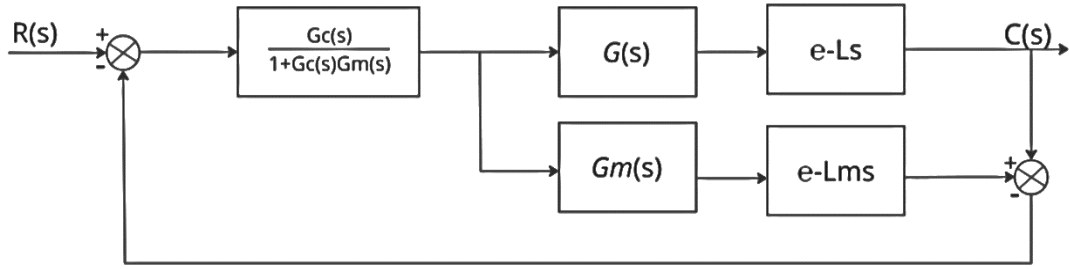
Şekil 3.2. Smith öngörücü yapısı (Astrom, 1992)

Şekil 3.3’te, Şekil 3.2’deki yapı yeniden düzenlenerek, sistemin istenen değeri takip etme performansını değerlendirmeye yarayan bir transfer fonksiyonu elde edilir. Şekil 3.4 ise

Smith öngörücüsünün matematiksel olarak sadeleştirilmiş halidir. Denetleyici yapısı açıkça transfer fonksiyonu biçiminde verildiği için analitik çözümlemeye uygundur.



Şekil 3.3. Smith öngörücüsü düzenlenmiş yapısı (Astrom, 1992)



Şekil 3.4. Smith öngörücüsü indirgenmiş yapısı (Astrom, 1992)

İndirgenmiş Smith öngörücü yapısı Denklem 3.13’de verilmiştir.

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G(s)e^{-Ls}}{1 + G_c(s)G_m(s)} \quad (3.13)$$

Literatürde, zaman gecikmeli sistemlerin kontrolüne yönelik birçok kontrol sistemi yapısı ve kontrolör tasarım yöntemi sunulmuştur. Bu yöntemler arasında, PID kontrolör içeren sistemler yaygın bir şekilde tercih edilmekte olup, PID parametrelerinin belirlenmesine yönelik farklı yaklaşımlar da sıklıkla kullanılmaktadır (O'Dwyer, 2009). Zaman gecikmesinin oluşturduğu olumsuz etkilerin giderilmesi için Smith öngörücü kullanılabilir gelişmiş kontrol yöntemlerinden birisidir.

3.2.3 Performans Ölçütleri

Bir sistemden istenilen tepkiyi elde etmek, kontrol sistemlerinin hedefidir. Performansları değerlendirilen kontrol sistemlerine, birim basamak girişi uygulanır ve çıkış sinyalinin bu girişi en doğru şekilde takip etmesi beklenir. Çıkış sinyalinin geçici ve kalıcı durum cevapları incelenerek sistemin performansı hakkında bilgi edinilir. Kontrol sistemlerinde zaman cevabı parametrelerine dayalı tasarım yapmak zordur. Bu yüzden sistemdeki hatayı temel alarak kontrolör tasarımı yapmak daha iyi bir çözüm yoludur. Hata, giriş ve çıkış işaretleri arasındaki fark olarak tanımlanır ve Denklem 3.14 ile gösterilir (Atherton, 2009). Buradaki $r(t)$ giriş işareti, $y(t)$ ise çıkış işaretidir.

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (3.14)$$

Bir sistemin performansını değerlendirmek için kullanılan integral performans kriterleri, genellikle kontrol sistemleri, sinyal işleme ve diğer mühendislik alanlarında önemlidir. Kontrol sistemlerinin temel hedefi, bir sistemden istenilen cevabı elde etmektir.

PID kontrolörlerin ayar parametrelerini tayin etmek için iyi bilinen yaklaşım yöntemlerinden biri integral performans kriterini kullanmaktır. Literatür araştırmalarında da PID kontrolörlerin integral performans kriterlerini kullanarak optimum ayar parametrelerini bulan birçok çalışma yer almaktadır. Bu duruma verilebilecek bir örnek Chen (1993) ve Dorf ve Bishop (1995) yazdıkları kitaplarında bu konuyla ilgili bölümlere yer vermişlerdir (Chen, 1993) (Dorf, 1995).

Denklem 3.15’de verilen IAE, hatanın mutlak değerinin integralini (Integral Absolute Error) verir. Düşük bir IAE değeri, istenilen performansı gösterir. Denklem 3.16 ile gösterilen ISE, hatanın karesinin integralidir (Integral Squared Error). Aynı şekilde düşük bir ISE değeri, daha iyi bir performansa işaret eder. Denklem 3.17’de verilen ITAE, hatanın zaman ağırlıklı mutlak değerinin integrali (Integral Time Absolute Error) olarak ifade edilir. Denklem 3.18’deki ITSE kriteri ise, hatanın zaman ağırlıklı karesinin integralidir (Integral of Time-Weighted Squared Error). Verilen denklemlerde görülen ve t zamanı, $e(t)$ ise kontrol sisteminde oluşan hatayı açıklar (Atherton, 2009) (Tavazoei, 2010) (Zhuang, 1993).

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)|.dt \quad (3.15)$$

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t).dt \quad (3.16)$$

$$ITAE = \int_0^{\infty} t.|e(t)|.dt \quad (3.17)$$

$$ITSE = \int_0^{\infty} t.e^2(t).dt \quad (3.18)$$

Son olarak Denklem 3.19'de performans ölçütlerine dayalı çok amaçlı (multi-objective) fonksiyon verilmiştir. Çok amaçlı performans fonksiyonu genellikle kontrol sisteminin zaman cevabına ait temel ölçütleri içerecek şekilde tanımlanır ve genel formülü aşağıdaki gibidir (Bingül, 2007).

$$J_{MO} = (1 - e^{-\beta})(M_p + e_{ss}) + e^{-\beta}(t_s - t_r) \quad (3.19)$$

Burada verilen formül parametreleri şu şekilde ifade edilebilir:

J : Optimizasyon amacıyla minimize edilecek toplam amaç fonksiyonu

t_r : Yükselme süresi (rise time)

t_s : Yerleşme süresi (settling time)

M_p : Maksimum yüzde aşma (overshoot)

e_{ss} : Kalıcı hata (steady-state error)

Etkin bir sistemin performansını değerlendirmekte geçici durum cevabı önemli bir kriterdir. Geçici durum cevabı, performans kriterleri olarak adlandırılan; sisteme rampa veya birim basamak giriş sinyali uygulandığında çıkış tepkisindeki yükselme zamanı, yerleşme zamanı, maksimum aşma ve sürekli durum hatalarının ölçümleriyle belirlenir (Boz A. F., 2008). Giriş ve çıkış sinyalleri arasındaki farkın hata sinyalini oluşturduğu bilinmektedir. İdealde, hata sinyalinin sıfır olması beklenen bir durumdur. Yani çıkış

tepkisinin giriş sinyalini tam olarak takip etmesi istenir. Hal böyle olunca da tüm performans kriter değerleri sıfır olur.

3.3 Meta-Sezgisel Algoritmalar

Optimizasyon, bir sistem veya sürecin en iyi duruma getirilmesi veya en ideal sonuca ulaşılması amacıyla yapılan çalışmaları ifade eder. Genellikle belirli bir hedef veya kriter doğrultusunda kaynakların en etkin şekilde kullanılmasını sağlamak için matematiksel, istatistiksel veya mühendislik yöntemlerini içerir. Algoritmalar, doğadaki bu süreçlerin matematiksel modellerini kullanarak çeşitli optimizasyon problemlerinde etkili çözümler sunar. Optimizasyon problemlerindeki esas amaç, en iyi sonucu sağlayan değişken değerlerini belirlemektir. Kontrol sistemlerinde, bu durum hatanın en düşük değerine karşılık gelen kontrolör parametrelerinin bulunması olarak ifade edilir (Doğruer, 2019). Optimizasyon algoritmaları, doğadaki çeşitli süreçlerden ve sosyal hayvanların davranışlarından esinlenmiştir. Yapılan araştırmalarda bilinen klasik yöntemlere göre bu algoritmalar, optimizasyon problemlerinin daha iyi sonuçlarla çözülebildiğini göstermiştir. Optimizasyon algoritmaları, çeşitli problem türlerine ve çözüm yaklaşımlarına göre farklı kategorilere ayrılabilir. Yaygın olarak kullanılan algoritmalar arasında olan Genetik Algoritma gelişime dayalı algoritma sınıfına dahildir ve evrim teorisinden esinlenmiştir. Ateş Böceği Algoritması, Yapay Arı Kolonisi, Karınca Kolonisi Optimizasyonu, Parçacık Sürü Optimizasyonu, Guguk Kuşu Araması gibi algoritmalar popülasyon tabanlı sürü zekasına dayanan algoritmalar.

3.3.1 Meta-Sezgisel Algoritmalar İle Kontrolör Parametrelerinin Ayarlanması

Meta-Sezgisel yöntemler, sezgisel arama tekniklerini daha üst seviyede birleştirerek geniş bir çözüm uzayını etkili bir şekilde taramayı amaçlayan algoritma yöntemleridir. Meta-Sezgisel Algoritmalar, zor ya da karmaşık optimizasyon problemlerini hızlı ve etkin bir şekilde çözmek için kullanılırlar ve genellikle tek bir probleme özgü olmayıp, çeşitli problemler için uygulanabilirler. Bu yöntemler her zaman küresel en iyi çözümü garanti edemese de, yerel en iyi çözüme sıkışmayı önleyerek optimal veya optimale yakın sonuçlar elde edebilirler (Onan, 2013). Geleneksel optimizasyon teknikleri, çözüm uzayının büyüklüğü veya problemin doğasından kaynaklanan yerel minimuma takılma gibi sorunlar nedeniyle yeterince verimli olamayabilir. Meta-Sezgisel Algoritmalar ise

sezgisel arama tekniklerini üst düzeyde birleştirerek geniş bir çözüm uzayında daha etkili bir şekilde arama yapma avantajı sunar. Yani bu algoritmalar geleneksel optimizasyon yöntemlerinin makul bir süre içinde uygun çözümler üretemediği karmaşık problemlerde geniş bir çözüm uzayında etkili bir arama gerçekleştirebilmek için kullanılırlar. Bu yöntemlerin en büyük avantajı, çözüm uzayında etkili bir şekilde gezinerek yerel minimumlara sıkışmadan küresel optimuma ulaşabilmeleridir. Bu algoritmalar, doğadan ilham alarak geliştirilmiş ve her biri farklı optimizasyon prensipleri üzerine inşa edilmiştir. Genetik Algoritmalar, biyolojik evrim prensiplerini kullanarak en iyi çözümleri üretmeye çalışırken; karınca kolonisi optimizasyonu, doğal karınca sürülerinin yiyecek bulma stratejilerini taklit eder. Parçacık Sürüsü optimizasyonu, sürü zekasıyla çözümler arasındaki en iyiyi takip etmeye dayanırken; Ateş Böceği Algoritması ise doğada bulunan Ateş Böceklerinin sosyal etkileşimlerinden esinlenerek geliştirilmiş, sürü zekasına dayalı Meta-Sezgisel bir optimizasyon tekniğidir (Özdemir, 2024). Bu algoritmalar, biyolojik, fiziksel veya sosyal sistemlerden esinlenerek geliştirilmiş olup, mühendislik, yapay zeka, finans, lojistik ve biyoinformatik gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır (Vatansever, 2022). PID kontrolörlerinin katsayılarını optimize etmek, çizelgeleme problemleri, rota optimizasyonu, veri madenciliği, makine öğrenimi, veri analizi ve ağ optimizasyonu gibi geniş ve karmaşık çözüm alanlarına sahip, sorunları çözmede etkili ve esnek yöntemler sunarlar. Aşağıda verilen Meta-Sezgisel Algoritmalar en çok tercih edilen algoritmalarından bazılarıdır. Aynı zamanda bu tez çalışmasında yararlanılan algoritmaları içerir.

Genetik Algoritmalar: Genetik Algoritma 1975 yılında John Holland tarafından geliştirilen bir optimizasyondur (Michalewicz, 1992). Evrimsel biyolojiden ilham alarak genetik varyasyonlar, çaprazlama ve mutasyon gibi biyolojik süreçleri kullanarak çözüm arar.

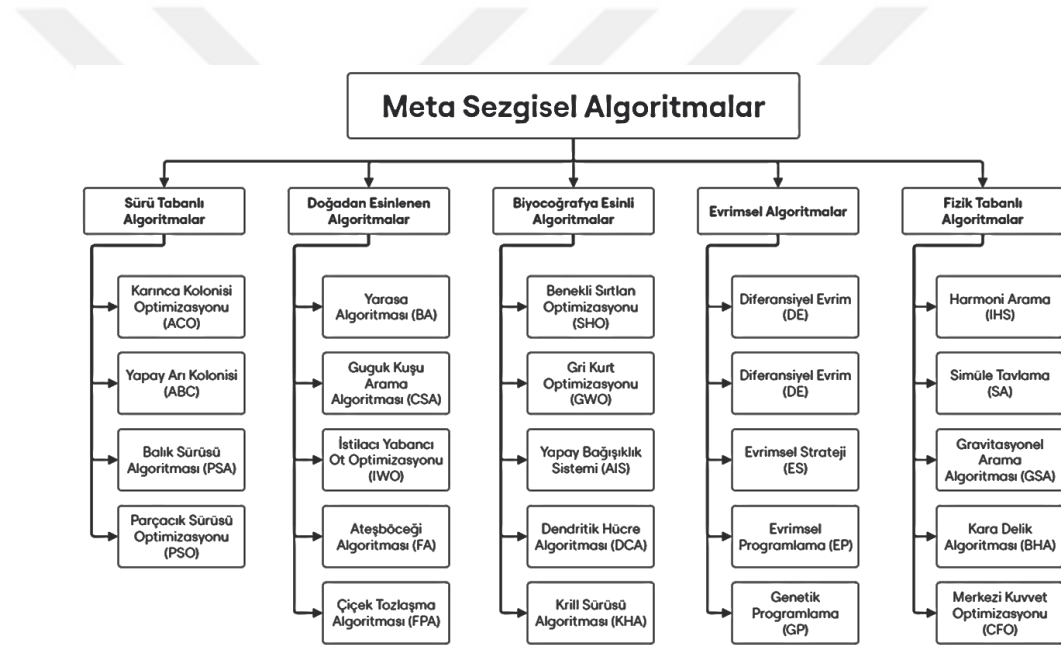
Parçacık Sürü Optimizasyonu: Parçacık sürü optimizasyonu 1995 yılında Kennedy ve çalışma arkadaşları ile birlikte geliştirilmiş bir optimizasyondur (Kennedy, 1995). Kuş ve balık sürülerinin hareketlerini modelleyerek, bireyler arasındaki etkileşimler yoluyla en uygun çözüme varmayı hedefler.

Ateş Böceği Algoritması: Ateş Böceği Algoritması 2008 yılında Xin-She Yang tarafından ortaya çıkmıştır (Aydilek, 2017). Ateş Böceklerinin ışık yayma ve birbirlerine doğru

hareket etme davranışlarını taklit ederek, en iyi çözümü bulmayı amaçlayan bir optimizasyon yöntemi sunar.

Karınca Kolonisi Optimizasyonu: Karınca kolonisi optimizasyonu 1990'lı yıllarda Marco Dorigo tarafından geliştirilmiştir (M. Dorigo, 1996). Karıncaların yiyecek arama esnasında çıkardığı kimyasal salgı ile diğer karıncaların yollar arasında en kısa rotayı bulması prensibi ile çalışır.

Aşağıda görülen Şekil 3.5'deki akış şemasında, Meta-Sezgisel Algoritmaların kategorik olarak sınıflandırılması görülmektedir.



Şekil 3.5. Meta-Sezgisel Algoritmaların sınıflandırılması

3.3.1.1 Ateş Böceği Algoritması

Ateş Böcekleri, tropikal ve ılıman bölgelerde yaşayan, çevresine ışık yayarak etkileyici manzaralar oluşturan canlılardır (Lukasik, 2009). Bu canlılar, iki ana fonksiyon için ışık yayarlar: avlarını cezp ederek yakalamak ve eşlerine kur yaparak çiftleşmek (Fraga, 2008). Ateş Böceklerinin parlaklığı, çözüm kalitesiyle orantılıdır ve daha parlak olan bireyler, diğer bireyleri kendine çeker. Böylece, sistem optimal çözüme yönelir.

Ateş Böceği Algoritması, doğada bulunan Ateş Böceklerinin sosyal etkileşimlerinden esinlenerek geliştirilmiş, sürü zekasına dayalı Meta-Sezgisel bir optimizasyon tekniği olup, bu böceklerin biyoluminesan (ışık yayma) yoluyla kurdukları iletişim davranışlarından esinlenerek geliştirilmiştir. Ateş Böceklerinin bu ışık yayma davranışı, diğer Ateş Böceklerinin dikkatini çekerek onları kendilerine yönlendirir. Bu algoritma ilk kez 2008 yılında Xin-She Yang (Yang X.-S. , Firefly algorithms for multimodal optimization, 2009) (Yang X.-S. , Firefly Algorithm, 2008) tarafından Ateş Böceklerinin parlaklık ve hareket yönlerini dikkate alarak tasarlanmış bir algoritmadır ve çok boyutlu optimizasyon problemlerinin çözümünde etkili bir yöntem olarak kullanılmaktadır.

Ateş Böceklerinin yaydığı ışık, algoritmanın temel mekanizmasını oluşturur. Daha parlak olan Ateş Böceklerine diğer bireyler çekilir, bu da daha iyi çözümlere ulaşmayı sağlar. Algoritmanın amacı, bu çekim kuvvetini kullanarak, aranan en iyi çözüme yaklaşmaktır. Parlaklık, çözüm kalitesine bağlı olarak değişir ve bu davranış, optimizasyon problemlerine uygulanır.

Ateş Böceği Algoritması, mühendislik, yapay zekâ, sinyal işleme ve enerji yönetimi gibi pek çok alanda uygulanmaktadır. Karmaşık problemlerin global optimizasyonuna odaklanır ve özellikle klasik yöntemlerin zorlandığı durumlarda, alternatif çözümler sunabilir.

Temel olarak, Ateş Böceği Algoritması aşağıdaki verilen üç idealleştirilmiş kuralı kullanmaktadır.

1. **Parlaklık ve Uygunluk:** Bir çözümün kalitesini ya da uygunluğunu gösteren parlaklık, her Ateş Böceği için bir objektif fonksiyon tarafından belirlenir.
2. **Çekicilik ve Hareketlilik:** Ateş Böcekleri, birbirlerine olan cazibeleri ve kendi rastlantısal hareketleri sayesinde konumlarını değiştirirler. Böylece, hem genel hem de yerel arama süreçleri yürütülür.
3. **Mesafe ve Çekicilik:** Ateş Böcekleri, parlaklık seviyelerine bağlı olarak birbirlerine çekim uygularlar. Daha parlak olan Ateş Böceği, daha az parlak olanı kendisine çeker (Yang X. S., 2013).

Bu algoritmada ışık yoğunluğu, amaç fonksiyonu olarak kullanılmaktadır. Yayıdıkları kimyasal ışık sayesinde ışığı daha sönük olan Ateş Böcekleri, daha parlak olan Ateş Böceklerine yönelmektedir. Daha parlak olan Ateş Böceği, sönük olanları kendine doğru çekerek cezbetmektedir (Boz A. F., 2017) (Aydilek, 2017).

Ateş Böceği Algoritmasının izlediği temel adımları vardır. Algoritma, başlangıçta rastgele olarak oluşturulan bir Ateş Böceği popülasyonu ile çalışmaya başlar. Bu popülasyondaki her bir Ateş Böceği, çözülmesi hedeflenen optimizasyon problemine yönelik bir potansiyel çözümü ifade eder. Her bir Ateş Böceğinin ışık yoğunluğu, amaç fonksiyonuna göre belirlenir. Işık yoğunluğu, çözümün kalitesiyle doğru orantılıdır; daha kaliteli çözümler, daha parlak Ateş Böcekleri olarak temsil edilir. İki Ateş Böceği arasındaki çekim gücü, mesafe ve ışık yoğunluğu farkına bağlı olarak hesaplanır. Daha parlak Ateş Böceklerine doğru çekilme eğiliminde olan diğer Ateş Böcekleri, bu süreçte daha iyi çözümler bulmaya yönelir. Çekicilik, mesafe arttıkça azalır. Her Ateş Böceği, daha parlak olan Ateş Böceğine doğru bir hareket gerçekleştirir. Bu hareketin büyüklüğü, iki Ateş Böceği arasındaki mesafeye ve aralarındaki çekiciliğe göre belirlenir.

Algoritma, arama alanının çeşitli bölgelerini keşfetmek amacıyla rastgelelik ekleyerek çözüm çeşitliliğini artırır. Bu yöntem, algoritmanın yerel maksimumlara takılmadan daha geniş çaplı bir arama alanını taramasını sağlar. Algoritma, belirlenen iterasyon sayısına ulaştığında veya çözümdeki iyileşme çok azaldığında sona erer. Bu durumda, elde edilen en iyi çözüm, problemin optimal çözümü olarak kabul edilir. Algoritma tamamlandığında, en parlak Ateş Böceği olarak tanımlanan çözüm, problemin en iyi çözümü olarak kabul edilir.

Ateş Böceklerinin parlaklığı / ışık yoğunluğu (I) değeri Denklem 3.20'da görüldüğü üzere başlangıç ışık yoğunluğuna (I_0), ışığın soğurma katsayısına (γ) ve iki Ateş böceği arasındaki uzaklığa (r) bağlıdır.

$$I = I_0.e^{-\gamma r} \quad (3.20)$$

Ateş Böceklerinin çekicilik değeri (β), iki Ateş Böceği arasındaki uzaklığa bağlıdır. Başlangıç değeri β_0 ile gösterilir ve iki Ateş Böceği arasındaki uzaklık sıfır olduğu

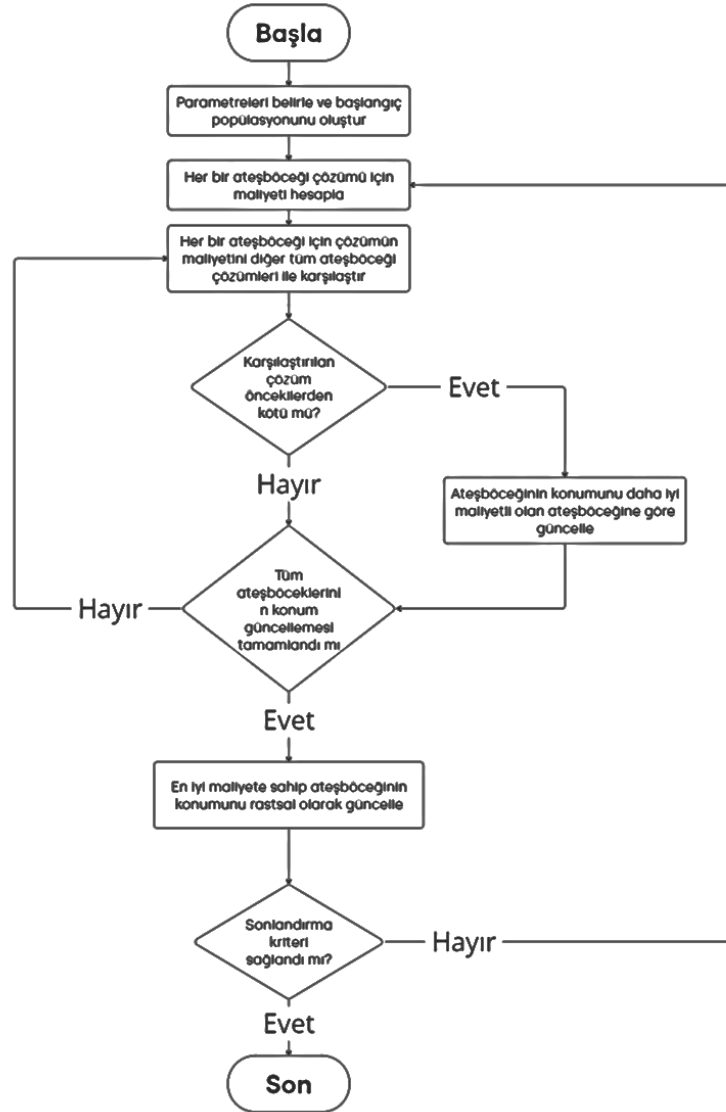
zamanki ($r=0$) çekicilik değerini ifade eder. Çekicilik; uzaklığın karesine, ışığın soğurma katsayısına ve başlangıç değerine bağlıdır ve Denklem 3.21'deki gibi hesaplanır.

$$\beta = \beta_0.e^{-\gamma r^2} \quad (3.21)$$

β değerine bağlı olarak az parlak olan X_i Ateş Böceği, kendisinden daha parlak olan X_j Ateş Böceğine doğru hareket eder. Yapılan bu hareket Denklem 3.22'de verilmiştir. Burada belirtilen α rastgelelik faktörü, ε gauss dağılımı olarak ifade edilir. (Yang X.-S. , Firefly Algorithms for Multimodal Optimization, 2009)

$$\chi_i = \chi_i + \beta(\chi_j - \chi_i) + \alpha.\varepsilon \quad (3.22)$$

Bu formül, Ateş Böceklerinin hareketini ve optimizasyon sürecindeki keşif düzeyini belirler. Şekil 3.6'daki akış şeması Ateş Böceği Algoritmanın işleyişini adım adım açıklamaktadır.



Şekil 3.6. Ateş Böceği Algoritması yapısı (Aydilek, 2017)

Ateş Böceği Algoritması mühendislik problemlerindeki parametre optimizasyonunda, makine öğrenmesi modellerinin hiperparametre optimizasyonunda, büyük veri kümelerinin analizinde veri gruplama ve kümeleme işlemlerini gerçekleştirmede, sınır ağı eğitimi sırasında ağırlıkların optimize edilmesi sürecinde, enerji verimliliğini artırmak için enerji sistemlerinde parametre ayarlamaları yapılması gereken alanlarda ve daha birçok uygulamada çokça kullanılır.

3.3.1.2 Genetik Algoritma

Genetik Algoritmalar; Darwin'in evrim teorisinden etkilenecek geliştirilmiş, doğal seçim prensiplerine dayanan bir Meta-Sezgisel optimizasyon algoritma tekniğidir. Bu yöntemin temel kavramları ilk kez Michigan Üniversitesi'nde John Holland ve ekibinin çalışmalarıyla gündeme gelmiştir. Holland'ın bu alandaki kitabı, 1975 yılında yayımlanmış olup, Genetik Algoritmalar hakkında yayımlanan ilk çalışma olmasının yanı sıra, başka araştırmacıların da bu konuya yönelmesine vesile olmuştur. Ancak, Genetik Algoritmalarla dair araştırmaların daha yoğun olarak 1985 yılı sonrasında yapıldığı gözlemlenmektedir (Özkaçar, 1998). 1992 yılında ise John Koza, Genetik Algoritmayı kullanarak birçok görevi yerine getiren programlar geliştirmiş ve bu yöntemle genetik programlama adını vermiştir.

Genetik Algoritma, biyolojik evrim mekanizmasını temel alarak karmaşık problemler için yenilikçi ve etkili çözümler sunan, geniş çözüm alanlarına sahip veya geleneksel yöntemlerle çözülmesi güç olan sorunlar için oldukça uygun bir tekniktir. Genetik Algoritma, rastgele arama tekniklerini kullanarak optimal çözümü arayan ve parametrelerin kodlanmasına dayalı bir arama yöntemidir. Bu algoritma, geniş bir veri grubu veya çözüm uzayında, belirli bir amacı karşılayan en uygun veriyi veya çözümü bulmak için tasarlanmıştır. Özellikle karmaşık ve çok boyutlu problemlerde, Genetik Algoritma verimli bir şekilde çalışarak çözüm arayışını hızlandırır ve yerel maksimumlara takılmadan global optimuma ulaşmayı hedefler. John H. Holland 1975 yılında yayımladığı "Adaptation in Natural and Artificial Systems" adlı kitabında Genetik Algoritmaların temel prensiplerini ve doğal seçim mekanizmasını algoritmanın en iyi olan çözümlerin devamını sağlarken zayıf olanları eleme prensibine dayandığını ve bu sürecin sürekli olarak daha iyi çözüm adayları üretirken, düşük performanslı olanları sistemden çıkarttığını ifade eder. Genetik Algoritmalar, doğal genetik biliminin ve bilgisayar biliminin temel prensiplerini esas alan bir optimizasyon yöntemidir. Bu yöntem karma bir yöntem olduğu için kullanılan terimler de her iki bilimin karması şeklinde görünür. Populasyonda yer alan genotipler / bireyler aynı zamanda kromozomlar / dizilimler olarak da isimlendirilmektedir. Çünkü her birey, doğada bulunanın aksine farklı şekilde yalnızca tek bir kromozomdan meydana gelmektedir. Her genotip, belirli bir problem için olası bir çözümü ifade etmektedir (Michalewicz, 1992).

Şekil 3.7’deki akış şeması Genetik Algoritmanın işleyişini adım adım açıklamaktadır. Genetik Algoritmalar, çözüm üretme sürecinde belirli adımlarla ilerler. Bu adımlar şu şekilde özetlenebilir: (Vinodha, 2014)

Adım 1: Başlangıç Populasyonunun Oluşturulması

Çözüm arayışı, rastgele bireylerden oluşan ilk populasyonun oluşturulmasıyla başlar. Populasyon büyüklüğü, algoritmanın başarısı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Küçük bir populasyon hızlı yakınsama sağlasa da çözüm uzayının yeterince araştırılamaması riskini taşır. Büyük populasyonlar ise daha geniş bir arama kapasitesi sunar, fakat işlem süresini uzatabilir. Genellikle Genetik Algoritmalar rastgele bir başlangıç populasyonu ile çalışmaya başlar.

Adım 2: Uygunluk Değerinin Hesaplanması

Her bireyin probleme uygunluğu, önceden tanımlanmış bir uygunluk fonksiyonu aracılığıyla değerlendirilir. Bu fonksiyon, genetik temsillerin çözüm kalitesini sayısal bir değerle ölçer. Maksimizasyon problemlerinde yüksek, minimizasyon problemlerinde düşük değerler daha uygun bireyleri işaret eder. İterasyonlar boyunca bu uygunluk değerleri temel alınarak seçim işlemi gerçekleştirilir. En uygun kromozom, problemin optimal çözümünü temsil eder.

Adım 3: Durumun Değerlendirilmesi

Hedeflenen çözüm kriterlerine ulaşıp ulaşılmadığı kontrol edilir. Eğer başarı kriteri sağlandıysa algoritma sonlandırılır; aksi takdirde bir sonraki aşamaya geçilir.

Adım 4: Seçim İşlemi

Yeni neslin oluşması için mevcut bireyler arasından uygun olanlar seçilir. Bu seçimde, daha yüksek uygunluk değerine sahip bireylerin seçilme olasılığı artar. Sıklıkla kullanılan seçim yöntemleri arasında rulet çarkı, turnuva yöntemi ve sıralama (rank) temelli yöntem yer alır. Rulet çarkında bireylerin seçilme şansı, uygunluk değerleriyle orantılı olarak belirlenir. Turnuva seçiminde ise rastgele seçilen bireyler arasından en uygun olan tercih edilir. Rank yöntemi ise uygunluk değerleri yerine sıralamaya dayalı göreceli değerler kullanır. Ayrıca, en uygun bireylerin doğrudan sonraki nesle aktarılması işlemi “elitizm” olarak adlandırılır ve genetik çeşitliliğin korunması açısından önemlidir.

Adım 5: Çaprazlama

Çaprazlama işlemi, seçilmiş bireylerin genetik bilgilerini birleştirerek yeni bireylerin üretilmesini sağlar. Bu işlem, doğadaki üremenin yapay bir karşılığıdır. Seçilen

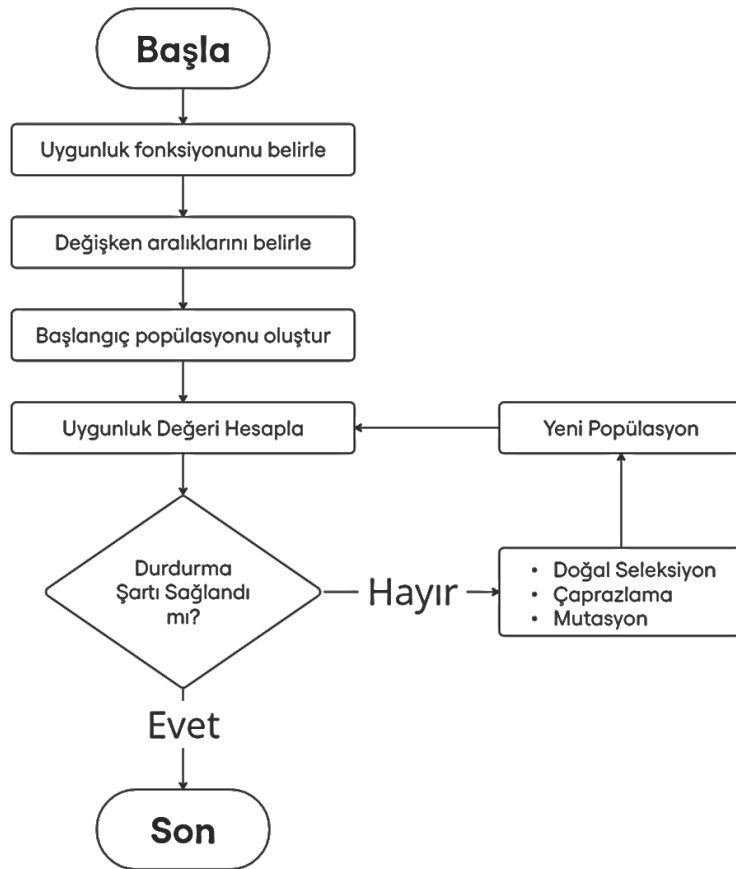
bireylerden yeni kombinasyonlar oluşturularak, daha iyi çözüm potansiyeline sahip bireyler elde edilir.

Adım 6: Mutasyon

Mutasyon, kromozomların bazı kısımlarında küçük değişiklikler yapılmasıyla genetik çeşitliliğin sürdürülmesini sağlar. Gerçek hayattaki genetik mutasyonlara benzer şekilde, algoritmadaki mutasyon da nadiren uygulanır ve belirli genlere etki eder. Bu yöntem, algoritmanın yerel minimumlara takılmadan daha iyi çözümler bulmasına yardımcı olur.

Adım 7: Tekrar ve İterasyonlar

Elde edilen yeni popülasyon, önceki nesle kıyasla daha iyi bireyler içerecek şekilde teorik olarak gelişmiş olur. Bu süreç, hedeflenen çözüme ulaşıncaya kadar tekrarlanır (Adım 2'ye dönülür). Her döngü bir iterasyon olarak adlandırılır ve iterasyon sayısının artması genellikle daha kaliteli sonuçlar doğurur. Ancak en uygun çözüm için kaç iterasyon gerektiği probleme göre değişir. Çoğu durumda işlem süresi belirleyici faktörlerden biridir.



Şekil 3.7. Genetik Algoritma yapısı (Michalewicz, 1992)

3.3.1.3 FAGA Algoritması

FAGA (Firefly and Genetic Algorithm) Algoritması, doğadan esinlenen iki güçlü optimizasyon tekniğinin avantajlarını birleştirerek oluşturulmuş hibrit bir yapıdır. Ateş Böceği Algoritması (FA), hızlı yakınsama kabiliyeti ile öne çıkmasına rağmen, özellikle karmaşık problemlerde yerel minimumlara saplanma riski taşır. Öte yandan, Genetik Algoritma (GA) daha geniş bir arama alanına sahip olup küresel optimum çözümleri keşfetmede daha etkilidir, ancak yakınsama süreci Ateş Böceği Algoritması'na kıyasla daha yavaştır. FAGA Algoritması, Ateş Böceği Algoritması'nın hızlı yakınsama özelliği ile Genetik Algoritma'nın çeşitlilik sağlayan genetik işlemlerini bir araya getirerek bu iki yöntemin zayıf yönlerini dengelemekte ve güçlü yönlerini harmanlamaktadır. Algoritmanın çalışması rastgele oluşturulan bir başlangıç popülasyonu ile başlamakta; ardından ateşböcekleri, parlaklıklarına göre birbirlerine çekilerek daha iyi çözümlere yönelmekte ve elde edilen çözümler Genetik Algoritma evresine aktarılmaktadır. Genetik işlemlerle (seçim, çaprazlama, mutasyon) çeşitlendirilen bu çözümler, Ateş Böceği Algoritması + Genetik Algoritma döngüsü içerisinde sürekli iyileştirilerek küresel en uygun çözüm elde edilmeye çalışılmaktadır. Bu yapısı sayesinde FAGA, hızlı sonuç üretme kapasitesi ile birlikte sağlamlık, çeşitlilik ve çok kriterli optimizasyon yeteneği sunmakta; bu yönüyle karmaşık sistemlerin kontrolü ve mühendislik uygulamaları için etkili bir çözüm aracı olarak öne çıkmaktadır. Karmaşık sistemlerin denetiminde, çoklu kriterli amaç fonksiyonları için çözüm üretme potansiyeli sayesinde oldukça güçlü bir araç olarak değerlendirilmektedir. Çalışmada yer alan örnekler için hibrit FAGA Algoritması kullanılmıştır.

4. BENZETİM ÇALIŞMASI

Bu bölümde, farklı zaman gecikmelerine sahip kesir dereceli dinamik sistemler için Smith öngörücü temelli bir kontrolör tasarımı gerçekleştirilmiştir. Zaman gecikmeli sistemlerin kontrolü, klasik yöntemlerle ele alındığında önemli performans sınırlamalarıyla karşı karşıya kalmaktadır. Bu bağlamda, çalışmanın temel amacı, gecikmeli ve kesir dereceli yapıya sahip sistemlerin kararlı ve hızlı bir şekilde denetlenebilmesini sağlayacak ileri düzey bir kontrol yaklaşımı geliştirmektir.

Kontrolör tasarım sürecinde, parametre optimizasyonu için, Ateş Böceği Algoritması ile Genetik Algoritma'nın melezlenmesiyle oluşturulan FAGA adı verilen hibrit bir sezgisel arama yöntemi tercih edilmiştir. Bu hibrit yapı, arama uzayında hem küresel çeşitliliği sürdürebilme hem de yerel çözümler etrafında yoğunlaşarak hızlı yakınsama sağlayabilme kapasitesiyle, parametrik optimizasyon problemlerinde yüksek doğruluk ve kararlılık sergilemektedir.

Optimizasyon süreci, amaç fonksiyonları çerçevesinde yürütülmüş olup, sistem yanıtlarının nicel olarak değerlendirilebilmesi amacıyla hem integral tabanlı performans kriterleri (ISE, IAE, ITAE, ITSE) hem de zaman cevabı karakteristikleri (yükselme zamanı, yerleşme zamanı, aşım miktarı, tepe zamanı) esas alınmıştır. Böylelikle, sistemin hem geçici rejim hem de kararlı duruma geçiş performansının çok yönlü bir şekilde optimize edilmesi hedeflenmiştir.

Gerçekleştirilen benzetim çalışmaları dört farklı kesir dereceli sistem örneği üzerinde uygulanmış ve her bir sistem için tasarlanan Smith öngörücü tabanlı kontrolör yapılarına ait geçici rejim tepkileri ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. Elde edilen simülasyon sonuçları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş ve kontrol performansları incelenmiştir. Ayrıca, kontrol yapılarına çeşitli bozucu sinyaller uygulanarak sistemlerin bozucu giderme yetenekleri test edilmiştir. Elde edilen bulgular, önerilen kontrol stratejisinin zaman gecikmeli kesir dereceli sistemlerde yüksek düzeyde kararlılık, hızlı tepki ve etkin bozucu baskılama performansı sunduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar doğrultusunda, geliştirilen yöntem, gecikmeli kesir dereceli sistemlerin kontrolünde etkili ve güvenilir bir çözüm olarak öne çıkmaktadır.

4.1 Örnek 1

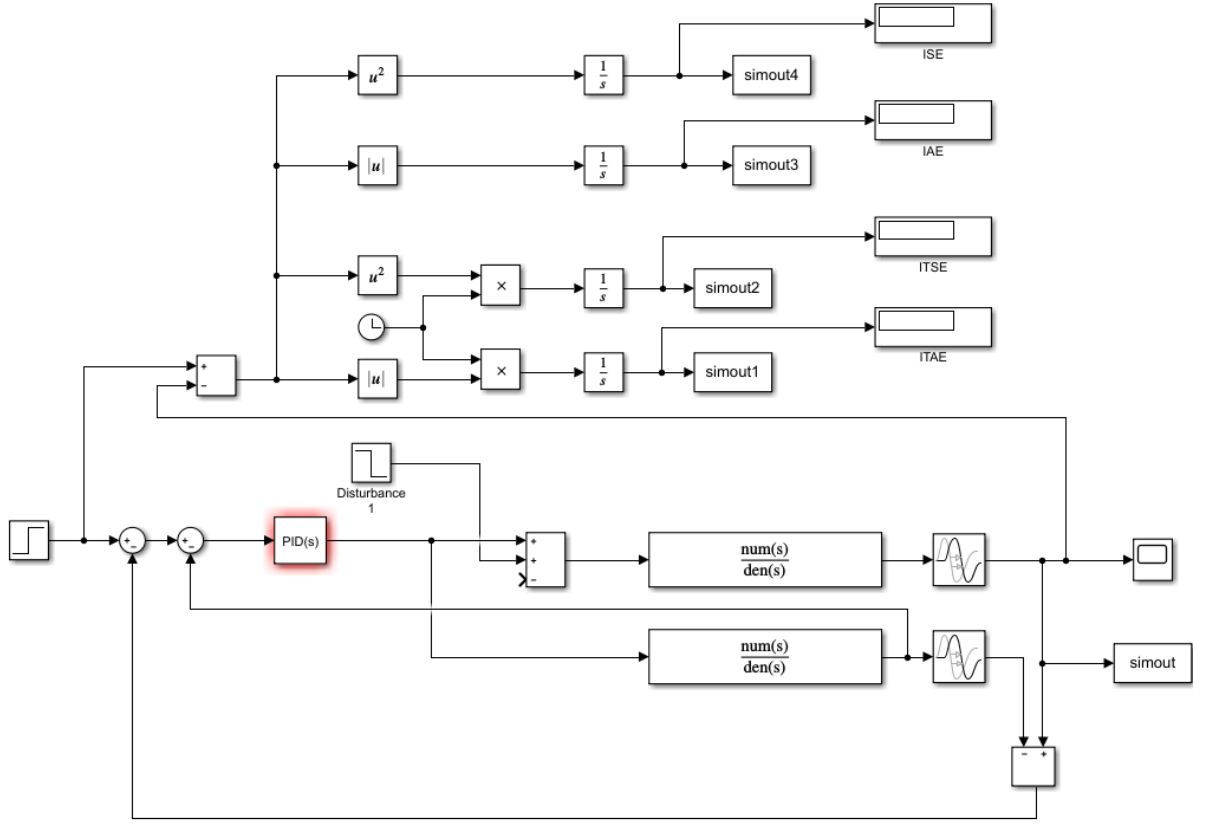
Özyetkin ve arkadaşları (Özyetkin M. M., 2010) tarafından literatürde kullanılan aşağıdaki gibi bir zaman gecikmesine sahip kesir dereceli transfer fonksiyonunu ele alalım. Bu sistem için yapılan Smith öngörücü tabanlı PID kontrolör tasarımı aşağıda sunulmuştur.

$$G_p(s) = \frac{-0.5s + 1}{(s^{1.2} + 1)(2s + 1)} e^{-0.6s} \quad (4.1)$$

Denklem 4.1'deki zaman gecikmesine sahip kesir dereceli sistemin 5. dereceden Oustaloup yaklaşım yöntemine göre tam sayı dereceli yaklaşım modeli Denklem 4.2'deki gibidir. Oustaloup yaklaşımında tamsayı dereceli model hesaplanırken alt ve üst frekans aralığı $[10^{-2}$ ve $10^2]$ olarak seçilmiştir. Diğer örneklerde de alt ve üst frekans aralıkları aynı şekilde alınmıştır. Denklem 4.2 incelendiğinde 12. dereceden bir zaman gecikmeli sistem modeli karşımıza çıkmaktadır ve bu yüksek dereceli sistemin denetlenmesi önemli bir kontrol problemidir. Özellikle ölü zamanın varlığı, klasik kontrol tekniklerinin yeterli performans göstermesini güçleştirdiğinden, gelişmiş kontrol stratejilerinin uygulanmasını gerekli kılmaktadır.

$$G_p(s) = \frac{-0.5s^{11} - 55.87s^{10} - 1946s^9 - 2.156e04s^8 - 7.677e04s^7 + 1.549e04s^6 + 2.963e05s^5 + 3.168e05s^4 + 1.011e05s^3 + 1.219e04s^2 + 493.4s + 6.31}{5.024s^{12} + 487.9s^{11} + 1.5e04s^{10} + 1.671e05s^9 + 8.089e05s^8 + 1.86e06s^7 + 2.337e06s^6 + 1.687e06s^5 + 6.753e05s^4 + 1.399e05s^3 + 1.368e04s^2 + 511.6s + 6.31} e^{-0.6s} \quad (4.2)$$

Zaman gecikmesi içeren sistemlerin kontrol edilmesinde Smith öngörücü yapısının başarılı bir kontrol performansı sergilediği bilinen bir gerçektir. Bundan dolayı bu örnekte Smith öngörücü yapısı kullanılarak bir kontrolör tasarımı yapılmıştır. Smith öngörücü yapısında ileri yolda PID kontrolör kullanılmıştır. Kullanılan kontrol sisteminin blok diyagramı Şekil 4.1'de verilmiştir.



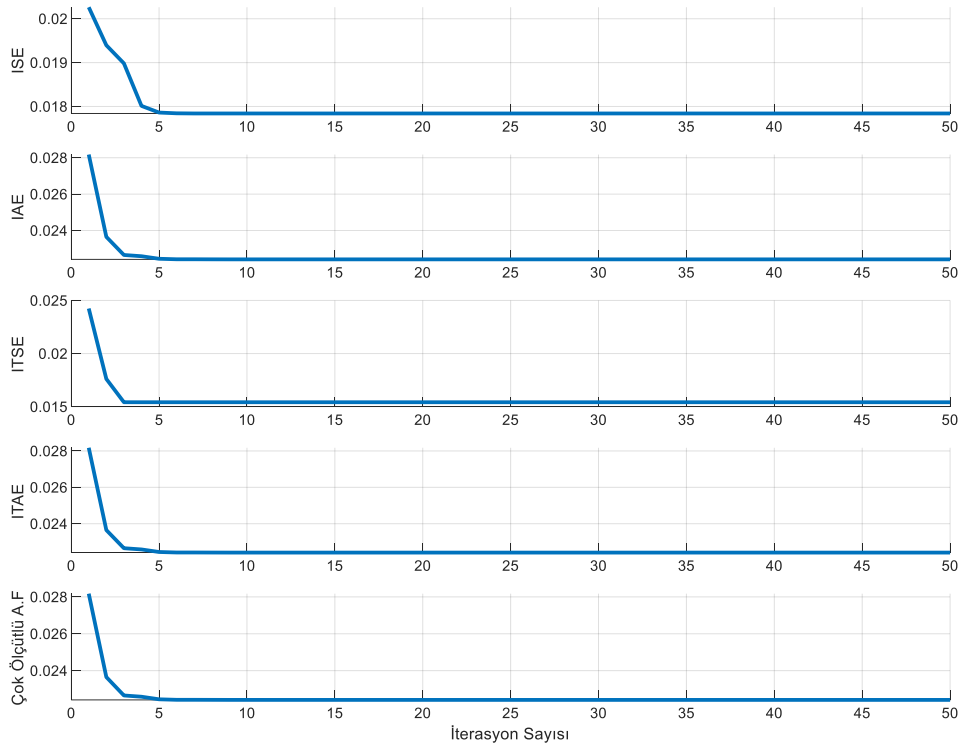
Şekil 4.1. Örnek 1 için oluşturulmuş Simulink modeli

Kontrol sisteminde kontrolör parametrelerini belirlemek amacıyla FAGA Algoritması kullanılmıştır. Diğer tüm örneklerde de hibrit algoritma olan FAGA Algoritması tercih edilmiştir. Optimizasyon algoritmasında integral performans kriterlerine göre ve zaman cevabı özelliklerine göre amaç fonksiyonları oluşturulmuş ve en uygun kontrolör parametrelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu örnek için, kontrolör parametrelerinin alt ve üst sınır aralıkları sırasıyla $[0.001 \ 0.001 \ 0.001]$ ve $[1.5 \ 1.5 \ 1.5]$ olarak belirlenmiştir. Ayrıca FAGA Algoritmasında iterasyon sayısı 50, popülasyon büyüklüğü 10 olarak seçilmiş ve algoritma 10 kez çalıştırılmıştır. En küçük amaç fonksiyonu değerini sağlayan çalıştırma için belirlenen PID kontrolör parametreleri alınarak, Çizelge 4.1 elde edilmiştir.

Çizelge 4.1. Farklı amaç fonksiyonlarına göre elde edilen PID kontrolör parametreleri

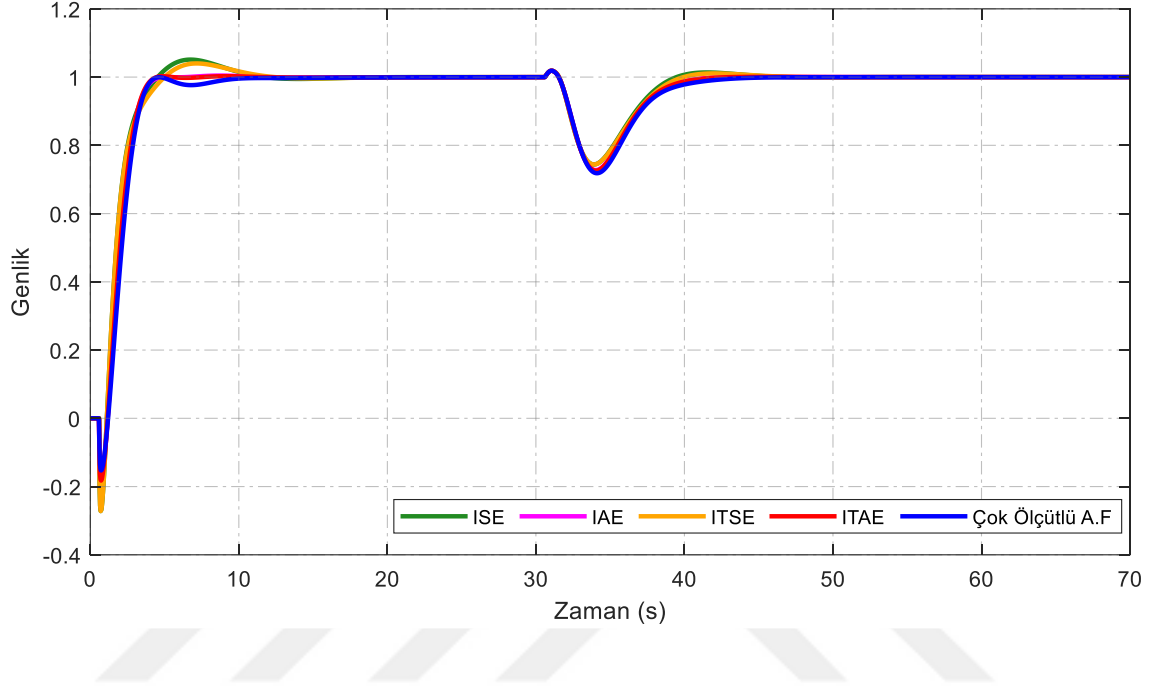
	ISE	IAE	ITSE	ITAE	Çok Ölçütlü Amaç Fonksiyonu
K_p	1.5000	1.5000	1.5000	1.5000	1.4635
K_i	0.7720	0.6218	0.7303	0.6163	0.5549
K_d	1.5000	1.0692	1.5000	1.0343	0.8675

Ayrıca, FAGA Algoritmasında farklı amaç fonksiyonları için elde edilen iterasyon grafikleri Şekil 4.2’de verilmiştir. Şekilden, iterasyon sayıları arttıkça tüm hata fonksiyonlarının çok hızlı bir şekilde minimum değerlere ulaştığı ve erken iterasyonlarda kararlılık sağlandığı, tüm amaç fonksiyonları için yaklaşık 5. iterasyonda eğrilerin yakınsadığı görülmektedir.



Şekil 4.2. Farklı amaç fonksiyonları için yakınsama eğrileri (Örnek 1)

Zaman gecikmesi içeren kesir dereceli sisteme, Çizelge 4.1’de yer alan kontrolör parametrelerinin uygulanması sonucunda sistemin birim basamak cevap eğrileri elde edilmiştir. Elde edilen cevap eğrileri Şekil 4.3’te sunulmuştur.



Şekil 4.3. Farklı amaç fonksiyonlarına göre tasarlanan sistemler için birim basamak cevap eğrileri

Şekilden, grafiklerin negatif yönde başlayıp sonra pozitif yönde devam ettiği görülmektedir, bu durum ise minimum olmayan fazlı bir sistem olduğunu göstermektedir. Şekil 4.3. incelendiğinde, tüm performans kriterlerine göre yerleşme zamanının 10 s’den daha kısa sürede gerçekleştiği görülmektedir. Maksimum yüzde aşma ya da aşım yönünden bir değerlendirme yapılırsa, ISE ve ITSE performans kriteri ile yaklaşık %5’lik bir aşma sağlanırken, diğer performans kriterlerinin %1’den daha düşük bir aşma sağladığı görülmektedir. Aşım yönünden en iyi performansın çok ölçütlü amaç fonksiyonu tabanlı kontrolör tasarımı ile sağlandığı görülmektedir. Yükselme ve tepe zamanı karakteristiklerinin de tüm performans kriterlerinde yakın olduğu şekilden görülmektedir.

Ayrıca, yapılan kontrolör tasarımının bozucu giderme performansı da analiz edilmiştir. Kontrol sistemine 30.saniyede 0.5 genlikli bir bozucu uygulanarak Şekil 4.3’te görülen

bozucu giderme performansları gözlenmiştir. Performans kriterlerinin tümü için yapılan kontrolör tasarımlarının da benzer performanslar sergilediği şekilde görülmektedir.

Ayrıca, Örnek 1 için zaman cevabı özellikleri detaylı olarak Çizelge 4.2’de sunulmuştur.

Çizelge 4.2. Farklı amaç fonksiyonlarına göre tasarlanan sistemler için zaman cevabı karakteristikleri

	ISE	IAE	ITSE	ITAE	Çok Ölçütlü Amaç Fonksiyonu
Yükselme Zamanı	1.9153	1.8524	2.0552	1.8371	1.8980
Yerleşme Zamanı	9.2023	3.8908	9.1616	3.8182	7.0482
Aşım	5.1254	0.4490	4.0047	0.2635	2.2624e-04
Tepe Zamanı	6.7505	8.7632	7.1624	9.1926	69.6478

Bu çalışmada, farklı performans kriterleri (ISE, IAE, ITSE, ITAE) ve çok ölçütlü amaç fonksiyonu kullanılarak klasik PID denetleyicinin parametrelerinin optimize edilmesi hedeflenmiştir. Kullanılan sistem, hem doğrusal hem de kesirli dereceli dinamikler içeren ve zaman gecikmesi bulunan karmaşık bir transfer fonksiyona sahiptir. İlgili sistemin Simulink modelinde, her bir performans ölçütüne karşılık gelen hata metrikleri için ayrı bloklar tanımlanmış ve sonuçlar zamana bağlı olarak elde edilmiştir.

Zamana bağlı sistem yanıtları incelendiğinde, tüm kriterlere göre elde edilen PID parametrelerinin sistem üzerinde başarılı bir kontrol sağladığı gözlemlenmiştir. Ancak, çok ölçütlü amaç fonksiyonu ile optimize edilen PID denetleyicinin, diğerlerine kıyasla daha dengeli bir geçici yanıt sunduğu dikkat çekmektedir. Bu yapı, hem yükselme ve yerleşme zamanı açısından yeterli bir hız sunmakta hem de aşım değerini minimumda tutmaktadır.

PID parametreleri karşılaştırıldığında, özellikle Ki ve Kd kazançlarında farklı kriterlere göre önemli sapmalar görülmektedir. IAE ve ITAE kriterlerinde integral kazancı daha düşük belirlenmiş olup, bu da integral etkinliğinin hata süresi boyunca sınırlandırıldığını göstermektedir. Çok ölçütlü amaç fonksiyonu ile elde edilen parametreler ise, hem

denetleyici etkinliğini hem de sistem kararlılığını koruyacak şekilde orta düzeyde değerler sunmaktadır.

Zaman domeni karakteristikleri göz önünde bulundurulduğunda; IAE ve ITAE kriterleri yerleşme zamanı açısından oldukça başarılı sonuçlar vermiştir. Ancak bu durum aşım değerlerinin artmasına neden olabilmektedir. Öte yandan, çok ölçütlü amaç fonksiyonu, tüm performans ölçütlerini dengeleyerek en az aşım ve makul yerleşme süresiyle dengeli bir yanıt elde edilmesini sağlamıştır. Tepe zamanı açısından tüm yapıların benzer şekilde performans sergilediği, yalnızca çok ölçütlü fonksiyonda uzun bir tepe zamanı gözlemlendiği görülmektedir; bu durum sistemin yavaş bir tepe noktasına ulaşmasına rağmen geçici rejimde daha az salınım yaptığı anlamına gelebilir.

Sonuç olarak, yalnızca tek bir performans ölçütü yerine çok ölçütlü amaç fonksiyonlarının kullanılması, sistemin genel performansını daha etkin şekilde iyileştirmektedir. Bu yaklaşım, hem kontrol kalitesini hem de kararlılığı optimize etmek isteyen mühendislik uygulamaları için daha uygun bir çözüm sunmaktadır.

4.2 Örnek 2

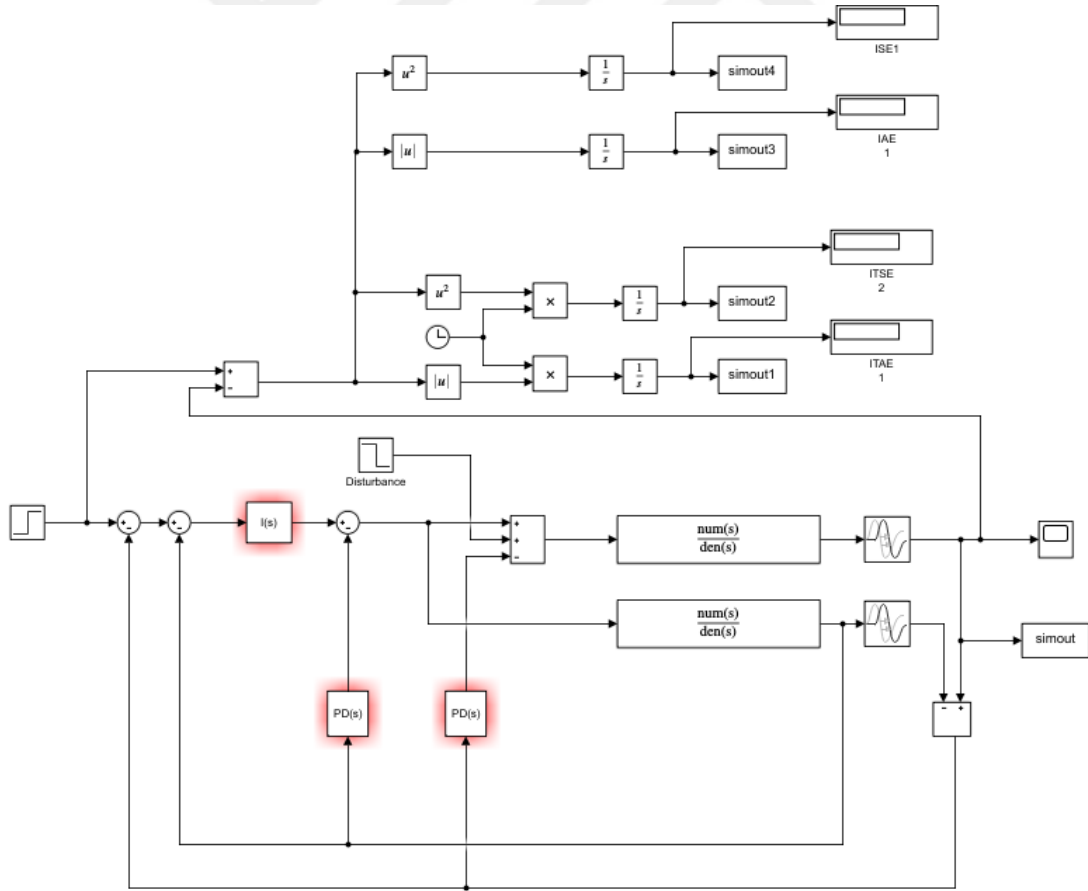
Literatürde Doğruer ve arkadaşları (Doğruer Tufan Y. A., 2017) tarafından kullanılan aşağıdaki gibi bir zaman gecikmesine sahip kesir dereceli transfer fonksiyonunu ele alalım. Bu sistem için yapılan Smith öngörücü tabanlı I-PD kontrolör tasarımı aşağıda sunulmuştur.

$$G_p(s) = \frac{1.2}{0.2s^{2.5} + 2s^{1.2} + 0.5s^{0.4}} e^{-1.5s} \quad (4.3)$$

Denklem 4.3'teki zaman gecikmesine sahip kesir dereceli sistemin 5. dereceden Oustaloup yaklaşım yöntemine göre tam sayı dereceli yaklaşım modeli Denklem 4.4 'deki gibidir. Denklem 4.4 incelendiğinde, 17. mertebeden bir zaman gecikmeli sistem modeline ulaşılmaktadır. Bu denli yüksek mertebeye sahip bir sistemin denetimi, ileri düzey kontrol stratejilerinin uygulanmasını gerektiren önemli bir kontrol problemidir.

$$G_p(s) = \frac{1.2s^{15} + 1625s^{14} + 7.683e05s^{13} + 1.451e08s^{12} + 9.093e09s^{11} + 2.41e11s^{10} + 2.717e12s^9 + 1.056e13s^8 + 1.754e13s^7 + 1.242e13s^6 + 3.034e12s^5 + 3.154e11s^4 + 1.386e10s^3 + 2.02e08s^2 + 1.178e06s + 2394}{6.325s^{17} + 6040s^{16} + 1.882e06s^{15} + 2.175e08s^{14} + 9.364e09s^{13} + 1.806e11s^{12} + 1.726e12s^{11} + 9.232e12s^{10} + 2.598e13s^9 + 3.657e13s^8 + 2.399e13s^7 + 6.798e12s^6 + 8.813e11s^5 + 5.256e10s^4 + 1.348e09s^3 + 1.33e07s^2 + 5.159e04s + 62.95} e^{-1.5s} \quad (4.4)$$

Zaman gecikmeli sistemlerin denetiminde Smith öngörücü yapısının etkinliği literatürde geniş ölçüde kabul görmüştür. Bu doğrultuda, söz konusu örnekte kontrolör tasarımı Smith öngörücü yapısı esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Smith öngörücü yapısında ileri yolda I-PD kontrolör kullanılmıştır. Ayrıca bozucu giderme için Simulink yapısında ayrıca bir PD kontrolör kullanılmış ve bozucu giderme işlemi gerçekleştirilmiştir. Kullanılan kontrol sisteminin blok diyagramı Şekil 4.4'te verilmiştir.



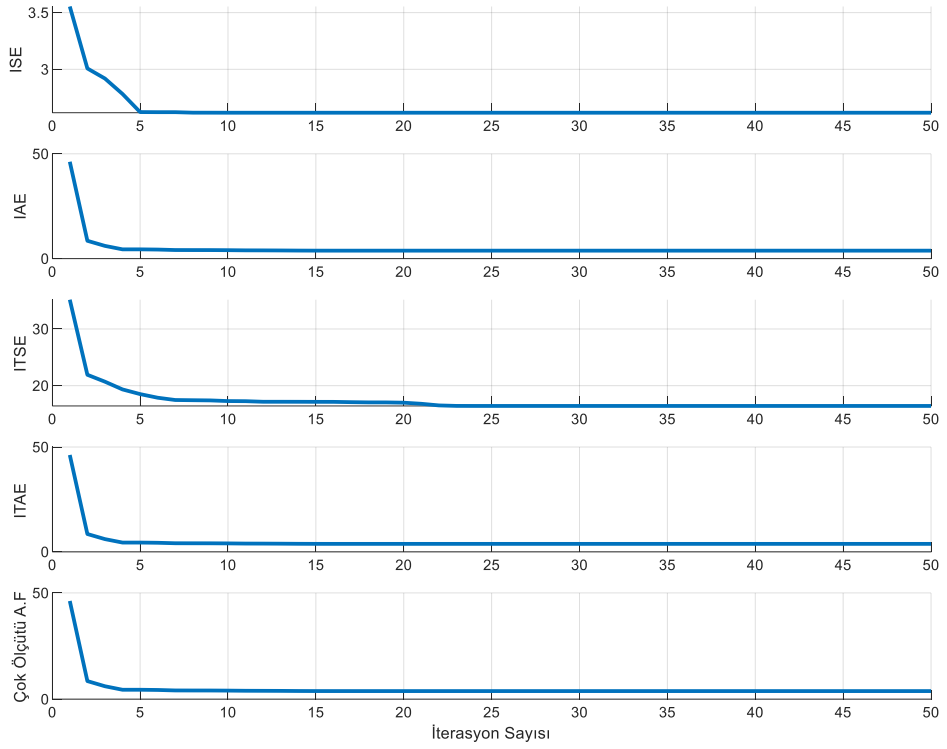
Şekil 4.4. Örnek 2 için oluşturulmuş Simulink modeli

Optimizasyon algoritmasının uygulanmasında, hem integral performans ölçütleri hem de sistemin zaman cevabı karakteristikleri dikkate alınarak amaç fonksiyonları tanımlanmış; bu doğrultuda, kontrolörün en uygun parametrelerinin tespiti hedeflenmiştir. Örnekte, kontrolör parametrelerinin alt ve üst sınır aralıkları [0.01 0.01 0.01 0.01 0.01] ve [5 5 5 5 5] olarak belirlenmiştir. Çalışmada FAGA Algoritmasının parametreleri, iterasyon sayısı 50 ve popülasyon büyüklüğü 10 olacak şekilde belirlenmiş; elde edilen sonuçların güvenilirliğini ve tutarlılığını artırmak amacıyla algoritma toplamda 10 bağımsız çalıştırma ile test edilmiştir. Çalıştırma için belirlenen I-PD kontrolör parametreleri alınarak, Çizelge 4.3'te elde edilmiştir.

Çizelge 4.3. Farklı amaç fonksiyonlarına göre elde edilen I-PD kontrolör parametreleri

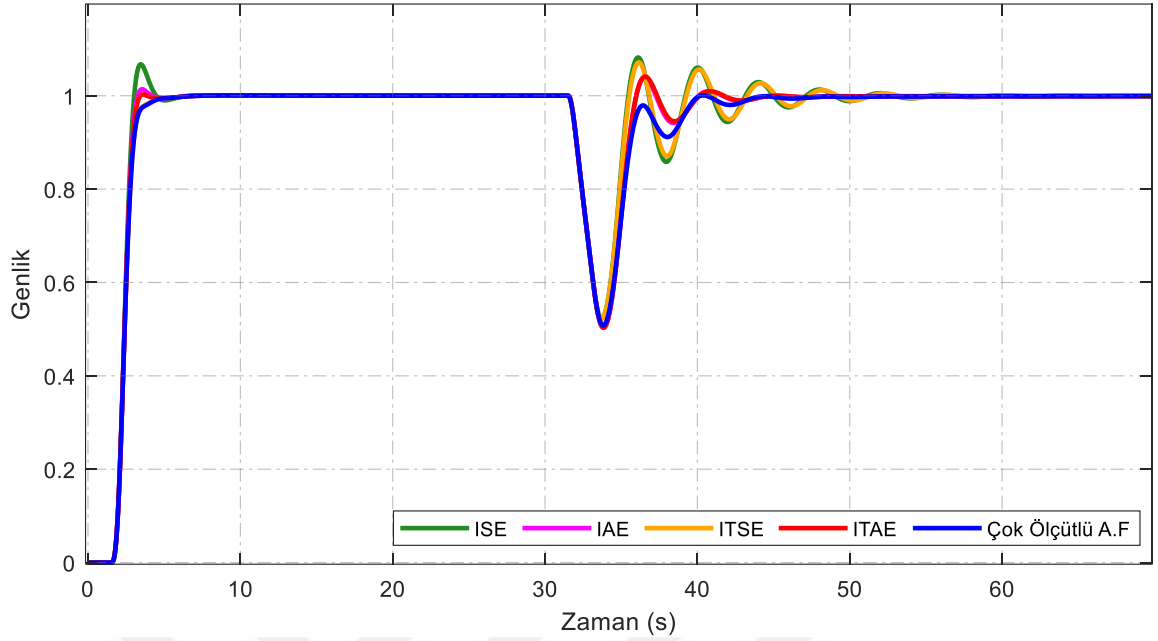
	ISE	IAE	ITSE	ITAE	Çok Ölçütlü Amaç Fonksiyonu
K_i	5	5	5	5	5
K_{p1}	4.1026	4.4545	4.747	4.5399	4.7526
K_{d1}	0.01	0.01	0.01	0.01	0.001
K_{p2}	0.89338	0.84756	0.94812	0.85957	0.74244
K_{d2}	1.1996	0.85225	1.1856	0.83912	0.94698

Buna ek olarak, FAGA Algoritması kullanılarak farklı amaç fonksiyonlarına yönelik gerçekleştirilen optimizasyon süreçlerine ait iterasyon–amaç fonksiyonu değerleri arasındaki ilişkiyi gösteren grafiksel sonuçlar Şekil 4.5'te ayrıntılı biçimde sunulmuştur. ISE, IAE, ITSE, ITAE ve Çok Ölçütlü A.F hata kriterleri esas alınarak tasarlanan kontrolörlerin optimizasyon süreci ve sistemin zaman tepkisi üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, her bir kriter için optimizasyon algoritmasının farklı iterasyonlarda bir yakınsamayla en uygun çözüme ulaştığını göstermektedir.



Şekil 4.5. Farklı amaç fonksiyonları için yakınsama eğrileri (Örnek 2)

Zaman gecikmesi içeren kesir dereceli sisteme, Çizelge 4.3’de yer alan kontrolör parametrelerinin uygulanması sonucunda sistemin birim basamak cevap eğrileri elde edilmiştir. Elde edilen cevap eğrileri Şekil 4.6’da sunulmuştur.



Şekil 4.6. Farklı amaç fonksiyonlarına göre tasarlanan sistemler için birim basamak cevap eğrileri

Şekil 4.6’da her bir amaç fonksiyonuna göre elde edilen kontrolör parametreleriyle sistemin zaman cevabı gösterilmektedir. Tüm kontrolörler sisteme benzer şekilde başarılı ve kararlı bir durum cevabı sunmuştur. Bununla birlikte, IAE ve ITAE tabanlı kontrolörlerde neredeyse aşısız bir cevap gözlenirken ISE ve ITSE kriterleri yaklaşık %7’lik bir aşım sağlamaktadır. Zaman cevabı özelliklerinde yükselme ve tepe zamanları ise her bir kriter için birbiriyle yakın değerler seyretmektedir. Bu durum, uygulanan optimizasyon algoritmasının kontrolör parametrelerini kısa sürede ideal değerlere ulaştırabildiğini göstermektedir.

Ek olarak kontrol sistemine uygulanan 30.saniyede 0.5 genlikli bir bozucu ile Şekil 4.6’daki bozucu giderme performansı da analiz edilmiştir. Sonuç olarak, bu örnekte kullanılan optimizasyon yaklaşımı ile kontrolörlerin parametreleri başarıyla belirlenmiş ve sistem zaman yanıtında istenen kontrol performansı elde edilmiştir. ITAE kriterlerine göre yapılan optimizasyonun genel olarak daha dengeli sonuçlar verdiği ve diğer tekil hata kriterlerine göre daha kararlı ve az aşım değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Örnek 2 için zaman cevabı özellikleri detaylı olarak Çizelge 4.4’te sunulmuştur.

Çizelge 4.4. Farklı amaç fonksiyonlarına göre tasarlanan sistemler için zaman cevabı karakteristikleri

	ISE	IAE	ITSE	ITAE	Çok Ölçütlü Amaç Fonksiyonu
Yükselme Zamanı	0.8796	0.9512	1.0382	0.9735	1.0377
Yerleşme Zamanı	4.1362	3.1447	3.7310	3.2142	3.8320
Aşım	6.7313	1.3945	7.2043	0.2632	0.0657
Tepe Zamanı	3.4577	3.5579	9.3853	3.6054	9.4054

Bu çalışmanın ikinci örneğinde, kesir dereceli bir transfer fonksiyonla modellenmiş zaman gecikmeli bir sistemin kontrolü gerçekleştirilmiştir. Tanımlanan sistem, fraksiyonel mertebeli üç terimli bir payda yapısına ve 1.5 saniyelik bir zaman gecikmesine sahiptir. Bu yapı, klasik sistemlere kıyasla daha karmaşık bir dinamik sergilemekte ve denetleyici tasarımında özel dikkat gerektirmektedir.

Simulink ortamında oluşturulan çok döngülü kontrol yapısında, bir integral ve iki ayrı PD denetleyici kullanılmış, bu yapı I-PD-PD kontrol mimarisi ile modellenmiştir. Bu yapı, özellikle karmaşık sistemlerde hem geçici hem de kalıcı hata bileşenlerini en aza indirme amacıyla tercih edilmiştir.

Optimizasyon sonuçları incelendiğinde, tüm performans kriterleri (ISE, IAE, ITSE, ITAE ve çok ölçütlü amaç fonksiyonu) için hata fonksiyonlarının ilk birkaç iterasyonda hızlı şekilde azaldığı ve 10. iterasyondan sonra kararlı hale geldiği görülmektedir. Bu durum, kullanılan optimizasyon algoritmasının etkinliğini ve seçilen başlangıç parametrelerinin uygunluğunu göstermektedir.

Zaman domen analizleri açısından bakıldığında, çok ölçütlü amaç fonksiyonu ile elde edilen kontrolör parametrelerinin, diğer kriterlere kıyasla daha dengeli ve kararlı bir sistem cevabı sunduğu açıkça görülmektedir. Aşım değeri en düşük olan yapı yine çok ölçütlü amaç fonksiyonu ile optimize edilmiş sistemde elde edilmiştir (yaklaşık %0.07). Bu durum, sistemde minimum düzeyde enerji harcanarak hedef değere ulaşılabildiğini ve geçici rejimde salınımların başarıyla bastırıldığını göstermektedir.

Tepe zamanları ve yerleşme zamanları değerlendirildiğinde, özellikle ISE ve ITSE kriterleri ile optimize edilen sistemlerin daha uzun sürelerde dengeye ulaştığı gözlemlenmiştir. Buna karşın, ITAE ve çok ölçütlü yapı, daha kısa sürede yerleşme zamanı sunmuş ve bu durum sistemin zaman verimliliği açısından avantajlı olduğunu göstermiştir.

PID parametre değerleri incelendiğinde, tüm kriterlerde integral kazancı sabit tutulmuş, sadece oransal ve türev kazançları optimize edilmiştir. Bu tercih, sistemin genel integral davranışının sabit tutulmasını ve kontrol performansının daha hassas parametrelerle yönlendirilmesini sağlamıştır. Özellikle K_{p2} ve K_{d2} parametrelerinin çok ölçütlü optimizasyonda diğerlerine kıyasla daha düşük seçilmiş olması, ikinci PD bloğunun daha ince ayarlarla sistemi dengelediğini göstermektedir.

Sonuç olarak, bu örnekte kullanılan I–PD–PD kontrol yapısı ve çok ölçütlü optimizasyon yaklaşımı, kesirli dereceli sistemlerin kontrolünde oldukça etkin sonuçlar üretmiştir. Gerek hata metrikleri gerekse zaman alanı yanıtları açısından değerlendirildiğinde, bu yapıların ileri düzey kontrol sistemlerinde yaygın biçimde kullanılabileceği söylenebilir. Bu bağlamda, özellikle fraksiyonel sistemlerin hassas kontrolünde, klasik PID yapılarının ötesine geçilmesi gerektiği ve çoklu denetim yapılarının önem kazandığı bir kez daha vurgulanmıştır.

4.3 Örnek 3

Narang (A. Narang, 2010) tarafından literatürde önerilen ve zaman gecikmesi içeren aşağıdaki kesir dereceli transfer fonksiyonu, bu çalışmada analiz edilmek üzere örnek alınmıştır. Bu sistem için yapılan Smith öngörücü tabanlı PID kontrolör tasarımı aşağıda sunulmuştur. Ayrıca sistemin bozucu giderme performansını geliştirmek amacıyla Smith öngörücü yapısına PD kontrolör de ilave edilmiştir.

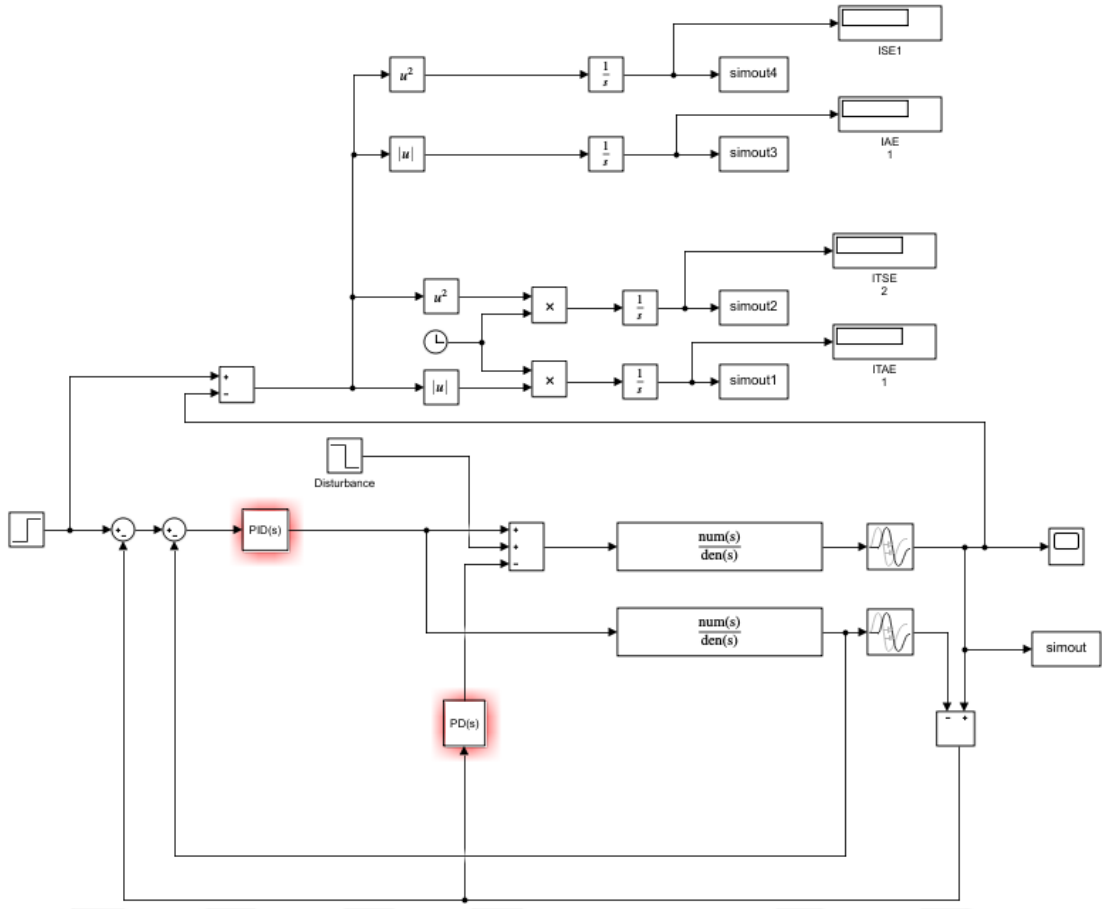
$$G_p(s) = \frac{1}{8s^{1.5} + 5s^{0.75} + 1} e^{-4.8s} \quad (4.5)$$

Denklem 4.5'teki zaman gecikmesine sahip kesir dereceli sistemin 5. dereceden Oustaloup yaklaşım yöntemine göre tam sayı dereceli yaklaşım modeli Denklem

4.6.'daki gibidir. Denklem 4.6 incelendiğinde, 11. dereceden bir zaman gecikmeli sistem modelinin elde edildiği görülmektedir. Bu denli yüksek mertebeli ve aynı zamanda ölü zaman içeren sistemlerin kontrol edilmesi, hem sistemin dinamik davranışlarının karmaşıklığı hem de kararlılık analizinin hassasiyet gerektirmesi nedeniyle ileri düzey kontrol stratejilerinin kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Bu nedenle, söz konusu sistemin denetlenmesi, kontrol mühendisliği literatüründe kritik öneme sahip bir problem olarak değerlendirilmektedir.

$$G_p(s) = \frac{s^{10} + 169.4s^9 + 9063s^8 + 1.675e05s^7 + 1.234e06s^6 + 3.436e06s^5 + 3.903e06s^4 + 1.675e06s^3 + 2.866e05s^2 + 1.694e04s + 316.2}{80s^{11} + 1.01e04s^{10} + 3.483e05s^9 + 4.452e06s^8 + 2.247e07s^7 + 4.867e07s^6 + 4.713e07s^5 + 2.173e07s^4 + 4.857e06s^3 + 5.194e05s^2 + 2.34e04s + 366.2} e^{-4.8s} \quad (4.6)$$

Smith öngörücü yapısında ileri yolda PID kontrolör kullanılmıştır. Bozucu giderme için Simulink yapısında ayrıca bir PD kontrolör ile bozucu giderme işlemi gerçekleştirilmiştir. Kullanılan kontrol sisteminin blok diyagramı Şekil 4.7'de verilmiştir.



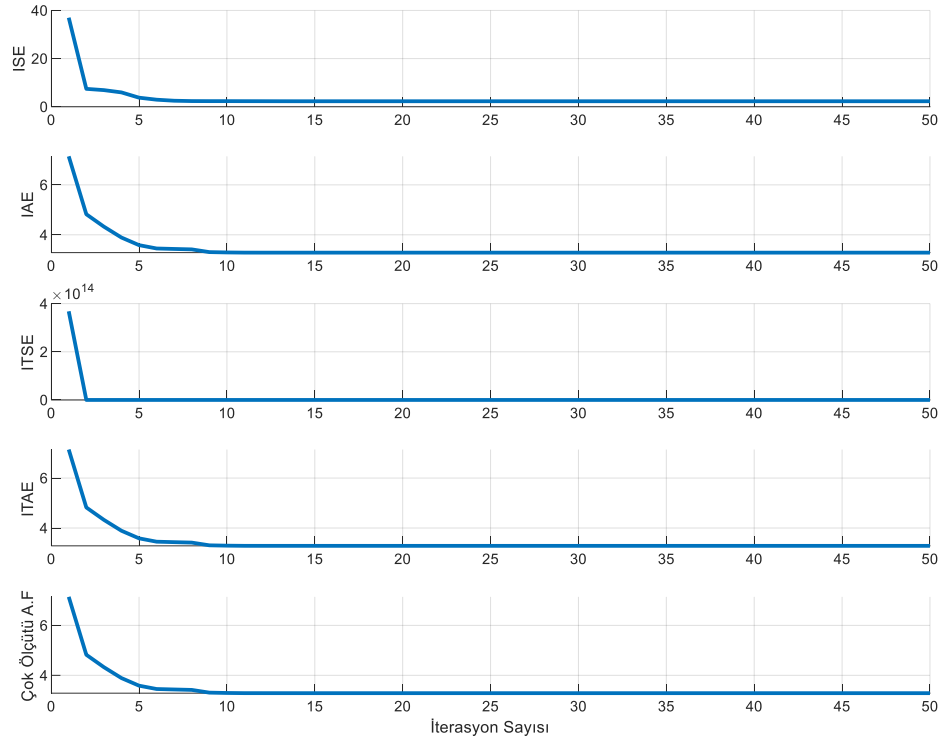
Şekil 4.7. Örnek 3 için oluşturulmuş Simulink modeli

Smith öngörücü yapısında kontrolör parametrelerinin optimizasyonu amacıyla FAGA Algoritmasından yararlanılmıştır. Bu kapsamda, hem integral performans kriterlerine hem de sistemin zaman cevabı özelliklerine dayalı amaç fonksiyonları tanımlanmış ve en uygun kontrolör parametrelerinin elde edilmesi hedeflenmiştir. Bu örnek için, kontrolör parametrelerinin alt ve üst sınır aralıkları sırasıyla $[0.001 \ 0.001 \ 0.001 \ 0.001 \ 0.001]$ ve $[20 \ 20 \ 20 \ 20 \ 20 \ 20]$ olarak belirlenmiştir. FAGA Algoritmasının uygulanmasında iterasyon adedi 50, popülasyon büyüklüğü ise 10 olarak belirlenmiş; algoritmanın güvenilirliğini ve kararlılığını test etmek amacıyla işlem toplamda 10 tekrar üzerinden gerçekleştirilmiştir. Minimum amaç fonksiyonu değerini veren çalıştırma sonucunda elde edilen en uygun PID kontrolör katsayıları esas alınarak, Çizelge 4.5'te bu parametrelerin detaylı gösterimi sunulmuştur.

Çizelge 4.5. Farklı amaç fonksiyonlarına göre elde edilen PID kontrolör parametreleri

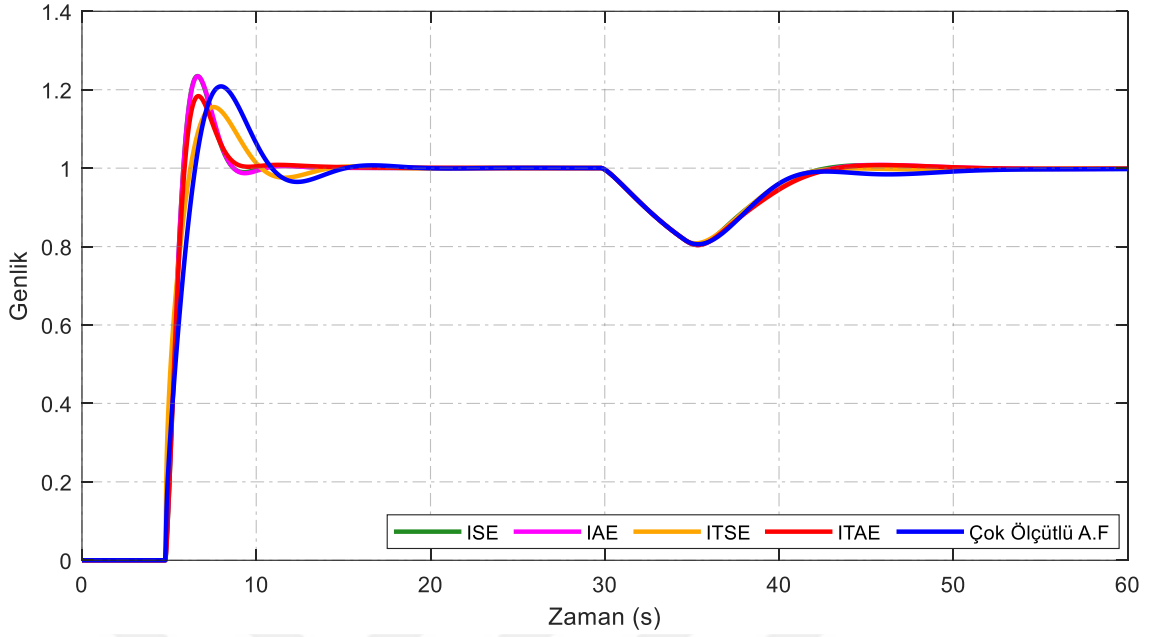
	ISE	IAE	ITSE	ITAE	Çok Ölçütlü Amaç Fonksiyonu
K_{p1}	20	20	16.2416	20	10.6407
K_i	9.96252	10.5867	11.604	7.31198	7.05023
K_{d1}	0.511312	0.923403	9.26426	0.592994	4.52807
K_{p2}	0.846953	0.809045	0.768233	0.793881	0.615535
K_{d2}	1.09414	0.766501	1.45404	0.792867	2.00831

FAGA Algoritması kapsamında, çeşitli integral performans kriterlerine dayalı olarak tanımlanan amaç fonksiyonları için yürütülen optimizasyon işlemlerine ait iterasyon süreci boyunca elde edilen amaç fonksiyonu değerleri Şekil 4.8’te karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Tüm kriterlerde benzer şekilde, yaklaşık ilk 5 iterasyonda hata değerlerinde hızlı bir azalma gözlemlenmiş, ardından değerler sabitlenerek minimum seviyelere ulaşmıştır. Bu durum, uygulanan optimizasyon algoritmasının etkili çalıştığını, uygun başlangıç popülasyonunun seçildiğini, yüksek yakınsama kabiliyetine sahip olduğunu ve tüm kriterler için hızlı bir şekilde uygun çözümler üretebildiğini göstermektedir. Sonrasında ise hata değerleri sabitlenmiş ve yaklaşık 10. iterasyondan itibaren optimizasyonun kararlı hâle geldiği görülmüştür. Çok ölçütlü amaç fonksiyonu için benzer şekilde hızlı bir düşüş ve ardından sabitlenme eğilimi görülmektedir. Bu durum, çoklu performans ölçütlerine dayalı yaklaşımın da başarıyla uygulanabildiğini göstermektedir.



Şekil 4.8. Farklı amaç fonksiyonları için yakınsama eğrileri (Örnek 3)

Zaman gecikmesi içeren kesir dereceli sisteme, Çizelge 4.5'te yer alan kontrolör parametrelerinin uygulanması sonucunda sistemin birim basamak cevap eğrileri elde edilmiştir. Elde edilen cevap eğrileri Şekil 4.9'da sunulmuştur.



Şekil 4.9. Farklı amaç fonksiyonlarına göre tasarlanan sistemler için birim basamak cevap eğrileri

Şekil 4.9’da her bir amaç fonksiyonuna göre tasarlanan kontrolörlerin sistem zaman cevapları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Tüm kriterlere göre sistemin referans takibi başarılıdır; ancak maksimum aşım ve yerleşme süresi açısından farklılıklar mevcuttur. ITSE ve ITAE ile elde edilen kontrolörler, daha az aşım ve daha yumuşak geçiş davranışı sergilemiştir. IAE ile optimize edilen kontrolör, hızlı bir yükselme süresi sağlamış, ancak ISE ile benzer aşım göstermiştir. Çok Ölçütlü Amaç Fonksiyonu ise her performans kriterini dengeleyerek genel olarak tatmin edici bir performans sunsa da, diğer kriterlere kıyasla hafif salınımlar gözlemlenmiştir. Yükselme ve tepe zamanı karakteristiklerinin de tüm performans kriterlerinde yakın olduğu şekilden görülmektedir.

Yapılan kontrolör tasarımının bozucu giderme performansı da analiz edilmiştir. Kontrol sistemine 25.saniyede 0.5 genlikli bir bozucu uygulanarak Şekil 4.9’da görülen bozucu giderme performansları gözlenmiştir. Performans kriterlerinin tümü için yapılan kontrolör tasarımlarının da benzer performanslar sergilediği şekilden görülmektedir. Ayrıca, Örnek 3 için zaman cevabı özellikleri detaylı olarak Çizelge 4.6’da sunulmuştur.

Çizelge 4.6. İntegral performans kriterlerine göre maksimum aşma ve zaman parametreleri

	ISE	IAE	ITSE	ITAE	Çok Ölçütlü Amaç Fonksiyonu
Yükselme Zamanı	0.7608	0.7741	1.0843	0.8081	1.3682
Yerleşme Zamanı	8.3576	8.3821	12.3871	8.5805	13.7325
Aşım	23.4676	23.4175	15.5740	18.3612	20.8386
Tepe Zamanı	6.6160	6.6391	7.5406	6.6706	7.9971

Örnekte, zaman gecikmeli ve kesir dereceli bir sistem için PID–PD kontrol yapısının çok ölçütlü optimizasyon yaklaşımı ile performans analizleri gerçekleştirilmiştir. Sistem modeli oldukça yüksek mertebeli kesirli dinamiklerin yanı sıra ciddi bir zaman gecikmesi barındırmaktadır. Bu karmaşıklık, klasik kontrol yaklaşımlarının sınırlarını zorladığı için çok döngülü ve optimize edilmiş kontrol yapılarının kullanımını gerekli kılmaktadır.

Sistem, bir PID ve bir de PD bloğunun paralel etkileşiminden oluşan yapıda kontrol edilmiştir. Bu yapı sayesinde, hem geçici rejim performansları iyileştirilmiş hem de sistemin frekans cevabındaki değişkenliğe karşı denge sağlanmıştır. Kullanılan optimizasyon algoritması, her bir performans kriterlerine göre denetleyici parametrelerini belirlemiştir.

Optimizasyon sürecinde tüm hata metriklerinin iterasyon başlarında ciddi oranda azaldığı ve 10. iterasyondan sonra kararlı hâle geldiği görülmektedir. Özellikle ITSE kriterine ait hata değeri başlangıçta çok yüksek (10^{14} seviyelerinde) olmasına rağmen, birkaç iterasyon içerisinde minimum seviyelere düşürülmüştür. Bu durum, algoritmanın oldukça zorlu bir başlangıç koşulunu dahi hızlıca iyileştirebildiğini ortaya koymaktadır.

Zaman alanı yanıtları incelendiğinde, IAE kriteri ile optimize edilen sistem yanıtının yüksek aşım ve salınımlara neden olduğu; buna karşılık çok ölçütlü amaç fonksiyonu ile elde edilen denetleyicinin sistem üzerinde dengeli ve kararlı bir kontrol sağladığı görülmektedir. Elde edilen sistem yanıtlarında çok ölçütlü yapının maksimum aşım

değerini önemli ölçüde düşürdüğü (yaklaşık %1.4 civarı) ve sistemin kısa sürede nominal değere geri dönebildiği gözlemlenmiştir.

PID–PD yapılarına ait kazanç değerleri analiz edildiğinde, çok ölçütlü yapı ile optimize edilen denetleyici kazançlarının genel olarak daha düşük tutulduğu görülmektedir. Bu, sistemin daha kontrollü ve enerji verimliliği açısından uygun şekilde yönlendirildiğini göstermektedir. Özellikle K_i , K_{p1} ve K_{d2} gözle görülür bir düşüş mevcuttur.

Zaman alanı performansları açısından bakıldığında, ISE ve IAE kriterleri ile tasarlanan kontrolörlerin aşım oranlarının oldukça yüksek olduğu, yerleşme zamanlarının ise orta düzeyde kaldığı görülmektedir. ITSE ile optimize edilen yapı da benzer şekilde uzun yerleşme zamanına sahiptir. Buna karşın çok ölçütlü yapı, daha uzun yükselme ve tepe zamanları pahasına minimum aşım ve kararlı bir yerleşme süresi sunmuştur. Bu, özellikle endüstriyel uygulamalarda güvenli çalışma aralığında kalmayı önceleyen sistemler için önemli bir avantajdır.

Bu örnekte uygulanan PID–PD çok döngülü kontrol yapısı ve çok ölçütlü optimizasyon stratejisi, yüksek mertebeli ve zaman gecikmeli kesir dereceli sistemlerin kontrolünde başarılı bir performans ortaya koymuştur. Tekil performans kriterleri sistemin belirli yönlerini iyileştirirken; çok ölçütlü yaklaşım daha dengeli ve pratikte uygulanabilir bir kontrol çözümü sağlamıştır.

4.4 Örnek 4

Literatürde Deniz ve Tan (Deniz F. N., 2016) tarafından önerilen ve zaman gecikmesi içeren aşağıdaki kesir dereceli transfer fonksiyonu bu çalışmada inceleme konusu olarak seçilmiştir. Söz konusu sistem için geliştirilen Smith öngörücü tabanlı PI kontrolör tasarımı ise aşağıda sunulmaktadır.

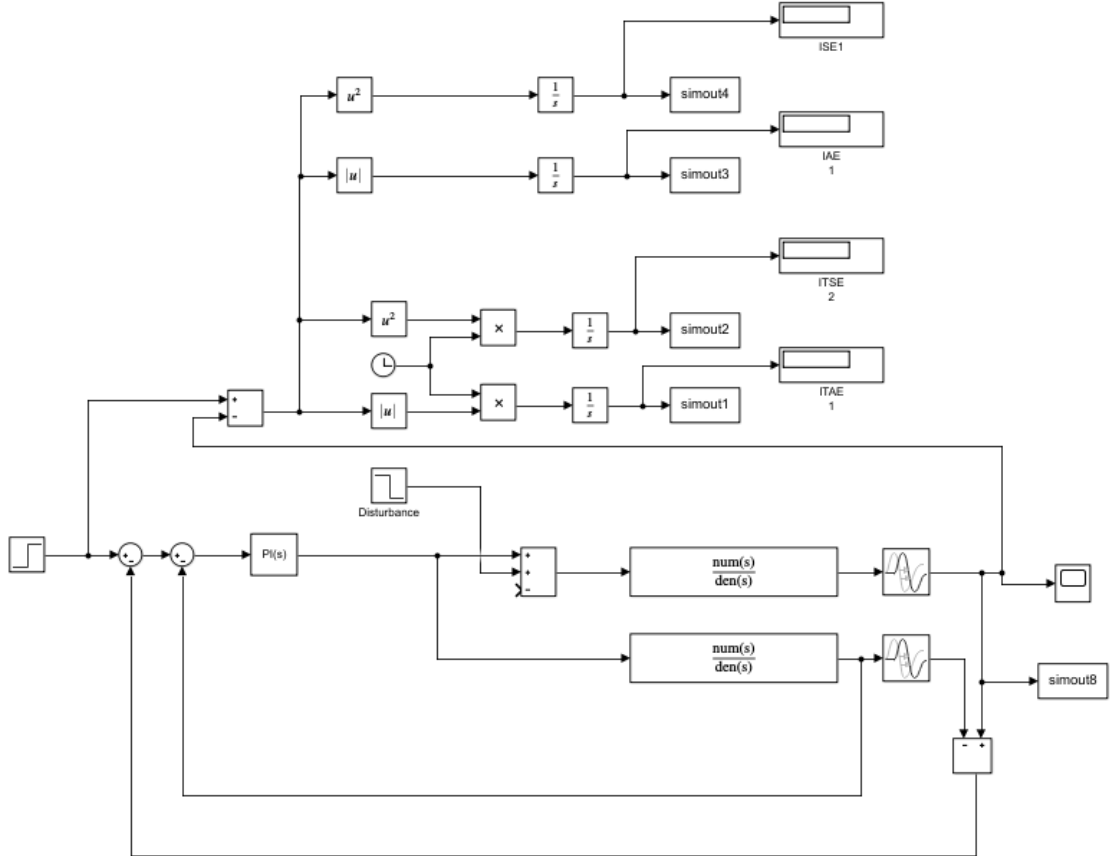
$$G_p(s) = \frac{1}{3s^{4.1} + 11.5s^3 + 14s^2 + 6.5s + 1} e^{-20s} \quad (4.7)$$

Denklem 4.7'deki zaman gecikmesine sahip kesir dereceli sistemin 5. dereceden Oustaloup yaklaşım yöntemine göre tam sayı dereceli yaklaşım modeli Denklem 4.8'deki

gibidir. Denklem 4.8 incelendiğinde, 9. mertebeden zaman gecikmeli bir sistem modelinin elde edildiği görülmektedir.

$$G_p(s) = \frac{s^5 + 51.84s^4 + 367.9s^3 + 403.3s^2 + 68.37s + 1.585}{4.775s^9 + 216.6s^8 + 1820s^7 + 6066s^6 + 1.028e04s^5 + 8879s^4 + 3965s^3 + 870s^2 + 78.68s + 1.585} \quad (4.8)$$

Bu örnekte Smith öngörücü yapısı kullanılarak bir kontrolör tasarımı yapılmıştır. Smith öngörücü yapısında ileri yolda PI kontrolör kullanılmıştır. Kullanılan kontrol sisteminin blok diyagramı Şekil 4.10'da verilmiştir.



Şekil 4.10. Örnek 4 için oluşturulmuş Simulink modeli

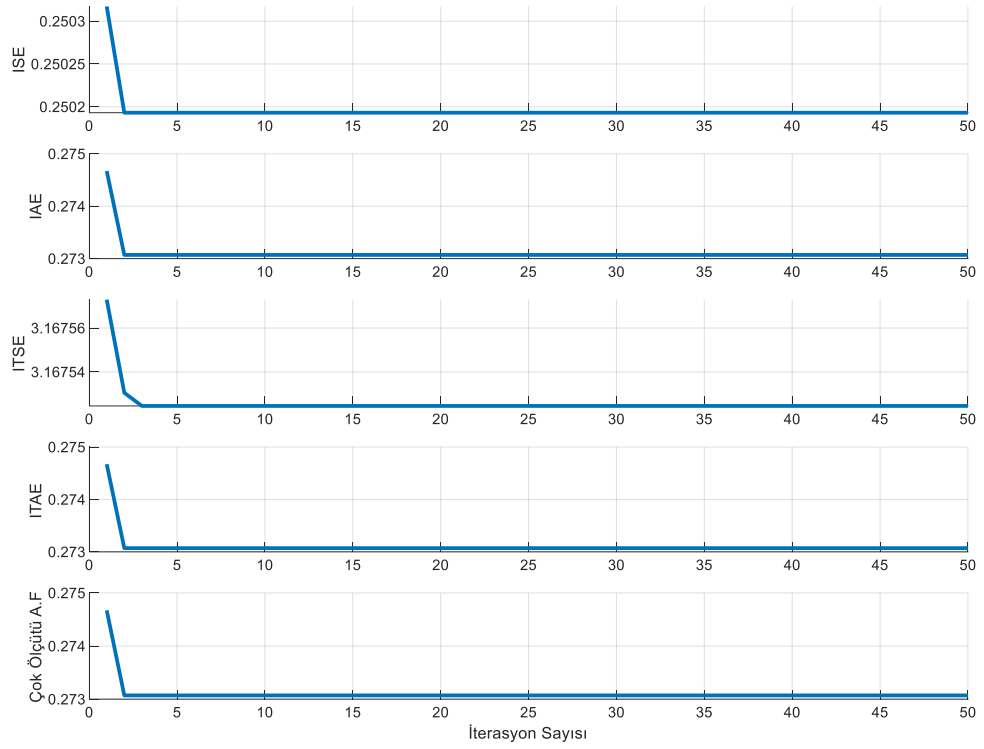
Bu çalışmada, optimizasyon algoritmasının uygulanmasında, integral performans indeksleri ile sistemin zaman cevabı kriterleri esas alınarak amaç fonksiyonları

geliştirilmiş; böylece kontrolör tasarımında en uygun parametrelerin elde edilmesi hedeflenmiştir. Kontrolör parametrelerinin alt ve üst sınır aralıkları sırasıyla [0.001 0.001] ve [0.5 0.5] olarak seçilmiştir. Gerçekleştirilen optimizasyon sürecinde, FAGA Algoritmasının parametreleri iterasyon sayısı 50 ve populasyon büyüklüğü 10 olacak şekilde tanımlanmış; algoritmanın istatistiksel tutarlılığını ve genel geçerliliğini değerlendirebilmek adına süreç 10 kez tekrarlanarak çoklu çalışma yapılmıştır. Gerçekleştirilen çoklu çalıştırmalar arasında, amaç fonksiyonu açısından en düşük değeri sağlayan optimizasyon çıktısı esas alınarak, bu çalıştırma için belirlenen optimal PI kontrolör parametreleri tespit edilmiş ve söz konusu parametrelerin ayrıntılı değerleri Çizelge 4.7’te sunulmuştur.

Çizelge 4.7. Farklı amaç fonksiyonlarına göre elde edilen PI kontrolör parametreleri

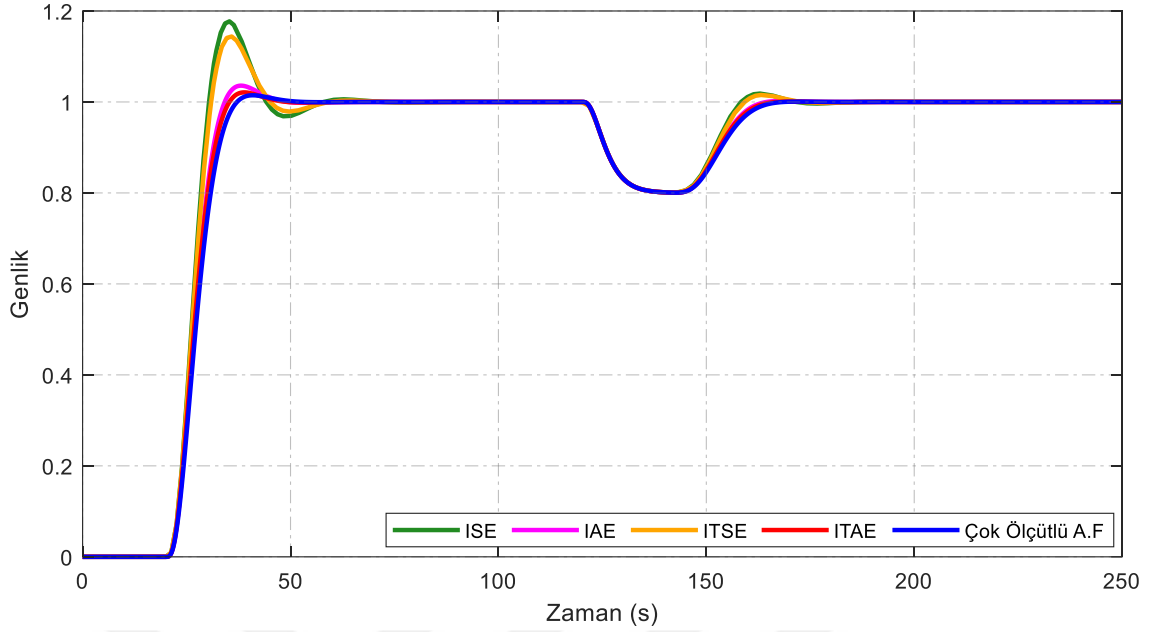
	ISE	IAE	ITSE	ITAE	Çok Ölçütlü Amaç Fonksiyonu
K_p	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.4533
K_i	0.2033	0.1486	0.1905	0.1427	0.1335

Bununla birlikte, farklı performans kriterlerine (ISE, ITAE, ITSE, ISTE) dayalı olarak oluşturulan amaç fonksiyonları için FAGA Algoritması ile yürütülen optimizasyon sürecine ait iterasyon-gelişim grafikleri Şekil 4.11’te sunulmuştur. Bu grafikler, her bir performans ölçütüne göre algoritmanın yakınsama davranışını ve minimum amaç fonksiyonuna ulaşma hızını görsel olarak ortaya koymakta, aynı zamanda kontrolör tasarımı açısından algoritmanın etkinliğini değerlendirme imkânı sağlamaktadır. Şekilden, iterasyon sayısı arttıkça tüm hata fonksiyonlarının çok hızlı bir şekilde minimum değerlere ulaştığı ve erken iterasyonlarda kararlılık sağlandığı gözlemlenmektedir. Bu da algoritmanın hızlı yakınsama özelliğini ve optimizasyon sürecinin etkinliğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.11. Farklı amaç fonksiyonları için yakınsama eğrileri (Örnek 4)

Zaman gecikmesi içeren kesir dereceli sisteme, Çizelge 4.7’de yer alan kontrolör parametrelerinin uygulanması sonucunda sistemin birim basamak cevap eğrileri elde edilmiştir. Elde edilen cevap eğrileri Şekil 4.12’de sunulmuştur.



Şekil 4.12. Farklı amaç fonksiyonlarına göre tasarlanan sistemler için birim basamak cevap eğrileri

Şekil 4.12’de ise elde edilen kontrolörlerin zaman yanıtları gösterilmiştir. Farklı hata kriterlerine göre tasarlanan kontrolörlerin genel olarak benzer dinamik özellikler sergilediği, sistemin belirli bir aşım sonrası kararlı hale geldiği görülmektedir. Özellikle Çok Ölçütlü A.F kriteriyle elde edilen kontrolörün diğerlerine kıyasla en dengeli geçici yanıtı sunduğu, daha az aşım ve hızlı yerleşme zamanı sağladığı anlaşılmaktadır. IAE ve ITAE kriterleri için aşım yaklaşık %3 iken ISE ve ITSE kriterlerinde bu değer % 17’lere çıkmaktadır. Şekil 4.12 yerleşme zamanı yönünden incelendiğinde ise ISE ve ITSE kriterlerinin diğer performans kriterlerine oranla daha uzun sürede kararlı yapıya geçtiği söylenebilir. Yükselme ve tepe zamanı karakteristiklerinin de tüm performans kriterlerinde yakın olduğu şekilden görülmektedir. Ayrıca, yapılan kontrolör tasarımının bozucu giderme performansı da analiz edilmiştir. Kontrol sistemine 100.saniyede 0.2 genlikli bir bozucu uygulanarak Şekil 4.12’de görülen bozucu giderme performansları gözlenmiştir. Performans kriterlerinin tümü için yapılan kontrolör tasarımlarının da benzer performanslar sergilediği şekilden görülmektedir. Ayrıca, Örnek 4 için zaman cevabı özellikleri detaylı olarak Çizelge 4.8’de sunulmuştur.

Çizelge 4.8. Farklı amaç fonksiyonlarına göre tasarlanan sistemler için zaman cevabı karakteristikleri

	ISE	IAE	ITSE	ITAE	Çok Ölçütlü Amaç Fonksiyonu
Yükselme Zamanı	6.4567	8.4075	6.8006	8.8000	9.6092
Yerleşme Zamanı	52.9133	42.6278	50.6207	39.9955	35.6378
Aşım	17.7154	3.5829	14.3830	2.1020	1.4656
Tepe Zamanı	35.3174	38.0534	35.8589	38.9350	40.8840

Bu çalışmada kullanılan dördüncü örnek sistem, yüksek mertebeli, kesir dereceli ve uzun zaman gecikmesine sahip bir sistem olarak tanımlanmıştır. Sistemin transfer fonksiyonu incelendiğinde, hem sistemin dinamik cevabının karmaşıklığı hem de gecikmenin büyüklüğü nedeniyle kontrolün oldukça güç olduğu görülmektedir. Bu tip sistemlerin kontrolünde klasik yöntemler yetersiz kalabilmekte, bu nedenle Genetik Algoritma gibi optimizasyon temelli yöntemlere başvurulmaktadır.

Uygulanan PI kontrolör tasarımı sürecinde ISE, IAE, ITSE, ITAE ve çok ölçütlü amaç fonksiyonu kullanılarak beş farklı optimizasyon yapılmıştır. Her bir kriter için elde edilen kontrolör parametreleri tablo hâlinde verilmiş ve sistemin zamandaki cevabı ile hata değerleri karşılaştırılmıştır.

Yükselme zamanı, yerleşme zamanı, aşım ve tepe zamanı gibi klasik performans ölçütleri incelendiğinde, çok ölçütlü amaç fonksiyonu ile elde edilen kontrolörün genel anlamda daha dengeli sonuçlar verdiği görülmektedir. Özellikle aşım ve yerleşme zamanı gibi kriterlerde, çoklu amaç fonksiyonu ile optimize edilen kontrolör, ISE ve ITSE gibi tekil hata kriterlerine göre daha kararlı bir yapı sergilemiştir. Buna karşın, tepe zamanı değeri bazı tekil kriterlerde daha düşük çıkabilmiştir; ancak bu durum, diğer kriterlerdeki dengesizlikle birlikte değerlendirildiğinde optimal bir sonuç değildir.

Örnek sistemde uygulanan çok ölçütlü optimizasyon yaklaşımı, yalnızca tek bir performans ölçütüne odaklanmaktan ziyade, genel sistem davranışını iyileştirme

açısından daha avantajlıdır. Bu durum, ileri düzey kontrol gerektiren sistemlerde çok ölçütlü yaklaşımların tercih edilmesi gerektiğini bir kez daha ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak yapılan benzetim çalışmalarında farklı performans kriterlerine göre tasarlanan kontrolörlerin sistem yanıtları karşılaştırılmıştır. Tüm kontrolörlerin referans takibi açısından başarılı olduğu, ancak aşım ve yerleşme süresi gibi geçici rejim özelliklerinde farklılıklar gösterdiği görülmüştür. ITAE ve IAE kriterleri daha düşük aşım ve daha yumuşak geçiş sağlarken, ISE ve ITSE kriterleri ise daha hızlı ancak biraz daha fazla aşım içeren cevaplar vermiştir. Çok Ölçütlü Amaç Fonksiyonu ile yapılan tasarım ise tüm bu kriterleri dengeleyerek en dengeli sistem yanıtını sunmuştur.

Ayrıca her bir kontrolör tasarımı için bozucu giderme performansı da test edilmiştir. Sisteme belirli zamanlarda bozucu giriş uygulanmış ve tüm kontrolörlerin bu bozucuları kısa sürede bastırdığı gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, önerilen kontrol yapılarının hem referans takibinde hem de bozucu etkilerin giderilmesinde etkili olduğunu göstermektedir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tezde, kesir dereceli sistemlere yönelik bazı kontrol uygulamaları gerçekleştirilmiş ve parametre optimizasyonuna dayalı çeşitli kontrolör tasarım yöntemleri geliştirilmiştir. Yapılan çalışmalar ve önerilen teknikler aşağıda özetlenmiştir.

Bu tez çalışmasında, zaman gecikmesine sahip kesir dereceli sistemlerin kontrolü için Smith öngörücüsü tabanlı bir yaklaşım önerilmiştir. Kesir dereceli sistemlerin tamsayı dereceli modellere kıyasla daha esnek ve gerçeğe yakın modelleme yetenekleri bulunmasına rağmen, bu sistemlerin kontrol tasarımı geleneksel yöntemlere göre daha karmaşık ve zordur. Bu bağlamda, Smith öngörücüsünün zaman gecikmesini telafi etme kapasitesi ile kesirli hesaplamanın dinamik yapısı birleştirilerek daha üstün kontrol performansları hedeflenmiştir.

Tek bir yöntemin tüm sistemlerde istenilen kontrol performansını sağlaması mümkün olmayabileceğinden, farklı kontrolör tasarım yaklaşımlarının geliştirilmesi literatürde önemli bir yer tutmaktadır. Bu bağlamda, kontrolör parametrelerinin belirlenmesinde optimizasyon temelli yöntemler günümüzde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu tez kapsamında, kesir dereceli sistemlerin kontrolü amacıyla PI, PID, I-PD gibi çeşitli kontrolör yapıları tasarlanmış; geliştirilmiş optimizasyon algoritmaları ile bu yapıların parametreleri başarıyla belirlenmiştir.

Çalışmada, farklı hata kriterlerine dayalı (ISE, IAE, ITSE, ITAE ve Çok Ölçütlü A.F) optimizasyon yaklaşımlarının kesir dereceli zaman gecikmeli sistemler üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Sunulan dört farklı örnek üzerinden gerçekleştirilen iterasyon-hata grafikleri, optimize edilen kontrolörlerin çoğunun ilk 10 iterasyon içerisinde hızlı ve kararlı bir şekilde yakınsadığını göstermektedir. Bu durum, kullanılan optimizasyon yönteminin etkili bir başlangıç koşulu sağladığını ve çözüm uzayında yüksek verimlilikle ilerlediğini ortaya koymaktadır.

Zaman tanım alanında elde edilen sistem yanıtları, her bir hata kriterine göre tasarlanan kontrolörlerin geçici durum davranışlarını ve bozucu etkiler karşısındaki duyarlılıklarını karşılaştırmalı olarak göstermiştir. Çok Ölçütlü A.F kriterine dayalı tasarımların, genel sistem performansı açısından daha dengeli sonuçlar verdiği ve aşım, yerleşme süresi ile

kararlılık kriterlerinde daha üstün performans sergilediği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, tekil hata kriterlerine dayalı kontrolörler belirli parametrelerde avantaj sunsa da tüm performans ölçütleri göz önünde bulundurulduğunda çoklu kriter optimizasyonunun daha tutarlı sonuçlar ürettiği tespit edilmiştir.

Son yıllarda Sezgisel Algoritmaların kontrolör parametrelerinin belirlenmesinde sıklıkla kullanıldığı bilinmektedir. Çalışma kapsamında, PID tipi kontrolörlerin parametrelerinin hassas biçimde belirlenmesi amacıyla Genetik Algoritma ve Ateş Böceği Algoritmasının güçlü yönlerinin birleştirildiği hibrit bir optimizasyon algoritması (FAGA) geliştirilmiştir. Bu yöntem, sistemin kontrol performansını değerlendirmede yaygın olarak kullanılan ISE, IAE, ITAE, ITSE ve çok amaçlı amaç fonksiyonu gibi integral performans kriterleri çerçevesinde test edilmiştir.

Farklı örnek sistemler üzerinde yapılan MATLAB/Simulink tabanlı benzetim çalışmaları, önerilen Smith öngörücü yapısının zaman gecikmesine sahip kesir dereceli sistemlerde başarılı kontrol performansı sergilediğini göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, önerilen yöntemin geleneksel kontrolör yapılarına kıyasla daha düşük maksimum aşma, daha kısa yerleşme süresi ve daha iyi kararlılık sağladığını ortaya koymuştur. Böylelikle, Smith öngörücüsü ve kontrolör yapıların entegrasyonu, modern kontrol uygulamaları için güçlü bir alternatif sunmaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, kontrolör tasarımında performans kriterlerinin çeşitliliği ve seçimi, sistem yanıtı üzerinde doğrudan etkili olup, çok ölçütlü optimizasyon yaklaşımlarının sistem dinamiklerini daha etkin biçimde şekillendirdiği sonucuna ulaşılmıştır.

KAYNAKLAR

- A. Narang, S. S. (2010). Continuous-time model identification of fractional-order models with time delays. *Special Issue on Continuous-time Model Identification*.
- Adeel Ahmad Jamil, W. F. (2022). Fractional-Order PID Controllers for Temperature Control: A Review. *Energies* 2022, 3800.
- Arıkan, T. (1997). Ölü zamanlı kontrol sistemlerinde tasarım yöntemleri.
- Astrom, K. J. (1992, April). A new Smith Predictor for controlling a process with an integrator and long dead-time.
- Atherton, D. (2009). *Control engineering: Bookboon*.
- Aydilek, İ. B. (2017). Değiştirilmiş ateşböceği optimizasyon algoritması ile kural tabanlı çoklu sınıflama. *Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*.
- Bingül, Z. (2007). Adaptive genetic algorithms applied to dynamic multiobjective problems. *Applied Soft Computing*, 791-799.
- Bode, H. W. (1945). *Network analysis and feedback amplifier design*.
- Boz, A. F. (2008). Sıfırsız 3 Kutuplu Sistemler İçin Optimal PI-PD Denetleyici Tasarım Yöntemi. *Politeknik Dergisi*, 11(4), 307-312.
- Boz, A. F. (2017). PID Controller Design Using Improved FireFly Algorithm. *8th International Advanced Technologies Symposium*, (s. 19-22). Elazığ.
- Carlson, G. E. (1961). Simulation of the fractional derivative operator and the fractional integral operator. 1–22. . Kansas State University.
- Chen, C.-T. (1993). *Analog and Digital Control System Design: Transfer-function, State-space, and Algebraic Methods*.
- Das, S. (2008). *Functional Fractional Calculus for System Identification and Controls*. Springer Berlin, Heidelberg.
- Deniz, F. N. (2016). A Model Identification Method for Tuning of PID Controller in a Smith Predictor Structure.
- Deniz, F. N. (2017). Kesir Dereceli Sistemlerde Modelleme ve Kontrol Uygulamaları.
- Doe, J. S. (2021). Smith Predictor Design for Time-Delay Systems: A Retrospective Analysis. *International Journal of Control Systems*, 112–125.
- Doğruer Tufan, T. N. (2017). Zaman Gecikmesine Sahip Kesir Dereceli Bir Kontrol Sisteminde Optimizasyon Metodu Kullanılarak PID Kontrolör Tasarımı.

- Doğruer Tufan, Y. A. (2017). Zaman Gecikmesine Sahip Kesir Dereceli Bir Kontrol Sisteminde Optimizasyon Metodu Kullanılarak PID Kontrolör Tasarımı. *GAZİOSMANPAŞA BİLİMSEL ARAŞTIRMA DERGİSİ (GBAD)*, 30-39.
- DOĞRUER, T. (2019). Kesir Dereceli Kontrol Sistemlerinde Parametre Optimizasyonuna Dayalı Kontrolör Tasarımı. *Doktora Tezi*.
- Doğruer, T. (2019, Aralık). Kesir Dereceli Kontrol Sistemlerinde Parametre Optimizasyonuna Dayalı Kontrolör Tasarımı.
- Dorf, R. R. (1995). *Modern Control Systems*.
- Fraga, H. (2008). Firefly luminescence: A historical perspective and recent developments. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 146-158.
- Franklin, G. J.-N. (2014). *Feedback Control of Dynamic Systems*. Pearson Education.
- I. Podlubny, I. P. (2002, July). Analogue Realizations of Fractional-Order Controllers. s. 281–296.
- I. Podlubny, L. D. (1997). On Fractional Derivatives, Fractional Order Dynamic Systems and $PI\lambda D\mu$ Controllers,. *Proceedings of the 36th Conference on Decision&Control*, (s. 4985-4990).
- K. J. Astrom, C. C. (1994). A new Smith predictor for controlling a process with an integrator and long dead-time. *Control Engineering Practice*.
- Kaya, İ. H. (2021). Kararlı Ters Cevaplı Artı Zaman Gecikmeli Sistemler İçin Optimal PI Denetleyici Tasarımı.
- Keith Oldham, J. S. (1974). *The Fractional Calculus Theory and Applications of Differentiation and Integration to Arbitrary Order*.
- Kennedy, J. a. (1995). Particle swarm optimization. *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks* (s. 1942-1948). Perth, WA, Australia: IEEE.
- Krishna, B. (2011). Studies on fractional order differentiators and integrators: A survey. *Signal Processing*, 386-426.
- Kuo, B. (2005). *Otomatik kontrol sistemleri*. Literatür Yayınları.
- Lukasik, S. Z. (2009). Firefly Algorithm for Continuous Constrained Optimization Tasks. *1. International Conference on Computational Collective*, (s. 97-106).
- M. Dorigo, V. M. (1996). Ant system: optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 29-41.

- Majihi, S. &. (2005). Modified Smith predictor and controller for processes with time delay. *International Journal of Control*, 293–302.
- Manabe, S. (2003). Early Development of Fractional Order Control.
- Michalewicz, Z. (1992). *Genetic Algorithms+Data Structures=Evolution Programs*. Heidelberg: Springer Verlag.
- Monje, C. A. (2010). *Fractional-order systems and controls: fundamentals and applications*. London.
- Nise, N. (2011). *Control Systems Engineering*. Wiley.
- Nusret, T. ., (2020). Kesirli Dereceli Kontrol Sistemlerinde Tamsayı Yaklaşım Metotlarının İncelenmesi. *Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 144-155.
- O'Dwyer, A. (2009). *Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules*. Imperial College Press.
- Ogata, K. (2010). *Modern Control Engineering*. Prntice Hall.
- Onan, A. (2013). Metasezgisel Yöntemler ve Uygulama Alanları. *Çukurova Üniversitesi İİBF Dergisi*, 113-128.
- Özdemir, C. U. (2024). METASEZGİSEL ALGORİTMALAR VE ÇALIŞMA ALANLARINA. *MCBÜ Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi*.
- Özkaçar, Y. D. (1998). Genetik Algoritma. *İ.Ü. İşletme Fakültesi Dergisi*, 69-82.
- Özyetkin M. M., C. Y. (2010). Design of PI and PID Controllers for Fractional Order Time Delay Systems.
- Özyetkin, M. M. (2013). Kesirli Dereceli Kontrol Sistemlerinin Dayanıklı Analiz ve Tasarımı.
- Pradesh, A. (2022). Load Frequency Control in Four Area Power Systems Using Fuzzy Logic PI Controller.
- Raja, L. G. (2021). New PI-PD Controller Design Strategy for Industrial Unstable and Integrating Processes with Dead Time and Inverse Response. *Journal of Control*,, 266-280.
- Rao, S. U. (2018). Enhanced modified Smith predictor for second-order non-minimum phase unstable processes. *Journal of Process Control*, 78–89.
- Tafreshi, M. M. (2017). An Enhanced Smith Predictor Based Control System Using Feedback-feedforward Structure for Time-delay Processes.

- Tavazoei, M. S. (2010). Notes on integral performance indices in fractional-order control systems. *Journal of Process Control*, 285-291.
- Vatansever, F. H. (2022). PID TUNING WITH UP-TO-DATE METAHEURISTIC. *Bursa Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*.
- Vinagre, B. M., Petras, I., Merchan, P., & Dorcak, L. (2001). Two digital realizations of fractional controllers: Application to temperature control of a solid. *2001 European Control Conference (ECC)*, s. 1764–1767.
- Vinodha, A. J. (2014). Genetic algorithm based PID controller tuning. *Advances in Artificial .*
- Vrecko, D. V. (2006). A new modified Smith predictor: The concept, design and tuning. *Control Engineering Practice*.
- Yang, X. S. (2013). *Swarm Intelligence and Bio-Inspired Computation: Theory and Applications*.
- Yang, X.-S. (2008). Firefly Algorithm. X.-S. Yang içinde, *Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms* (s. 81- 84).
- Yang, X.-S. (2009). Firefly algorithms for multimodal optimization. S. S. Media içinde, *Lecture Notes in Computer Science* (s. 3-6). Berlin.
- Yang, X.-S. (2009). Firefly Algorithms for Multimodal Optimization. *SAGA 2009*, (s. 169–178).
- Yang, X.-S. (2018). Firefly Algorithms for Multimodal Optimization.
- Yılmaz, A. (2020). Zaman Gecikmeli Sistemlerin Smith Tahmin Edici ile Kontrolü. *Yüksek Lisans Tezi*.
- Yüce, A. (2008). Kesir dereceli kontrol sistemlerinde zaman cevaplarının hesaplanması ve kontrol uygulamaları. Malatya : İnönü Üniversitesi.
- Zhuang, M. D. (1993). Automatic tuning of optimum PID controllers. *IEE Proceedings D (Control Theory and Applications)*. IET.

ÖZGEÇMİŞ

