

## Otomatik Gerilim Regülatörü için Evrimsel Algoritma Tabanlı Filtreli PID Denetleyici Tasarımı

Büşra ÖZGENÇ<sup>1\*</sup>, Mustafa Şinasi AYAS<sup>2</sup>, İsmail Hakkı ALTAŞ<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Karadeniz Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye

Geliş Tarihi: 15.04.2020

Kabul Tarihi: 29.05.2020

\*Sorumlu Yazar: busraozgenc@ktu.edu.tr

### Öz

Otomatik gerilim regülatör (OGR) sistemi, generatör terminal gerilimini belirtilen seviyede tutmak için güç sistemlerinde yaygın olarak kullanılır. OGR sisteminde farklı denetleyiciler kullanılarak generatör terminal geriliminin denetimi gerçekleştirilmektedir. Araştırmacılar yaptıkları çalışmalarda OGR sisteminin dinamik performansını iyileştirmeyi ve sürekli durum hatasını sifira indirmeyi hedeflemektedir ve bu kapsamda evrimsel algoritmalar yardımıyla denetleyici tasarlanmaktadır. Evrimsel algoritmalar, denetleyici parametrelerini belirlenen bir amaç fonksiyonunu göz önüne alarak optimal bir şekilde ayarlamak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, bir OGR sisteminin denetimi için iki farklı filtreli oransal-integral-türevsel (PID-F) denetleyici tasarlanmıştır. Denetleyicilerin parametrelerini ayarlamak için atom arama optimizasyonu (AAO) ve parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO) algoritmaları kullanılmıştır. Her bir denetleyici için OGR sisteminin geçici yanıt analizi, frekans analizi, dayanıklılık analizi Matlab/Simulink programında incelenmiş ve performans karşılaştırması yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, AAO algoritmasının PSO algoritmasından daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Ayrıca, AAO algoritması ile tasarlanmış PID-F denetleyicinin, AAO, PSO, biyocoğrafyaya dayalı optimizasyon (BDO) ve yapay arı koloni (YAK) algoritmaları ile ayarlanmış klasik PID denetleyicilere göre geçici yanıt karakteristiklerini iyileştirdiği ve sistemin kararlılığını ve dayanıklılığını arttırdığı sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Atom arama optimizasyonu, OGR sistemi, PID-F denetleyici, Parçacık sürüsü optimizasyonu.

## Design of Evolutionary Algorithm Based PID Controller with filter for an Automatic Voltage Regulator

### Abstract

The automatic voltage regulator (AVR) system is commonly used in power systems to keep the terminal voltage of generator at a specified level. The terminal voltage level is controlled by using different controllers in an AVR sistem. Researchers aim to improve dynamic performance of the AVR system and to decrease the steady state error to zero by using different controllers in their studies. They design controllers by utilizing evolutionary algorithms. Evolutionary algorithms are widely used to optimally tune controller parameters according to predefined objective function. In this study, two different proportional-integral-derivative with filter (PID-F) controllers are designed for the AVR system. Atom search optimization (ASO) and particle swarm optimization (PSO) algorithms are used to tune the parameters of the controllers. For each controller, transient response analysis, frequency analysis, and robustness analysis are examined in Matlab/Simulink for the AVR system and performance comparison is made. The results indicate that the ASO algorithm achieves better results than the PSO algorithm. In addition, it is concluded that the PID-F controller designed with ASO algorithm improves the transient response characteristics, stability and robustness compared to the classical PID controller of which the parameters are tuned by ASO, PSO, Biogeography based optimization (BBO) and Artificial bee colony (ABC).

**Keywords:** Atom search optimization, AVR system, PID-F controller, Particle swarm optimization.

## 1. Giriş

Güç sistemlerinde kullanılan elemanların dayanıklılığı ve ömrü, gerekli anma gerilim seviyesinin yüksek hassasiyetle sağlanmasıyla artırılabilir. Çünkü bu elemanlar anma gerilimi dikkate alınarak tasarlanmıştır. Ayrıca, hat kayıplarında etkili olan reaktif güç akışı bu gerilim değerine bağlıdır. Bu nedenle, gerilim seviyesinin istenen seviyede tutulması için kontrol edilmesi önemlidir (Gozde ve Taplamacioglu, 2011).

Hat kayıplarını azaltmaya yönelik yapılan gerilim kontrolü için otomatik gerilim regülatör (OGR) sistemleri kullanılmaktadır. OGR sistemi, generatör terminal gerilimini belirtilen seviyede tutmak için güç sistemlerinde yaygın olarak kullanılan bir kapalı çevrim kontrol sistemidir. OGR sistemleri, dinamik performansı geliştirmek için denetleyicilerle birlikte kullanılır. Klasik denetleyici yöntemlerinden biri olan oransal-integral-türevsel (PID) denetleyici, kullanım kolaylığı ve güçlü performansı nedeniyle OGR sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Bingul ve Karahan, 2018; Gozde ve Taplamacioglu, 2011). Bir PID denetleyici tasarımı geleneksel yöntemlerle yapılabileceği gibi meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları kullanılarak da yapılabilir. Ziegler-nichols yöntemi ve kazanç-faz marjın yöntemi gibi geleneksel yöntemlerin zayıf kapalı çevrim yanıtları sağlama ve doğrusal olmayan sistemlerde uygulama zorluğu gibi dezavantajları vardır (Coelho, 2009). Bu nedenle, araştırmacılar son yıllarda yaygın olan optimizasyon algoritmalarını kullanarak OGR sistemi için PID denetleyici parametrelerini ayarlamaktadır. Literatürde, guguk kuşu algoritması (Bingul ve Karahan, 2018), karınca koloni optimizasyonu (Blondin ve ark., 2018), simbiyotik organizma arama algoritması (Çelik ve Durgut, 2018), karınca aslanı optimizasyonu (Bourouba ve ark., 2019), arılar algoritması ve ateşböceği algoritması (Hameed ve ark., 2019), çekirge optimizasyon algoritması (Hekimoglu ve Ekinci, 2018), biyocoğrafyaya dayalı optimizasyon (Guvenc ve ark., 2016), yapay arı koloni algoritması (Gozde ve Taplamacioglu, 2011), sinüs-kosinüs algoritması (Hekimoglu, 2019), parçacık sürüsü optimizasyon algoritması (Al Gizi, 2018), gri kurt optimizasyon algoritması (Verma ve ark., 2017), genetik algoritma (Suribabu ve Chiranjeevi, 2016), bakteri yem arama optimizasyon algoritması (Anbarasi ve Muralidharan, 2016) gibi optimizasyon algoritmaları OGR sisteminde PID denetleyici parametrelerini optimal ayarlamak için kullanılmıştır. Bununla birlikte kesir dereceli PID denetleyici (Tang ve ark., 2017), kesirli yüksek dereceli diferansiyel geri beslemeli denetleyici (Ayas, 2019), oransal-integral-türev-ikinci dereceden türev (PIDD<sup>2</sup>) denetleyici (Sahib, 2015) ve oransal-integral-türev-hızlanma (PIDA) denetleyici (Sambariya ve Paliwal, 2016) gibi farklı denetleyiciler de OGR sistemlerinde kullanılmıştır. Fakat bu çalışmaların sayısı, PID denetleyici ile yapılanların yanında oldukça sınırlı sayıdadır.

Yukarıda bahsedilen çalışmalardaki ortak amaç, OGR sistem performansını yüzde aşma oranı, oturma süresi ve yükselme süresi gibi geçici yanıt karakteristikleri açısından iyileştirmektir. Bu amaç

doğrultusunda PID denetleyici tasarımları için farklı evrimsel algoritmalarından faydalanmışlardır. Fakat gerçekleştirilen bu tasarımlarda PID denetleyicinin türev vuruş etkisi göz önüne alınmamıştır. Türev vuruş etkisi, referans işaretindeki ani sıçramalar ile meydana gelir. Böyle bir durumda hata işaretinin ani sıçramasına neden olunur ki bu durumda hatanın türevi çok büyük bir değere ulaşarak denetleyicinin kısa bir süre için de olsa doyuma ulaşmasına yol açar. Türev vuruş etkisini önlemek için PID denetleyicinin türevsel bileşenine alçak geçiren filtre eklenir.

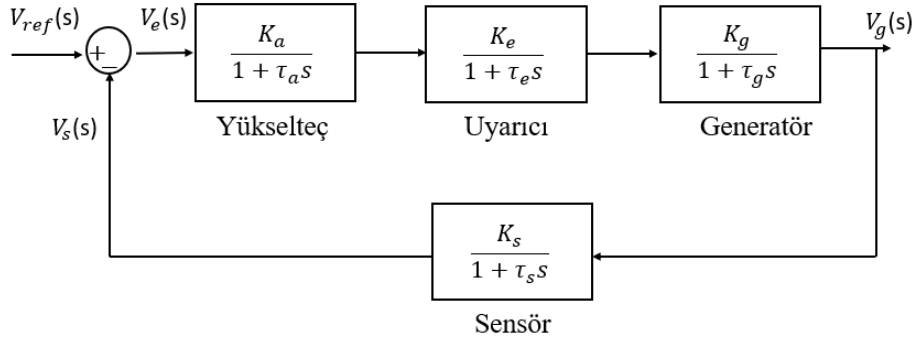
Bu çalışmanın amacı, OGR sisteminin dinamik performansını geliştirmek için yukarıda bahsedilen çalışmaların aksine bir filtrelili PID (PID-F) denetleyici tasarlamaktır. Bu kapsamda denetleyicinin parametreleri ve filtrenin kazancını optimize etmek için hem atom arama optimizasyon (AAO) hem de parçacık sürüsü optimizasyon (PSO) algoritmaları kullanılmıştır. Ayrıca filtrelili yapının klasik PID denetleyici ile karşılaştırmasını yapmak için de parametreleri optimize edilmiş dört farklı klasik PID denetleyici kullanılmıştır. Bu dört denetleyicinin ikisi bu çalışma kapsamında AAO ve PSO algoritmaları ile tasarlanmışken, diğer iki PID denetleyici ise BDO ve YAK algoritmaları kullanılarak tasarlanmış literatürde var olan PID denetleyicilerdir. Hem PID-F hem de PID denetleyicili OGR sistemlerinin benzetimi gerçekleştirilmiş ve performans karşılaştırması yapılmıştır. Karşılaştırmada ilk olarak OGR sisteminin basamak yanıtından elde edilen geçici yanıt karakteristikleri göz önünde bulundurulmuştur. Yüzde aşma oranı, oturma süresi ve yükselme süresinin yanı sıra sürekli durum hatası da dikkate alınmıştır. Ayrıca OGR sisteminin kararlılık analizi (hem bode analizi hem de kutup-sıfır analizi) ve dayanıklılık analizi de gerçekleştirilmiştir.

Makalenin geri kalan kısmı şu şekilde düzenlenmiştir: Bölüm 2'de, OGR sistem modeli, makalede kullanılan optimizasyon algoritmaları ve bu algoritmaları kullanarak önerilen PID-F denetleyicilerin tasarımı verilmiştir. OGR sisteminin benzetim sonuçları Bölüm 3'te verilmiştir. Son olarak, değerlendirmeler verilir.

## **2. Materyal ve Metot**

### **2.1. OGR Sisteminin Modellenmesi**

Yaygın kullanılan bir OGR sistemi, Şekil 1'de gösterildiği gibi her biri birinci dereceden transfer fonksiyonu ile modellenebilen yükselteç, uyarıcı, generatör ve sensör bileşenlerinden oluşmaktadır. Bu birinci dereceden transfer fonksiyonları için bir kazanç sabiti  $K$  ve bir zaman sabiti  $\tau$  gereklidir. Bu sabitlerin parametre aralıkları ve bu çalışmada kullanılan değerleri Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Denetimsiz OGR sisteminin blok diyagramı

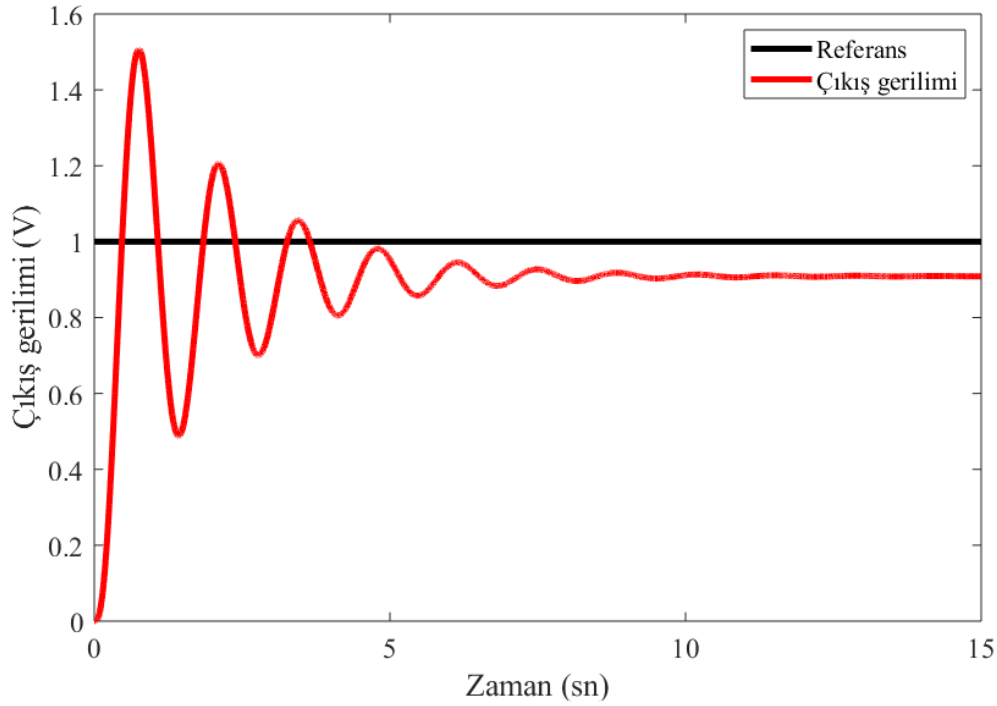
Tablo 1. OGR bileşenlerinin parametreleri (Gaing, 2004; Ayas, 2019)

Bileşenler	Parametre limitleri	Kullanılan değerler
Yükselteç	$10 \leq K_a \leq 40, 0.02 \leq \tau_a \leq 0.1$	$K_a=10, \tau_a=0.1$
Uyarıcı	$1 \leq K_e \leq 10, 0.4 \leq \tau_e \leq 1$	$K_e=1, \tau_e=0.4$
Generatör	$0.7 \leq K_g \leq 1, 1 \leq \tau_g \leq 2$	$K_g=1, \tau_g=1$
Sensör	$0.9 \leq K_s \leq 1.1, 0.001 \leq \tau_s \leq 0.06$	$K_s=1, \tau_s=0.01$

Tablo 1’de verilen parametre değerleri yerine yazıldığında denetimsiz OGR sisteminin kapalı çevrim transfer fonksiyonu eşitlik (1)’de verildiği gibidir.

$$G_{OGR} = \frac{0.1s + 10}{0.0004s^4 + 0.045s^3 + 0.555s^2 + 1.51s + 11} \quad (1)$$

OGR sisteminin herhangi bir denetleyici kullanılmadan elde edilen birim basamak yanıtı Şekil 2’de verilmiştir. Şekilden görülebileceği gibi, generatör çıkış geriliminde %50’ye yakın aşma, geç oturma süresi ve gözardı edilemeyecek sürekli durum hatası vardır. Bu nedenle, minimum aşma, erken oturma süresi ve minimum sürekli durum hatası elde etmek için iyi tasarlanmış bir denetleyici gereklidir.



Şekil 2. Denetimsiz OGR sisteminin basamak yanıtı

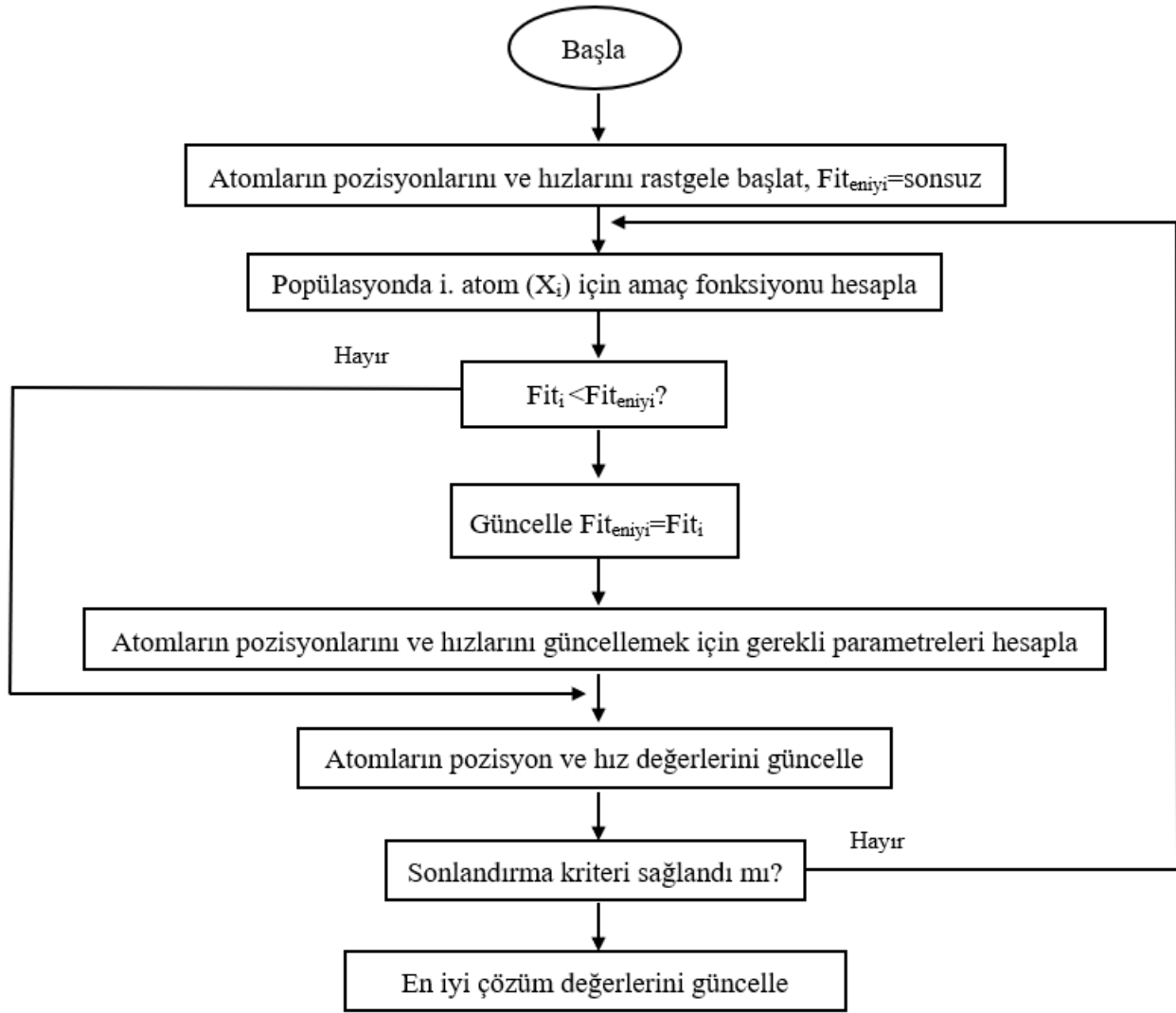
## 2.2. Atom arama optimizasyonu

Zhao, Wang ve Zhang tarafından geliştirilen atom arama optimizasyon (AAO) algoritması, moleküler dinamiklere dayanmaktadır. AAO algoritmasında arama uzayındaki her atomun pozisyonu, kütlesi tarafından ölçülen bir çözümü temsil etmektedir. Popülasyon içindeki tüm atomlar aralarındaki mesafeye göre birbirini itecek veya çekecektir. Ağır atomların hızı daha düşük olduğu için yerel çözüm bulmada başarılıdır, hafif atomlar ise hızı daha fazla olduğu için arama uzayında daha geniş bir çözüm alanı bulabilmektedir. Bu algorithmada kullanılan hız ve pozisyon güncelleme denklemleri sırasıyla eşitlik (2) ve (3)' te verilmiştir (Zhao ve ark, 2019).

$$v_i^d(t+1) = rand_i^d v_i^d(t) + a_i^d(t) \quad (2)$$

$$x_i^d(t+1) = x_i^d(t) + v_i^d(t+1) \quad (3)$$

Eşitlik (2) ve (3)'te  $t$  iterasyon sayısıdır,  $i$  atomun indeksidir,  $d$  değişken boyut sayısı,  $a_i$  atom  $i$ 'nin hızlanma katsayısı,  $rand$  0 ile 1 arasında rastgele bir sayı,  $v_i$  ve  $x_i$  sırasıyla atom  $i$ 'nin hızı ve pozisyonudur. Algoritma tasarımında Matlab programı kullanılmıştır. Algoritma akış çizelgesi Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. AAO algoritması akış çizelgesi

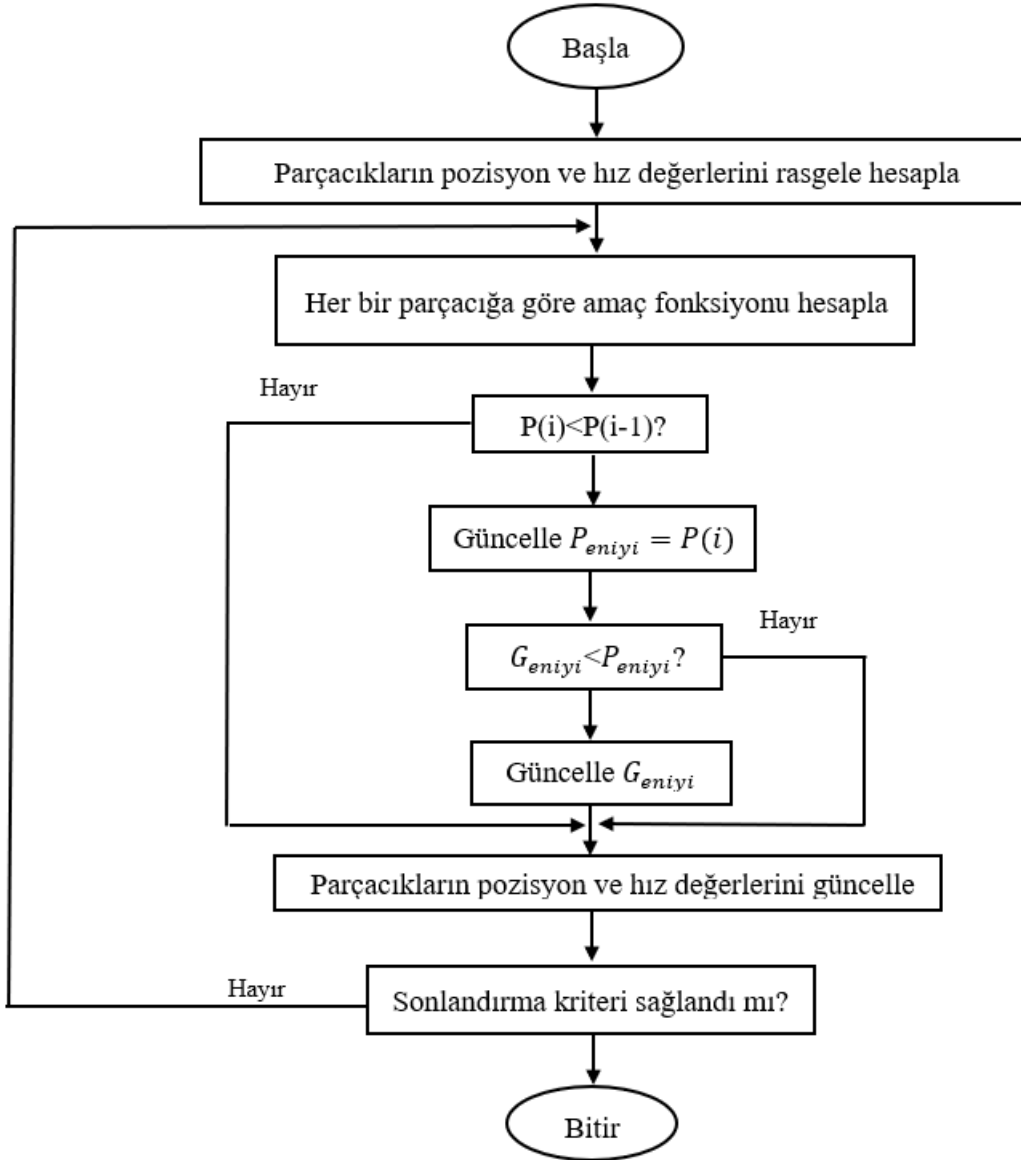
### 2.3. Parçacık sürüsü optimizasyonu

Kennedy ve Eberhart tarafından geliştirilen parçacık sürüsü optimizasyon algoritması, sürüye dayalı evrimsel bir algoritmadır (Kennedy ve Eberhart, 1995). Algoritma, yiyeceğe en yakın kuşun konumuna göre sürüdeki kuşların hareketine dayanmaktadır. Sürünün hareketini modellemek için parçacıkların konum ve hız güncelleme denklemleri kullanılır. Hız ve pozisyon denklemleri sırasıyla aşağıda verilmiştir.

$$V_i^{k+1} = w^k V_i^k + c_1 r_1 (P_{eniye}^k - X_i^k) + c_2 r_2 (G_{eniye}^k - X_i^k) \quad (4)$$

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1} \quad (5)$$

Eşitlik (4) ve (5)'te  $k$  yineleme sayısıdır,  $i$  parçacığın indeksidir,  $w$  hızı doğrudan etkileyen atalet ağırlığıdır,  $c_1$  ve  $c_2$  sırasıyla bilişsel ve sosyal sabitler olarak adlandırılan ivme faktörleridir,  $r_1$  ve  $r_2$  0 ile 1 arasında rastgele sayılardır,  $P_{eniye}$  en iyi yerel çözümdür,  $G_{eniye}$  en iyi küresel çözümdür,  $V_i$  ve  $X_i$  sırasıyla parçacık  $i$ 'nin hızı ve konumudur. Genellikle  $c_1$  ve  $c_2$  2'ye ayarlanırken,  $w$  0.9'dan 0.4'e lineer olarak azalır (Gaing, 2004). Algoritma tasarımında Matlab programı kullanılmıştır. Algoritmanın akış çizelgesi Şekil 4'te verildiği gibidir.

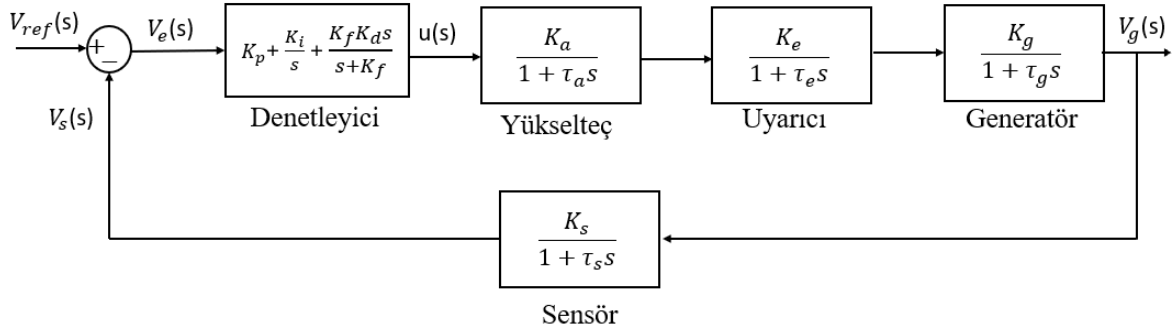


Şekil 4. PSO algoritması akış çizelgesi

#### 2.4. OGR Sistemi için PID-F Denetleyici Tasarımı

OGR sistem performansını iyileştirmek için AAO ve PSO optimizasyon algoritmaları yardımıyla PID-F denetleyici tasarımı benzetim ortamında gerçekleştirilmiştir. PID-F denetleyici içeren kapalı çevrim OGR sistemi Şekil 5'te gösterilmektedir. Kapalı çevrim OGR sistem

parametreleri Tablo 1’de verildiği gibi kullanılmıştır. Tasarlanan PID-F denetleyici transfer fonksiyonu eşitlik (6)’da verilmiştir.



Şekil 5. PID-F denetleyicili kapalı çevrim OGR sisteminin blok diyagramı

$$C_{PID-F} = \frac{(K_p + K_f K_d)s^2 + (K_i + K_f K_p)s + K_i K_f}{s^2 + K_f s} \quad (6)$$

Şekil 5’te verilen PID-F denetleyicili kapalı çevrim OGR sisteminin transfer fonksiyonu eşitlik (7)’de verilmiştir.

$$G_{OGR-PIDF} = \frac{(0.1K_p + 0.1K_f K_d)s^3 + (10K_p + 10K_f K_d + 0.1K_i + 0.1K_f K_p)s^2 + (10K_i + 10K_f K_p + 0.1K_i K_f)s + 10K_i K_f}{0.0004s^4 + 0,0454s^3 + (0.555 + 10K_p + 10K_f K_d)s^2 + (1.51 + 10K_i + 10K_f K_p)s + (1 + 10K_i K_f)} \quad (7)$$

Şekil 5’ten de görüleceği üzere PID-F denetleyicisinin birbirinden bağımsız dört parametresini yani oransal kazanç  $K_p$ , integral kazanç  $K_i$ , türevsel kazanç  $K_d$  ve filtre kazancı  $K_f$ ’yi optimum şekilde ayarlamak gerekmektedir. PID-F denetleyicinin ilgili parametreleri hem AAO hem de PSO algoritmaları kullanılarak eşitlik (8) ’de verilen amaç fonksiyonunu minimum yapacak şekilde ayarlanmıştır. Eşitlik (8) ’de,  $M_p$ ,  $Ess$ ,  $t_s$  ve  $t_r$  sırasıyla yüzde aşma oranı, sürekli durum hatası, oturma süresi ve yükselme süresini temsil etmektedir. Bu çalışmada kullanılan amaç fonksiyonu (Gaing,2004) çalışmasında tanımlanmıştır ve geçici yanıt karakteristiklerine ve sürekli durum hatasına dayanmaktadır.

$$AF = (1 - \exp(-1))(M_p / 100 + Ess) + \exp(-1)(t_s - t_r) \quad (8)$$

Algoritmaların 4 boyutlu arama uzaylarının alt limitleri tüm parametreler için sıfırken, üst limitleri  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  ve  $K_f$  için sırasıyla 2, 1, 1 ve 500 olarak alınmıştır. Bu çalışmada kullanılan AAO ve PSO algoritmalarında, popülasyon ve iterasyon sayıları 50 alınmıştır ve algoritmaların başlangıç



popülasyonları rastgele başladığı için 10 kez çalıştırılmıştır. 10 denemenin içinden en düşük amaç fonksiyonu değerinin elde edildiği denetleyici parametreleri Tablo 2’de verilmiştir. Önerilen PID-F denetleyicisindeki filtrenin etkisini göstermek için yukarıda bahsedilen aynı koşullar altında AAO ve PSO algoritmaları ile filtresiz klasik PID denetleyici tasarlanmıştır ve denetleyici parametreleri yine Tablo 2’de verilmiştir. Ek olarak, karşılaştırma yapmak amacıyla BDO ve YAK algoritmaları ile tasarlanmış PID denetleyici parametreleri de Tablo 2’de gösterilmektedir.

**Tablo 2.** PID-F ve PID denetleyici parametreleri ve karşılık gelen amaç fonksiyon değeri

Denetleyici	Parametreler				Amaç fonksiyon değeri	İterasyon
	$K_p$	$K_i$	$K_d$	$K_f$		
AAO-PID-F	0.65	0.4	0.24	460	0.041	35
AAO-PID	1.88	0.31	0.41	-	0.062	38
PSO-PID-F	0.68	0.42	0.25	494	0.044	45
PSO-PID	2	0.36	0.43	-	0.062	23
BDO-PID (Guvenc ve ark., 2016)	1.2464	0.5893	0.4596	-	0.3281	-
YAK-PID (Gozde ve Taplamacioglu, 2011)	1.6524	0.4083	0.3654	-	0.4391	-

### 3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada tasarlanan AAO-PID-F ve PSO-PID-F denetleyicilerinin OGR sistem kontrolündeki başarısını göstermek için ilgili filtreli denetleyiciler AAO-PID, PSO-PID, BDO-PID ve YAK-PID denetleyicileri ile kıyaslanmıştır. Kıyaslama yapmak için her bir denetleyici için ayrı ayrı olmak üzere OGR sistemin geçici yanıt analizi, kutup/sıfır analizi, bode analizi ve dayanıklılık analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler ve elde edilen sonuçlar alt başlıklar halinde aşağıda verilmiştir.

#### 3.1. Geçici Yanıt Analizi

Tablo 2’de parametre değerleri verilen PID-F ve PID denetleyiciler ayrı ayrı kullanılarak OGR sistemin birim basamak yanıtı elde edilmiştir. Farklı PID denetleyiciler ile denetlenmiş OGR sisteminin basamak yanıtları Şekil 6’da verilmektedir. Elde edilen yanıtların geçici yanıt karakteristikleri Tablo 3’te verilmektedir. Aynı zamanda kalıcı durum hatası ve performans metrik değerleri de Tablo 3’te sunulmuştur. Tablodaki ITAE ve ITSE metrikleri denetleyici performans karşılaştırması için literatürde yaygın olarak kullanılan metriklerdir. Bu performans metriklerinin ifadesi eşitlik (9) ve (10)’ da sırasıyla verilmiştir. Sonuçlar göz önüne alındığında filtreli PID denetleyicilerin (AAO-PID-F ve PSO-PID-F) klasik PID denetleyicilere göre OGR sistem

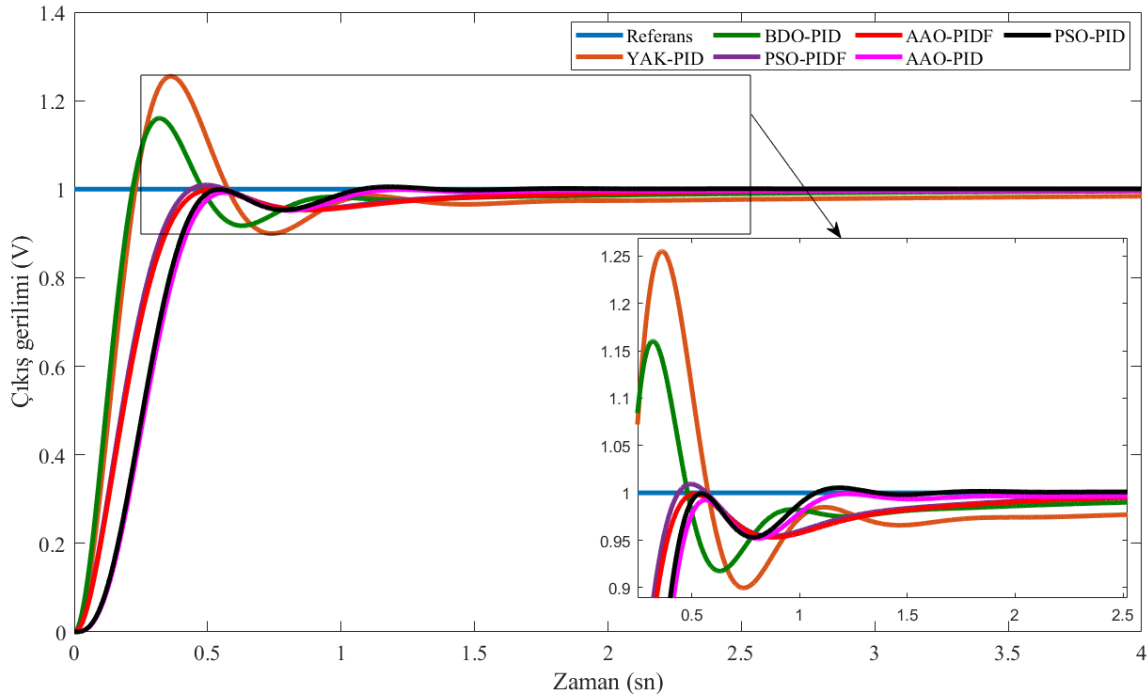
denetiminde daha başarılı olduğu anlaşılmaktadır. Çünkü en düşük amaç fonksiyon değeri AAO-PID-F ile 2. en düşük amaç fonksiyon değeri ise PSO-PID-F ile elde edilmiştir. Aynı zamanda AAO-PID-F ve PSO-PID-F ile elde edilen maksimum aşma oranı, oturma süresi, yükselme süresi ile amaç fonksiyonu (AF), ITAE ve ITSE metrik değerleri sırasıyla AAO-PID ve PSO-PID ile elde edilenlerden düşüktür ki bu sonuçta PID-F denetleyicisindeki filtrenin pozitif etkisini göstermektedir.

$$ITAE = \int_0^t |e(t)| dt \quad (9)$$

$$ITSE = \int_0^t te^2(t) dt \quad (10)$$

**Tablo 3.** Farklı denetleyiciler için elde edilen geçici yanıt karakteristikleri ve performans metrikleri

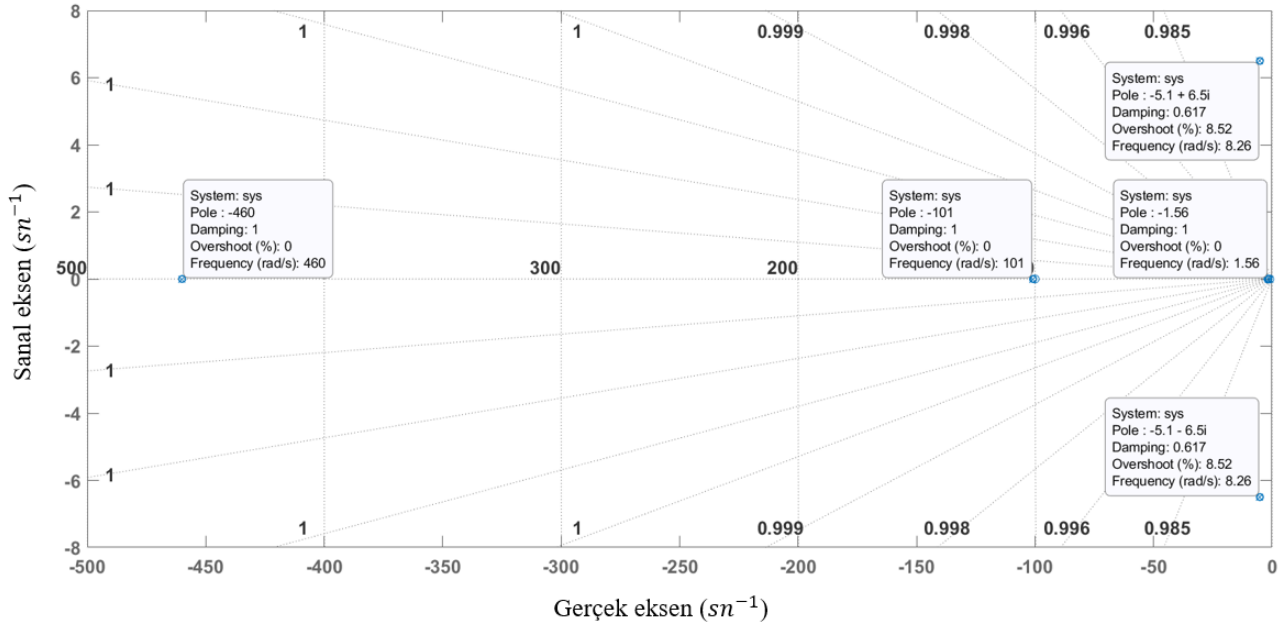
Denetleyici	M <sub>p</sub> (%)	t <sub>r</sub> (sn)	t <sub>s</sub> (sn)	Ess	AF	ITAE	ITSE
AAO-PID-F	0	0.28	0.388	0.0007	0.041	0.036	0.0068
AAO-PID	0	0.292	0.456	0.003	0.062	0.056	0.026
PSO-PID-F	0.956	0.261	0.362	0.0009	0.044	0.037	0.0068
PSO-PID	0.482	0.283	0.442	0.0003	0.062	0.0774	0.0253
BDO-PID (Guvenc ve ark., 2016)	16	0.149	0.766	-	0.3281	0.1146	0.0077
YAK-PID (Gozde ve Taplamacioglu, 2011)	25	0.156	0.920	-	0.4391	0.2224	0.0180



**Şekil 6.** Farklı PID denetleyiciler ile elde edilen OGR sisteminin basamak yanıtları

### 3.2. Kutup/Sıfır Analizi

Denetleyicili OGR sistem kararlılığını incelemek için kutup/sıfır analizi gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda Tablo 2’de verilen her bir denetleyici için kapalı çevrim sisteminin kutupları ve karşılık gelen sönüm oranları elde edilmiştir. Şekil 7 örnek olması amacıyla AAO-PID-F denetleyicili OGR sisteminin kutup ve sıfırlarını göstermektedir. Şekil incelendiğinde köklerin sol açık yarı düzlemde olduğu ve dolayısıyla sistemin kararlı olduğu gözükmemektedir. Diğer denetleyiciler kullanıldığında da OGR sisteminin kararlı olduğu sonucu yani bütün denetleyicilerin köklerinin sol açık yarı düzlemde olduğu Tablo 4’ten çıkarılmaktadır. Ayrıca Tablo 4’teki sönüm oranları incelendiğinde PID-F denetleyicilerin tüm kutuplarının sönüm oranının 1’e yakın olduğu görülmektedir.



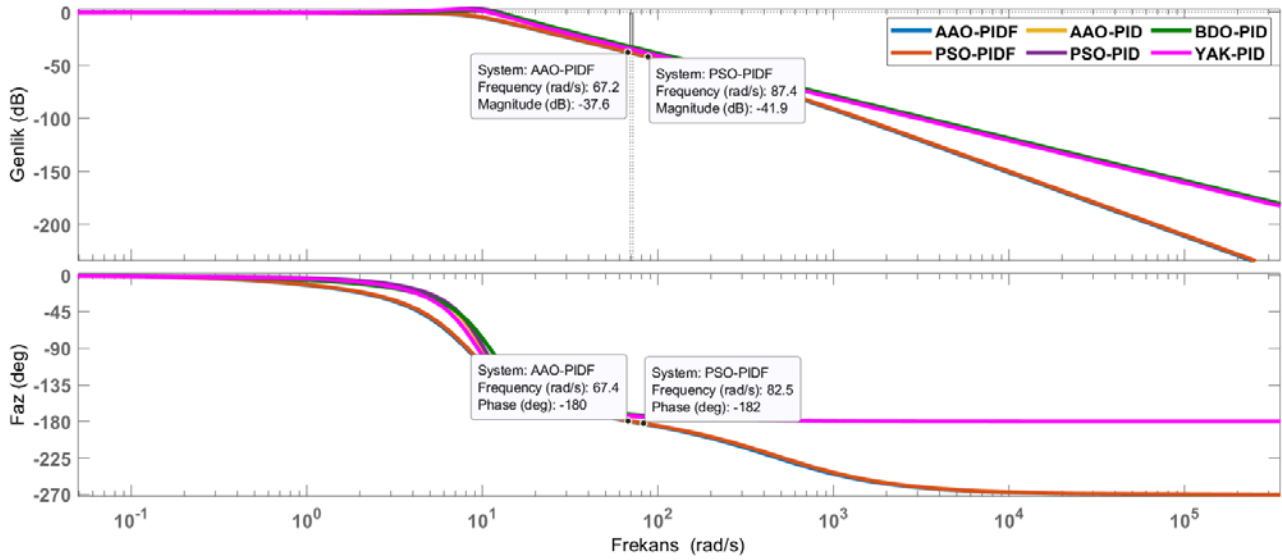
Şekil 7. Tasarlanan AAO PID-F denetleyicili kapalı çevrim OGR sisteminin kutup-sıfır çizimi

**Tablo 4.** OGR sisteminin Kapalı çevrim kutupları ve karşılık gelen sönüm oranları

Denetleyici	Kapalı Çevrim Sistem Kutupları	Sönüm Oranı
AAO-PID-F	-0.93	1.00
	-1.56	1.00
	-5.1+j6.5	0.617
	-5.1-j6.5	0.617
	-101	1.00
	-460	1.00
AAO-PID	-0.164	1.00
	-4.87	1.00
	-3.68+j9.08	0.376
	-3.68-j9.08	0.376
	-101	1.00
PSO-PID-F	-0.933	1.00
	-1.58	1.00
	-5.07+j6.69	0.604
	-5.07-j6.69	0.604
	-101	1.00
	-494	1.00
PSO-PID	-0.175	1.00
	-4.91	1.00
	-3.63+j9.35	0.362
	-3.63-j9.35	0.362
	-101	1.00
YAK-PID (Gozde ve Taplamacioglu, 2011)	-100.98	1.00
	-3.75+j8.40	0.40
	-3.75-j8.40	0.40
	-4.74	1.00
	-0.25	1.00
BDO-PID (Guvenc ve ark., 2016)	-100	1.00
	-4.80+j10.2	0.427
	-4.80-j10.2	0.427
	-2.1	1.00
	-0.585	1.00

### 3.3. Bode Analizi

Farklı denetleyicilerin kullanıldığı OGR sisteminin frekans uzay analizi için bode diyagramından faydalanılmıştır. Şekil 8 farklı denetleyiciler ile elde edilen bode diyagramlarını göstermektedir. İlgili diyagramlar kullanılarak elde edilen maksimum kazanç (dB), faz marjini (derece), gecikme marjini (s) ve bant genişliği (rad/s) değerlerine ait karşılaştırma sonuçları ise Tablo 5'te verilmektedir. AAO-PID-F ve PSO-PID-F denetleyicilerin sırasıyla AAO-PID ve PSO-PID denetleyicilere göre faz ve gecikme marjini iyileştirdiği tablodan görülmektedir. Dolayısıyla tasarlanan filtreli PID denetleyiciler ile elde edilen kapalı çevrim OGR sisteminin klasik PID denetleyiciler ile elde edilen kapalı çevrim OGR sisteminden daha kararlı olduğu sonucu Tablo 5'ten çıkarılmaktadır.



Şekil 8. Farklı denetleyiciler ile elde edilen Bode diyagramları

Tablo 5. OGR sisteminin bode çizimlerinden elde edilen sonuçlar

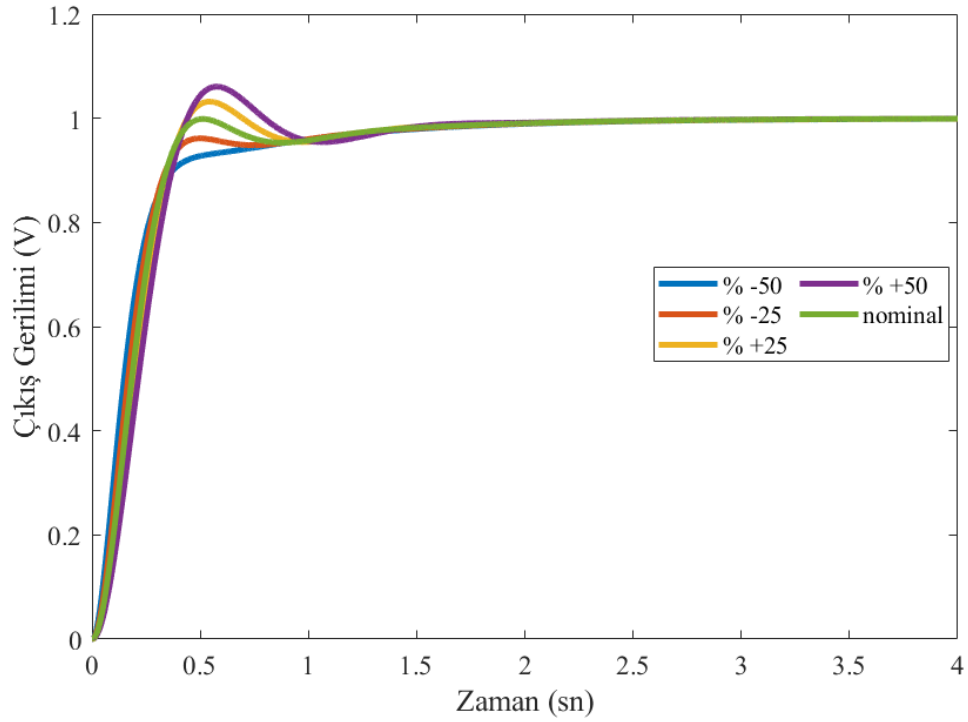
Denetleyici	Maksimum kazanç (dB)	Faz marjini (derece)	Gecikme marjini (s)	Bant genişliği (rad/s)
AAO-PID-F	1 (0 rad/sn)	180	İnf (0 rad/sn)	8.3292
AAO-PID	1.48 (8.13 rad/sn)	63.72	0.093 (11.97 rad/sn)	13.93
PSO-PID-F	1 (0 rad/sn)	180	İnf (0 rad/sn)	8.6915
PSO-PID	1.53 (8.48 rad/sn)	61.05	0.086 (12.43 rad/sn)	14.38
BDO-PID (Guvenc ve ark., 2016)	2.87 (7.52 rad/sn)	69.4	0.111 s (10.90 rad/sn)	12.880
YAK-PID (Gozde ve Taplamacioglu, 2011)	1.56 (8.65 rad/sn)	81.6	0.122 s (11.7 rad/sn)	14.284

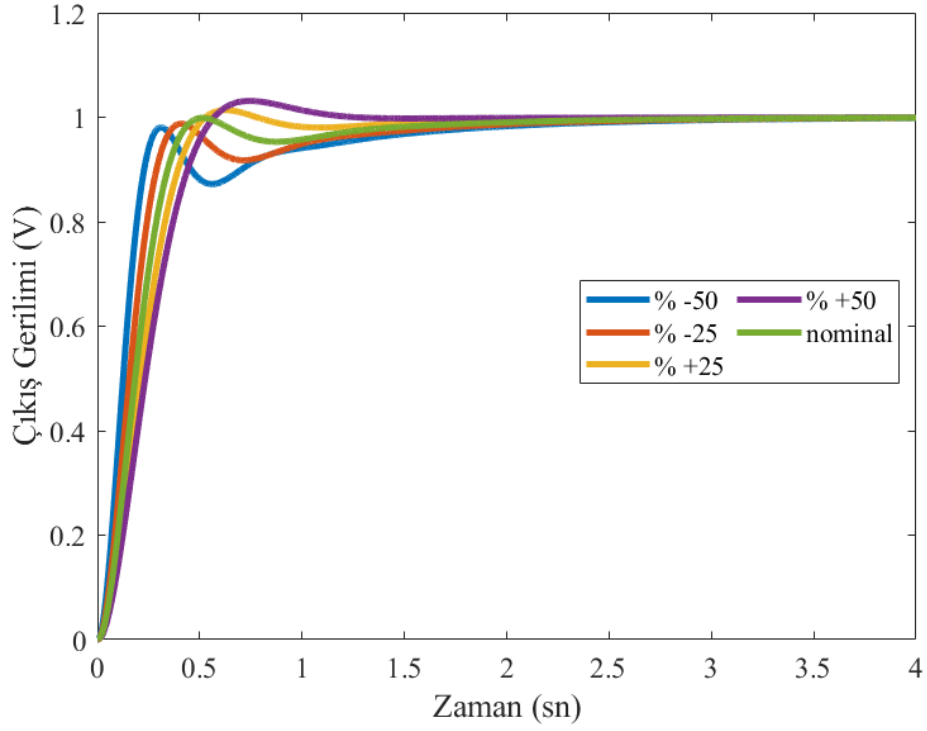
### 3.4. Dayanıklılık Analizi

Son olarak, AAO algoritması ile optimal ayarlanmış PID-F denetleyicili OGR sisteminde parametre değişikliğine karşı dayanıklılık analizi yapılmıştır. Dayanıklılık analizi için yükselteç, uyarıcı, generatör ve sensör bileşenlerinin zaman sabitleri % -50 ile % +50 arasında değiştirilerek geçici yanıt karakteristikleri irdelenmiştir. Her bir parametre değerine ait sonuçlar Tablo 6'da verilmiştir. Bununla birlikte, kapalı çevrim OGR sisteminin her bir zaman sabiti için birim basamak yanıtı incelenmiştir. Çıkış gerilim yanıtları Şekil 9-12 arasında verilmiştir. Elde edilen sonuçlar ile tasarlanan AAO-PID-F denetleyicisinin % -50 ve % +50 sınırlarında bile OGR sistemini kararsızlaştırmadığı ve kabul edilebilir sistem yanıtı sunduğu görülmektedir.

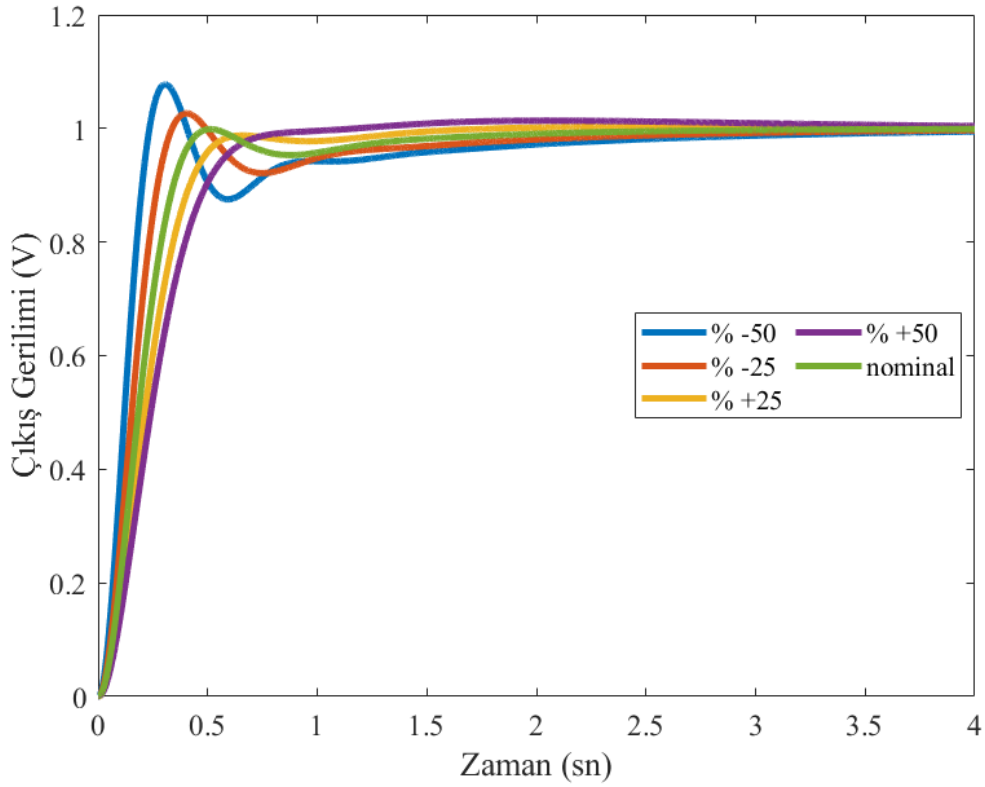
**Tablo 6.** AAO algoritması ile optimize edilen PID-F denetleyicinin dayanıklılık analizi sonuçları

Model Parametreleri	Değişim oranı (%)	Mp (%)	t <sub>s</sub> (sn)	t <sub>r</sub> (sn)	t <sub>p</sub> (sn)
$\tau_s$	-50	0	0.401	0.286	4
	-25	0	0.393	0.281	4
	+25	0.3703	0.379	0.273	0.508
	+50	0.8932	0.373	0.269	0.503
$\tau_g$	-50	7.7744	1.3050	0.154	0.306
	-25	2.6632	1.0210	0.214	0.404
	+25	0.3104	0.483	0.343	2.66
	+50	1.3708	0.58	0.41	2.0450
$\tau_e$	-50	0	1.1590	0.6560	4
	-25	0	1.0090	0.2310	4
	+25	1.3718	0.441	0.319	0.625
	+50	3.1352	0.49	0.358	0.744
$\tau_a$	-50	0	0.8450	0.3240	4
	-25	0	0.8230	0.2810	4
	+25	3.1929	0.3890	0.2820	0.5430
	+50	6.0625	0.6480	0.29	0.576

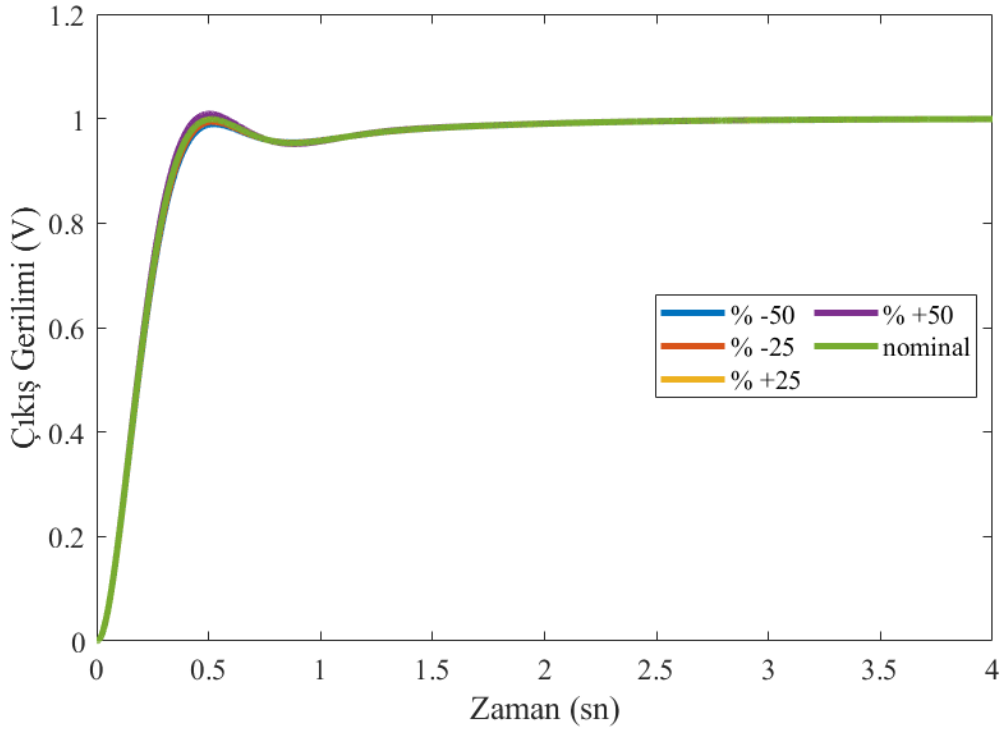
**Şekil 9.** AAO PID-F denetleyici ile tasarlanan OGR sisteminin  $\tau_a$  değişimi için basamak yanıtı



Şekil 10. AAO PID-F denetleyici ile tasarlanan OGR sisteminin  $\tau_e$  değişimi için basamak yanıtı



Şekil 11. AAO PID-F denetleyici ile tasarlanan OGR sisteminin  $\tau_g$  değişimi için basamak yanıtı



Şekil 12. AAO PID-F denetleyici ile tasarlanan OGR sisteminin  $\tau_s$  değişimi için basamak yanıtı

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada OGR sistem performansını iyileştirmek için parametreleri optimal ayarlanmış PID-F denetleyici tasarımı sunulmuştur. PID-F denetleyici parametrelerini ayarlamak için hem AAO hem de PSO algoritmaları kullanılmıştır. PID-F denetleyicisindeki filtrenin etkisini göstermek için AAO ve PSO algoritmaları ile klasik PID denetleyici tasarımları da gerçekleştirilmiştir. Ayrıca literatürde var olan iki farklı PID denetleyici (BDO-PID ve YAK-PID) de göz önüne alınarak her denetleyici için, geçici yanıt analizi, bode analizi, kutup-sıfır analizi ve dayanıklılık analizi Matlab/Simulink programında gerçekleştirilerek performans karşılaştırması yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, filtreli PID denetleyicilerin (AAO-PID-F ve PSO-PID-F) klasik PID denetleyicilere (AAO-PID, PSO-PID, BDO-PID ve YAK-PID) göre OGR sistemi denetiminde daha başarılı olduğu ve OGR sisteminin kararlılığını arttırdığı gözlemlenmiştir. Ek olarak, tasarlanan AAO-PID-F denetleyicinin yüksek orandaki parametre değişikliklerine bile dayanıklı olduğu, OGR sistemini kararsızlaştırmadığı ve kabul edilebilir sistem yanıtı sunduğu gözlemlenmiştir.



## Kaynaklar

- Al Gizi, A. J., (2018). A particle swarm optimization, fuzzy PID controller with generator automatic voltage regulator. *Soft Computing*, 23, 8839–8853.
- Anbarasi, S., Muralidharan, S., (2016). Enhancing the Transient Performances and Stability of AVR System with BFOATuned PID Controller. *Control Engineering and Applied Informatics*, 18(1), 20-29.
- Ayas, M. S., (2019). Design of an optimized fractional high-order differential feedback controller for an AVR system. *Electrical Engineering*, 101, 1221-1233.
- Bingul, Z., Karahan, O., (2018). A novel performance criterion approach to optimum design of PID controller using cuckoo search algorithm for AVR system. *Journal of the Franklin Institute*, 355(13) 5534-5559.
- Blondin, M. J., Sanchis, J., Sicard, P., Herrero, J. M., (2018). New optimal controller tuning method for an AVR system using asimplified Ant Colony Optimization with a new constrained Nelder–Mead algorithm. *Applied Soft Computing*, 62, 216-229.
- Bourouba, B., Ladaci, S., Schulte, H., (2019). Optimal Design of Fractional Order PID Controller for an AVR System using Ant Lion Optimizer. *IFAC-Papersonline*, 52(13), 200-205.
- Coelho, L. S., (2009). Tuning of PID controller for an automatic Voltage regulator system using chaotic optimization approach. *Chaos, Solitons and Fractals* 39 (4) 1504-1514.
- Çelik, E., Durgut, A., (2018). Performance enhancement of automatic voltage regulator by modified cost function and symbiotic organisms search algorithm. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 21, 1104-1111.
- Gaing, ZL., (2004). A particle swarm optimization approach for optimum design of PID controller in AVR system. *IEEE Transaction on Energy Conversation*, 19(2), 384–391.
- Gozde, H., Taplamacioglu, M. C., (2011). Comparative performance analysis of artificial bee colony algorithm for automatic voltage regulator (AVR) system. *Journal of the Franklin Institute*, 348 (8) 1927-1946.
- Guvenc U, Yigit T, Isik AH and Akkaya I (2016) Performance analysis of biogeography-based optimization for automatic voltage regulator system. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences* 24(3): 1150–1162.
- Hameed, N. S. S., Othman, W. A. F. W., Wahab, A. A. A., Alhady, S. S. N., (2019). Optimising pid controller using bees algorithm and firefly algorithm. *ROBOTIKA*, 1(1), 22-27.
- Hekimoğlu, B., Ekinci, S., (2018, June). Grasshopper optimization algorithm for automatic voltage regulator system. *2018 5th International Conference on Electrical and Electronic Engineering (ICEEE)* (pp. 152-156), Istanbul.
- Hekimoğlu, B., (2019). Sine-cosine algorithm-based optimization for automatic voltage regulator system. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 41(6), 1761-1771.
- Kennedy, J., Eberhart, R., (1995). Particle Swarm Optimization, *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks*, 4, 1942-1948.
- Sahib, M. A., (2015). A novel optimal PID plus second order derivative controller for AVR system. *Engineering Science and Technology*, 18, 194-206.
- Sambariya, D. K., Paliwal, D., (2016). Optimal design of PIDA controller using harmony search algorithm for AVR power system. *2016 IEEE 6th International Conference on Power Systems (ICPS)* (pp. 1-6). New Delhi.
- Suribabu, A. G., Chiranjeevi, B. T., (2016). Implementation of Fractional Order PID Controller for an AVR System Using GA and ACO Optimization Techniques. *IFAC-Papersonline*, 49(1), 456-461.
- Tang, Y., Li, X., Wang, Y., Li, N., Han, M. ve Liu, F., (2017). Optimal fractional order PID controller design for automatic voltage regulator system based on reference model using particle swarm optimization. *Int. J. Mach. Learn. & Cyber*, 8, 1595–1605.
- Verma, S. K., Yadav, S., Nagar, S. K., (2017). Optimization of Fractional Order PID Controller Using Grey Wolf Optimizer. *J Control Autom Electr Syst*, 28, 314-322.
- Zhao, W., Wang, L., Zhang, Z., (2019). Atom search optimization and its application to solve hydrogeologic parameter estimation problem. *Knowledge-Based Systems*, 163, 283–304.