

## Uçak eğim kontrol sistemi için ölüm oyunu optimizasyonuna dayalı PID-F denetleyicisi tasarımı

*PID-F controller design based on battle royale optimization for aircraft pitch control*

Ali Kıvanç ŞAHİN<sup>1,a</sup>, Ömür AKYAZI<sup>2,b</sup>, Erdiñ ŞAHİN<sup>\*3,c</sup>, Oğuzhan ÇAKIR<sup>4,d</sup>

<sup>1</sup> Erzurum Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Erzurum

<sup>2</sup> Karadeniz Teknik Üniversitesi, Of Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Trabzon

<sup>3</sup> Giresun Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Giresun

<sup>4</sup> Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Trabzon

• Geliş tarihi / Received: 12.10.2021

• Düzeltılarak geliş tarihi / Received in revised form: 22.12.2021

• Kabul tarihi / Accepted: 19.02.2022

### Öz

Bu makalede uçak eğim kontrol (UEK) sistemi için daha iyi bir dinamik ve kararlı sistem tepkisi elde edebilmek amacıyla PID-F denetleyicisi önerilmiştir. Önerilen PID-F denetleyicisinde ( $k_p$ ) kazancı ile P oransal etkiyi, ( $k_i$ ) kazancı ile I integral etkiyi, ( $k_d$ ) kazancı ile D türev etkisini ve ( $k_f$ ) kazancı ile F türev filtresini temsil etmektedir. Birbirinden bağımsız parametreler olan  $k_p$ ,  $k_i$ ,  $k_d$  ve  $k_f$  'nin en uygun değerlerini bulmak için ölüm oyunu optimizasyonu (BRO) algoritmasından yararlanılmıştır. BRO tabanlı PID-F denetleyicinin performansı BRO tabanlı PID denetleyicisiyle karşılaştırma yapılarak doğrulanmıştır. Ayrıca daha kapsamlı performans değerlendirmesi yapabilmek için BRO tabanlı PID-F denetleyicisi literatürde daha önceden aynı UEK sistemi için önerilen harris şahinleri optimizasyonu (HHO) ve atom arama optimizasyonu (ASO) kullanarak tasarlanan PID denetleyicileriyle karşılaştırılması yapılmıştır. Bu karşılaştırma için geçici tepki, frekans tepkisi ve kutup-sıfır analizlerinden yararlanılmıştır. Karşılaştırmadan elde edilen sonuçlara göre önerilen BRO/PID-F denetleyicisinin diğer denetleyicilere göre UEK sisteminin geçici ve frekans tepkilerini iyileştirme açısından daha üstün olduğunu göstermektedir.

**Anahtar kelimeler:** Ölüm oyunu optimizasyonu algoritması (BRO), PID-F denetleyicisi, Uçak eğim kontrol (UEK) sistemi

### Abstract

In this article, PID-F controller is proposed for aircraft pitch control (APC) system in order to obtain a better dynamic system response. PID-F controller represents P proportional action with gain ( $k_p$ ), I integral action with gain ( $k_i$ ), D derivative action with gain ( $k_d$ ) and F derivative filter with gain ( $k_f$ ). Battle royale optimization (BRO) algorithm is used to find the optimal values of the independent parameters  $k_p$ ,  $k_i$ ,  $k_d$  and  $k_f$ . The performance of the BRO based PID-F controller has been verified by comparing with the BRO based PID controller. In addition, in order to make a more comprehensive performance evaluation, the BRO based PID-F controller is compared to the PID controllers existing in the literature for the same aircraft pitch control system, designed using harris hawks optimization (HHO) and atom search optimization (ASO). Transient response, frequency response and pole-zero analyses are used for comparative analysis. The results obtained from the simulations show that the proposed BRO/PID-F controller is superior to other controllers in terms of improving the transient and frequency responses of the APC system.

**Keywords:** Battle royale optimization algorithm (BRO), PID-F controller, Aircraft pitch control (APC) system

\*c Erdiñ ŞAHİN; erdinc.sahin@giresun.edu.tr, Tel: (0454) 310 17 40, orcid.org/0000-0002-9740-599X

<sup>a</sup> orcid.org/0000-0003-4539-6419

<sup>b</sup> orcid.org/0000-0001-6266-2323

<sup>d</sup> orcid.org/0000-0002-1816-4682

## 1. Giriş

### 1. Introduction

Uçak endüstrisindeki teknolojik gelişmelere rağmen uçak kazalarının sayısı da önemli ölçüde artmıştır. Kaza sayısındaki bu artış can ve mal kaybının da artışı beraberinde getirmektedir. Bu uçak kazalarının büyük çoğunluğu uçak kontrolünün kaybindan dolayı gerçekleşmektedir. Kontrol kayıpları için pilotaj hatası, olumsuz hava koşulları ve iyi tasarlanmamış kontrol üniteleri örnek olarak verilebilir (Yıldırım & Savaş, 2009).

Uçağın kontrol ünitelerini iyileştirmek için araştırmacılar farklı denetleyiciler önermişlerdir. Oransal-integral (PI) denetleyici (Du vd., 2009), oransal-integral-türevsel (PID) denetleyici (Vishal & Ohri, 2009; Izci vd., 2020; Kaçtı vd., 2020; Chowdhury vd., 2017), kesir dereceli oransal-integral-türevsel (FOPID) denetleyici (Altıntaş & Aydın, 2016), bulanık mantık (FL) denetleyici (Wahid & Rahmat, 2010; Sayar & Ertunç, 2018), bulanık mantık oransal-integral-türevsel (FLPID) denetleyici (Zaeri vd., 2011), doğrusal kuadratik regülatör (LQR) (Radhakrishnan & Swarup, 2020) ve kayan kipli (SM) denetleyici (Khalid vd., 2019) uçak eğim kontrol (UEK) sistemi için önerilen denetleyicilerdir. Literatürde UEK sistemi için önerilen doğrusal ve doğrusal olmayan denetleyiciler olmasına rağmen bu kontrol teknikleri arasında en çok kullanılan PID denetleyicisidir. PID denetleyicisi basit ve uygulanabilir yapısıyla birlikte parametre değişimleri ve model belirsizliğine karşı sağlam bir performans gösterdiğinden kontrol sistemlerinde sıklıkla tercih edilmektedir. PID denetleyicisinin parametre değerlerini ayarlamak oldukça önemlidir. Genelde bu denetleyicinin parametre değerlerini ayarlamak için Ziegler-Nichols, kazanç ve faz marjı, Cohen-Coon ve kutup yerleştirme gibi yöntemler literatürde sıklıkla tercih edilmiştir. Ancak bu yöntemler en uygun parametre değerlerini belirlemede yetersiz kaldığından son zamanlarda meta-sezgisel algoritmalar aracılığıyla PID denetleyicisinin parametre değerleri belirlenmiştir. Literatürde PID denetleyicisinin parametre değerlerini belirlemek için farklı yaklaşımlı algoritmalar kullanılmış olup UEK sisteminin dinamik tepkisinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Atom arama optimizasyonu (Izci vd., 2020), harris şahinleri optimizasyonu (Izci vd., 2020), genetik algoritması (Vishal & Ohri, 2009) henry gaz çözünürlüğü algoritması (Kaçtı vd., 2020) literatürde uçak eğim kontrol sistemi için kullanılan algoritmalarından bazılarıdır. Sistem tepkisinin iyileştirilmesinde seçilen optimizasyon algoritmasının yanı sıra amaç fonksiyonun da

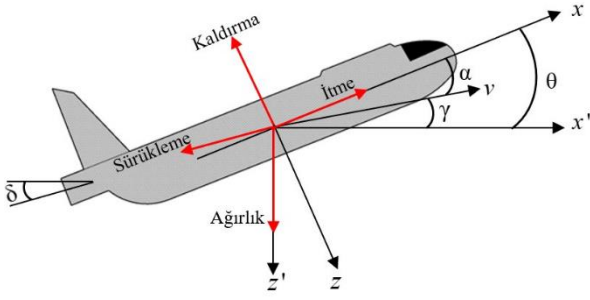
belirlenmesi önemlidir. Kontrolcünün parametre değerleri belirlenirken genellikle hatanın mutlak değerinin integrali (IAE), hatanın zaman ağırlıklı mutlak değerinin integrali (ITAE), hatanın karesinin integrali (ISE) ve hatanın karesinin zaman ağırlıklı integrali (ITSE) gibi hata tabanlı performans indeksleri tercih edilir. Öte yandan maksimum aşım, oturma zamanı, yükselme zamanı tepe zamanı gibi sistemin geçici karakteristik değerlerinden oluşan amaç fonksiyonları da kullanılmaktadır.

Bu çalışmada filtreli-oransal-integral-türevsel olarak adlandırılan PID-F denetleyicisi kullanılmış olup UEK sistem dinamik tepkisinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. PID-F denetleyicisinin parametre değerini belirleyebilmek için ölüm oyunu optimizasyonu algoritması (BRO) kullanılmıştır. Ayrıca denetleyicinin parametrelerinin belirlenmesinde ZLG amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Zwee Lee Gaing tarafından önerilen ZLG sistemin geçici karakteristik değerlerine ve kalıcı-durum hatasına dayanan bir amaç fonksiyonudur (Gaing., 2004). Önerilen BRO/PID-F denetleyicisinin üstünlüğünü gösterebilmek için BRO-PID ile literatürde var olan HHO-PID (Izci vd., 2020) ve ASO-PID (Izci vd., 2020) denetleyicileriyle performans karşılaştırılması yapılmıştır. Karşılaştırmada birim basamak tepkisi, Bode ve kutup-sıfır analizlerinden yararlanılmıştır. Makalenin geriye kalan kısımları şu şekilde düzenlenmiştir. Bölüm 2’de UEK sisteminin modellenmesinden, BRO algoritmasından ve BRO tabanlı PID-F denetleyicisinin UEK sistemine uygulanmasından bahsedilmiştir. Bölüm 3’te UEK sistemine ait simülasyon sonuçları sunulmuştur. Bölüm 4’te ise sonuçlar ve önerilere yer verilmiştir.

## 2. Uçak eğim kontrol sisteminin modellenmesi

### 2. Modeling of aircraft pitch control system

Şekil 1’de bir uçağa etki eden temel kuvvetler eksenler üzerinde gösterilmiştir. Burada sabit seyirde olan uçağın yüksekliği ve hızı sabit alınarak uçağın itme, sürüklenme, ağırlık ve taşıma kuvvetleri x ve y eksenlerinde dengelenmiştir. Bununla birlikte uçak eğim açısının tüm koşullar altında hızının değişmeyeceği kabul edilmiştir. Bu durumlar göz önünde bulundurularak, uçağın boyuna hareket denklemleri (1)-(3)’te verilmiştir (Control Tutorials for MATLAB and Simulink, n.d.).



Şekil 1. Uçağa etki eden temel koordinat eksenler ve kuvvetler

Figure 1. Basic coordinate axes and forces acting on the aircraft

$$\dot{a} = \mu\Omega\sigma \left[ -(C_L + C_D)a + \frac{1}{(\mu - C_W)}q - (C_W \sin \gamma)\theta + C_L \right] \quad (1)$$

$$\dot{q} = \frac{\mu\Omega}{2i_{yy}} \left[ [C_M - \eta(C_L + C_D)]a + [C_M + \sigma C_M(1 - \mu C_L)]q + \eta(C_W \sin \gamma)\delta \right] \quad (2)$$

$$\theta = \Omega q \quad (3)$$

(1)-(3)'te verilen denklemlerde  $a$  uçağın havadaki açısını,  $q$  eğim oranını,  $\theta$  eğim açısını,  $\delta$  havalanma sapma açısını,  $C_L$  taşıma sabitini,  $C_D$  sürüklenme sabitini,  $C_M$  moment sabitini,  $C_T$  itme sabitini,  $i_{yy}$  normalize edilmiş atalet momentini,  $\gamma$  uçuş yolu açısını temsil etmektedir.

$$\mu = \frac{\rho S \bar{c}}{4m} \quad (4)$$

$$\eta = \mu \sigma C_M \quad (5)$$

$$\sigma = \frac{1}{1 + \mu C_L} \quad (6)$$

$$\Omega = \frac{2U}{\bar{c}} \quad (7)$$

(4)-(7)'de görüleceği üzere  $m$  uçağın kütlesini,  $\mu$  havanın yoğunluğunu,  $S$  uçak kanadının alanını,  $\bar{c}$  ortalama veter uzunluğunu,  $U$  denge durumundaki uçuş hızını temsil etmektedir.

Bu çalışmada Boeing ticari uçaklarından birine ait olan sayısal veriler kullanılmış olup (8)-(10)'da verilmiştir (Control Tutorials for MATLAB and Simulink, n.d.).

$$\dot{a} = -0.313a + 56.7q + 0.232\delta \quad (8)$$

$$\dot{q} = -0.0139a - 0.426q + 0.0203\delta \quad (9)$$

$$\dot{\theta} = 56.7q \quad (10)$$

Yukarıda verilen denklemlerin tüm başlangıç koşulları sıfır alınıp Laplace dönüşümü uygulandığında UEK sisteminin transfer fonksiyonu (14)'deki gibi elde edilir (Control Tutorials for MATLAB and Simulink, n.d.).

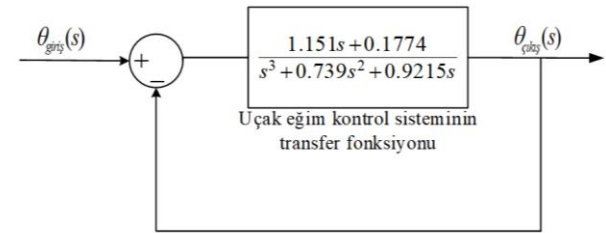
$$sA(s) = -0.313A(s) + 56.7Q(s) + 0.232\Delta(s) \quad (11)$$

$$sQ(s) = -0.0139A(s) - 0.426Q(s) + 0.0203\Delta(s) \quad (12)$$

$$s\theta(s) = 56.7Q(s) \quad (13)$$

$$G_{UEK}(s) = \left\{ \frac{\Theta(s)}{\Delta(s)} = \frac{1.151s + 0.1774}{s^3 + 0.739s^2 + 0.9215s} \right. \quad (14)$$

Şekil 2'de denetimsiz kapalı çevrim UEK sisteminin blok diyagramı gösterilmektedir.

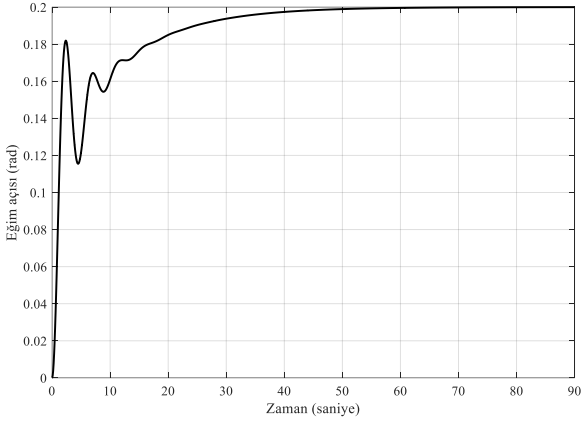


Şekil 2. Denetimsiz kapalı çevrimli UEK sisteminin blok diyagramı

Figure 2. Block diagram of uncontrolled closed loop APC system

Uçak eğim kontrol sisteminde Şekil 2'de gösterilen transfer fonksiyonunun ve 0.2 radyan giriş sinyali ( $\delta$ ) değerlerinin tercih edilmesinin sebebi literatürde var olan PID denetleyicileriyle karşılaştırma yapmak ve PID-F denetleyicisindeki filtrenin pozitif etkisini göstermektir. 0.2 radyan giriş sinyali olarak alınan denetimsiz kapalı çevrim birim basamak tepkisi Şekil 3'te gösterilmiştir. Şekil 3'te denetimsiz kapalı çevrimli UEK sisteminin verilen giriş sinyaline karşılık çıkış sinyali değerine bakıldığında yerleşme zamanının çok uzun olduğu görülmektedir. Dolayısıyla denetimsiz kapalı çevrimli UEK sisteminin yerleşme zamanını iyileştirebilmek için etkili bir

denetleyicinin tasarlanması gerektiği sonucuna varılmıştır.



**Şekil 3.** Denetimsiz uçak eğim kontrol sisteminin birim basamak tepkisi

**Figure 3.** Step response of uncontrolled aircraft pitch control system

## 2.1. Ölüm oyunu optimizasyonu (BRO) algoritması

### 2.1. Battle royale optimization (BRO) algorithm

2020 yılında Farshi tarafından önerilen ölüm oyunu optimizasyonu dijital bir oyun olan PUBG'den esinlenerek tasarlanan popülasyon tabanlı bir algoritmadır (Rahkar Farshi, 2021). Ayrıca doğrusallaştırılmış dörtlü tank sisteminin sıvı seviyesinin kontrolünde (Şahin vd., 2021), araç seyir sisteminin kontrolünde (Şahin vd., 2021) ve 6 eksenli PUMA 560 robot kolunun ters kinematik probleminde (Rahkar Farshi, 2021) etkinliği ve üstünlüğü kanıtlanmış bir algoritmadır. Bu algoritmada her bir birey asker olarak temsil edilmiş olup askerler silahını kullanarak kendine en yakın konumdaki olan düşman askeri yaralamaya çalışır (Şahin vd., 2021). Yaralanan askerin hasar seviyesi artışı aşağıdaki gibidir.

$$x_i.hasar = x_i.hasar + 1 \quad (15)$$

Burada  $x_i.hasar$  popülasyon içerisindeki  $i$ 'inci askerin aldığı hasar seviyesini belirtmektedir. Yaralanan askerin aldığı hasar seviyesinin sıfırlanması için iki durum vardır. Birinci durum yaralanan asker sonraki iterasyonda rakibine hasar verirse aldığı hasar seviyesi sıfırlanır. İkinci durumda yaralanan askerin aldığı hasar seviyesi arttıkça problem uzayında tanımlanan eşik değerine bakılır. Problem uzayından tanımlanan eşik değerini geçtiğinde ise asker ölür. (16)'daki denklem kullanılarak ölen asker  $d$  boyutlu problem uzayında tekrar canlandırılarak konumlandırılır.

Böylece askerin aldığı hasar seviyesi tekrar sıfırlanmış olur.

$$x_{hasar,d} = x_{hasar,d} + r(x_{en\ iyi,d} - x_{hasar,d}) \quad (16)$$

(16)'da belirtilen  $r$ , 0 ile 1 arasında rastgele olarak değişen bir sayıyı,  $x_{hasar,d}$  yaralanan askerin  $d$  boyuttaki konumunu ve  $x_{en\ iyi,d}$  ise  $d$  boyutta şimdiye kadar bulunan en iyi çözümü ifade etmektedir.

$$x_{hasar,d} = r(ub_d - lb_d) + lb_d \quad (17)$$

(17)'de  $lb_d$  ve  $ub_d$  sırasıyla  $d$  boyutlu problem uzayındaki alt sınır ve üst sınırı belirtmektedir. İterasyon süresi boyunca arama uzayı küçülüp en iyi çözüme ulaşmaya çalışır. En iyi çözüme ulaşmak için kullanılan denklem aşağıdaki gibidir.

$$\Delta = \Delta + \text{round}\left(\frac{\Delta}{2}\right) \quad (18)$$

(18)'de verilen denklemde  $\Delta$ 'ın başlangıç değeri  $\Delta = \log_{10}(\text{İterasyon Sayısı})$  olarak belirlenir.

$$lb_d = x_{en\ iyi,d} - \overline{SD}(x_d) \quad (19)$$

$$ub_d = x_{en\ iyi,d} + \overline{SD}(x_d) \quad (20)$$

$lb_d$  ve  $ub_d$  (19) ve (20)'de verilen denkleme göre güncellenir. Ayrıca alt ve üst sınır olan  $lb_d$  ile  $ub_d$  orijinal sınırları aştığında bu parametre değerleri sınır değerlerinin değerini alır.  $\overline{SD}(x_d)$  ise  $d$  boyutlu arama uzayındaki bütün popülasyonun standart sapmasını belirtir. BRO algoritmasına ait işlem basamakları aşağıda verilmektedir.

Adım 1. BRO algoritmasında kullanılan parametre değerlerini (popülasyon sayısını, iterasyon sayısını ve eşik değerini) tanımla ve askerlerin pozisyonlarını rastgele olarak başlat.

Adım 2.  $i$ 'inci askerle kendisine konum olarak en yakın olan  $j$ 'inci askeri karşılaştır.

Adım 3. Yaralanan askeri '*yaralı*' ve galip gelen askeri '*galip*' olarak iki farklı değişkene ata.

Adım 4. Yaralı askerin almış olduğu hasar seviyesi eşik değerinden fazla ise (16)'yı kullan ve askeri tekrar konumlandır. Ayrıca askerin almış olduğu hasar ve galibiyet seviyesini sıfırla. Eğer ki askerin aldığı hasar seviyesi eşik değerinden küçükse (15)'e göre tekrar konumlandırıp yaralı askerin hasar seviyesini bir arttır.

Adım 5. Galip gelen askerin yaralanma durumunu sıfıra eşitle.

Adım 6.  $(f(x_{hasar}))$ 'i güncelle.

Adım 7. (18)'i kullanarak problem uzayının boyutunu küçült.

Adım 8. En iyi amaç fonksiyonuna karşılık gelen askerin konumunu seç.

## 2.2. BRO tabanlı PID-F denetleyicisinin uçak eğim kontrol sistemine uygulanması

### 2.2. Implementation of BRO-based PID-F controller to aircraft pitch control system

PID denetleyicisi tasarlanırken yapısındaki türevsel bileşen (D) saf olarak kullanılmak istenilmez. Çünkü türev vuruş etkisi hata sinyalinin ani değişime neden olduğundan denetleyici sinyalinin üst sınır değerine ulaşmasını sağlar (Şahin, 2019). PID denetleyicisindeki türevsel bileşene birinci dereceden alçak geçiren bir filtre eklenerek türev vuruş etkisi önlemek amacıyla bu makalede PID-F denetleyicisi önerilmiştir. PID-F ve PID denetleyicisinin transfer fonksiyonları (21) ve (22)'de sırasıyla verilmiştir. Burada  $k_p$  oransal kazancı,  $k_i$  integral kazancını,  $k_d$  türevsel kazancı ve  $k_f$  türev filtre kazancını temsil etmektedir.

$$G_{PID}(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s \quad (21)$$

$$G_{PID-F}(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s \frac{k_f}{s+k_f} \quad (22)$$

Bu çalışmada BRO/PID-F denetleyicisinin parametre değerlerini ayarlayabilmek ve literatürde var olan PID denetleyicileriyle performans karşılaştırması yapmak için ZLG amaç fonksiyonu kullanılmıştır. ZLG amaç fonksiyonunun matematiksel ifadesi aşağıda verilmektedir (Gaing, 2004).

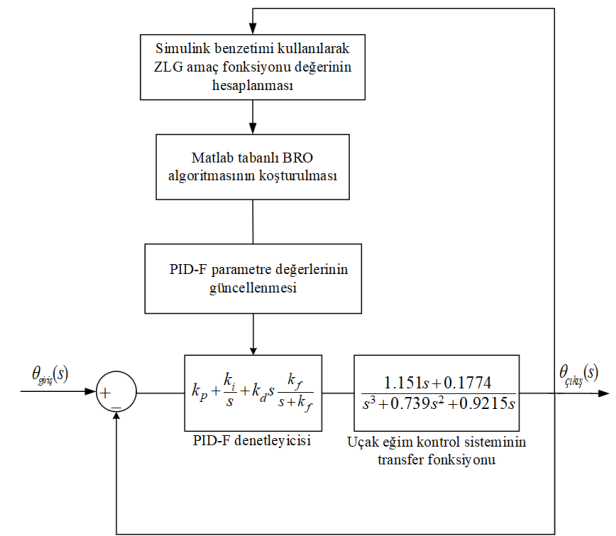
$$ZLG = (1 - e^{-\beta})(M_p + E_{ss}) + e^{-\beta}(t_s - t_r) \quad (23)$$

(23)'te görüleceği üzere  $M_p$  maksimum aşımı,  $E_{ss}$  kalıcı-durum hatasını,  $t_s$  yerleşme zamanını,  $t_r$  yükselme zamanını temsil etmektedir.  $\beta$  ise ağırlık faktörünü belirtmekte olup genellikle 1 seçilmektedir (Gaing, 2004; Ayas & Şahin, 2021; Izci vd., 2021). Ayrıca önerilen BRO algoritmasının parametre değerleri Tablo 1'de listelenmiştir.

**Tablo 1.** BRO algoritmasının parametreleri  
*Table 1. The parameters of the BRO algorithm*

Parametreler	Değeri
Askerlerin sayısı (popülasyon)	50
İterasyon sayısı	100
Eşik değeri	3
$[k_p, k_i, k_d, k_f]$ için alt sınırlar	[0.001 0.001 0.001 0.001]
$[k_p, k_i, k_d, k_f]$ için üst sınırlar	[100 100 100 400]

Şekil 4'te ise uçak eğim açısının kontrolü için önerilen BRO/PID-F yaklaşımının blok diyagramı gösterilmiştir.



**Şekil 4.** Uçak eğim kontrolü için önerilen BRO/PID-F yaklaşımı

*Figure 4. Proposed BRO/PID-F approach for aircraft pitch control*

BRO algoritmasıyla PID-F denetleyicisinin en uygun parametre değerlerini bulabilmek için ilk olarak Tablo 1'de verilen değerler Matlab'de tanıtılmıştır. Daha sonra Simulink'te modellenen birim geri beslemeli PID-F denetleyicisine sahip UEK sisteminin algoritmadaki her bir asker üyesi için zaman çözüm kümesinde simülasyonu yapılmış olup UEK sistemi eğim açısının tepki eğrileri elde edilmiştir. Ayrıca eğim açısı tepki grafik eğrileri elde edilirken Matlab'deki 'stepinfo' komutu kullanılarak her bir grafik eğrisinin geçici karakteristik değerleri bulunmuş olup ZLG amaç fonksiyonu değerleri hesaplatılmıştır. Bu işlem BRO algoritması maksimum iterasyon sayısına ulaşana kadar tekrarlanmıştır. İterasyon sonunda en düşük ZLG amaç fonksiyonuna karşılık gelen askerin konumu PID-F denetleyicisinin en uygun kazançları olarak belirlenmiştir.



### 3. Simülasyon sonuçları ve tartışmalar

#### 3. Simulation results and discussions

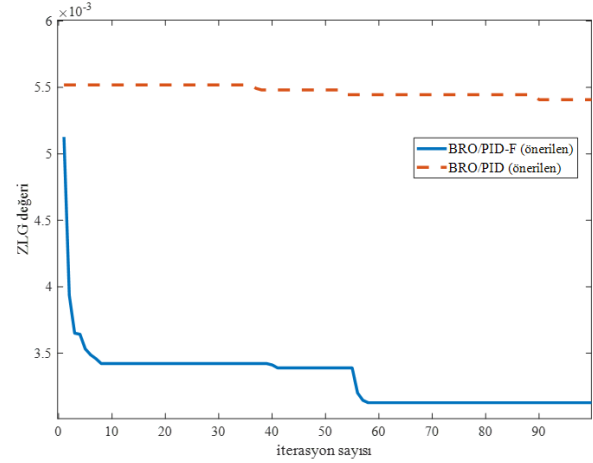
Bu çalışmada BRO/PID-F, BRO/PID, HHO/PID (Izci vd., 2020) ve ASO/PID (Izci vd., 2020) denetleyicilerine sahip UEK sisteminin simülasyonları Matlab/Simulink ortamında yapılmış olup tüm simülasyonlar için simülasyon süresi ( $t_{sim}$ ) 0.2 saniye olarak alınmıştır.

#### 3.1. Yakınsama profili analizi

##### 3.1. Convergence profile analysis

İlk olarak BRO algoritmasının PID ve PID-F için ZLG amaç fonksiyonuna en iyi yakınsayan grafik çizdirilmiş ve bu değerlere ait denetleyici parametreleri sunulmuştur. Bu çalışmada önerilen PID-F ve PID denetleyicilerin en uygun değerlerini bulmak için BRO algoritması 20'şer kez rastgele olarak çalıştırılmıştır. Her iki denetleyici içinde 20 denemenin içinden elde edilen en düşük amaç fonksiyonlarının yakınsama eğrileri Şekil 5'te verilmiştir. BRO/PID-F denetleyicisinin BRO/PID

denetleyicisine göre daha düşük ZLG amaç fonksiyonu değerine sahip olduğu Şekil 5'te açıkça görülmektedir.



Şekil 5. BRO/PID-F ve BRO/PID denetleyicilerin en iyi ZLG yakınsama eğrileri

Figure 5. Best ZLG convergence curves of BRO/PID-F and BRO/PID controllers

Tablo 2. Önerilen denetleyicilerin parametre değerleri

Table 2. Parameter values of proposed controllers

Denetleyici	Denetleyici parametreleri			
	$k_p$	$k_i$	$k_d$	$k_f$
BRO/PID-F (önerilen)	7.0355	59.0294	99.9552	345.8215
BRO/PID (önerilen)	63.6688	11.5507	99.9028	-
HHO/PID (Izci vd., 2020)	55.2698	51.4031	90.9434	-
ASO/PID (Izci vd., 2020)	17.3672	24.2791	84.5323	-

Tablo 2'deki BRO/PID-F ve BRO tabanlı PID denetleyicilerin parametre değerleri kullanılarak elde edilen UEK sistemin kapalı çevrim transfer fonksiyonları (24) ve (25)'te verilmiştir.

$$T_{\text{önerilen BRO/PID}} = \frac{115s^3 + 91.01s^2 + 24.59s + 2.049}{s^4 + 115.7s^3 + 91.93s^2 + 24.59s + 2.049} \quad (24)$$

$$T_{\text{önerilen BRO/PID-F}} = \frac{39790s^3 + 9002s^2 + 23940s + 3621}{s^5 + 346.6s^4 + 40050s^3 + 9320s^2 + 23940s + 3621} \quad (25)$$

#### 3.2. Geçici tepki analizi

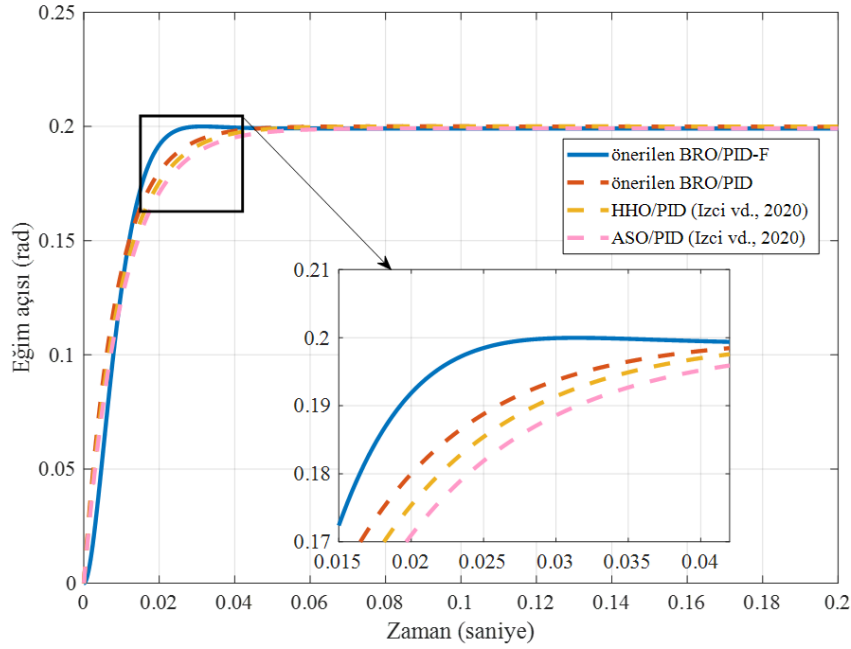
##### 3.2. Transient response analysis

Tablo 2'de BRO/PID-F ve farklı yaklaşımlı PID denetleyicilerin parametre değerleri verilmiştir. Sırasıyla her bir denetleyiciye ait UEK sistemi Tablo 2'de verilen parametre değerleri alınarak Matlab/Simulink ortamında modellenmiştir. Elde

edilen BRO/PID-F denetleyicisi ve farklı yaklaşım tabanlı PID denetleyicilerine sahip UEK sisteminin birim basamak tepkileri Şekil 6'da gösterilmiştir. Bu eğim açısı grafiklerinden geçici karakteristik değerleri bulabilmek için 'stepinfo' komutundan yararlanılmıştır. Her bir denetleyiciye ait olan maksimum aşım ( $M_p$ ), yerleşme zamanı ( $t_s$ ) ve yükselme zamanı ( $t_r$ ) değerleri Tablo 3'te

verilmiştir. Ayrıca Tablo 3'te hesaplanan ZLG değerlerine bakıldığında BRO/PID-F denetleyicisinin, BRO/PID ve literatürdeki önerilmiş olan farklı yaklaşım tabanlı PID denetleyicilerine göre en düşük ZLG değerine

sahip olduğu görülmektedir. Bu da BRO/PID-F denetleyicisine sahip UEK sisteminin en iyi maksimum aşımı ( $M_p$ ), yerleşme zamanı ( $t_s$ ), yükselme zamanı ( $t_r$ ) ve kalıcı-durum hal hatasına ( $E_{ss}$ ) sahip olduğunu açıkça göstermektedir.



**Şekil 6.** Farklı denetleyicilere sahip UEK sisteminin birim basamak tepkisi karşılaştırılması  
**Figure 6.** Comparison of step response of APC system with different controllers

**Tablo 3.** UEK sisteminin karşılaştırmalı geçici tepki analizi sonuçları

**Table 3.** Comparative transient response analysis results of the APC system

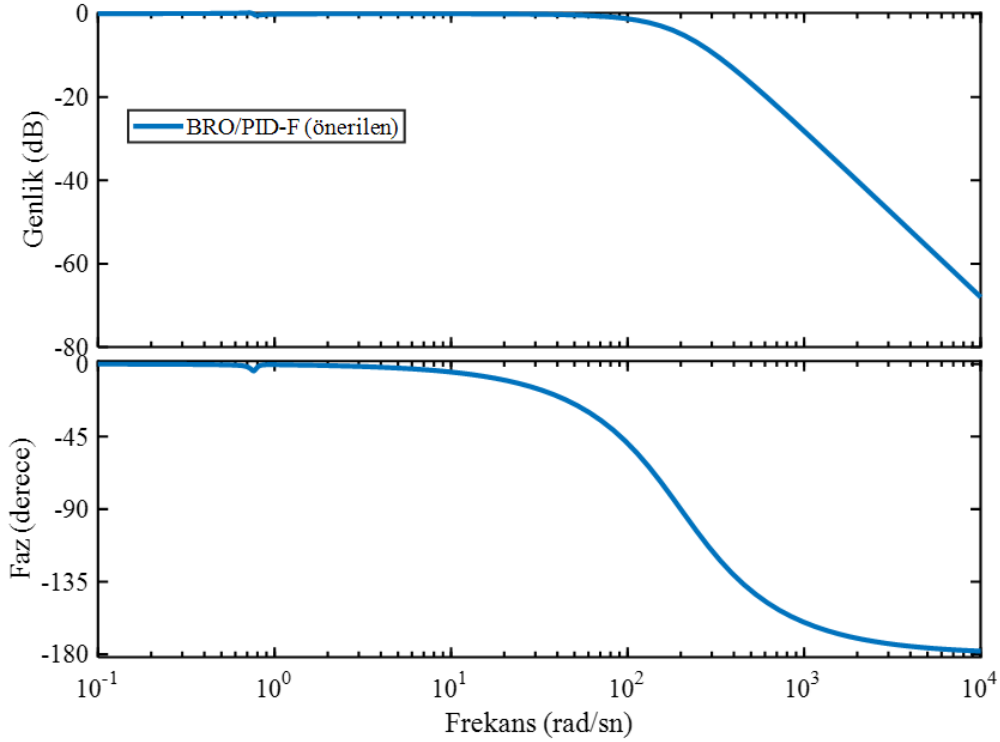
Denetleyici	$M_p$ (%)	$t_s$ (sn) %2	$t_r$ (sn) 0.1→0.9	$t_p$ (sn)	$E_{ss}$	ZLG değeri
BRO/PID-F (önerilen)	0	0.0223	0.0138	0.0314	0	0.0031
BRO/PID (önerilen)	0	0.0338	0.0191	0.0855	0	0.0054
HHO/PID (Izci vd., 2020)	0	0.0373	0.0210	0.1020	0	0.0060
ASO/PID (Izci vd., 2020)	0	0.0423	0.0229	0.1022	0	0.0071

### 3.3. Frekans tepkisi analizi

#### 3.3. Frequency response analysis

Önerilen BRO/PID-F denetleyicisinin frekans çözüm kümesinde kararlılığını gösterebilmek için Bode analizi kullanılmıştır. BRO/PID-F denetleyicisine sahip UEK sisteminin Bode çizimi Şekil 7'de gösterilmiştir. Matlab ortamında 'margin', 'bandwidth' komutları kullanılarak hesaplanmış olup BRO/PID-F, BRO/PID, HHO/PID (Izci vd., 2020) ve ASO/PID (Izci vd., 2020) denetleyicilerin frekans çözüm kümesine ait kazanç payı, faz payı ve bant genişliği değerleri

Tablo 4'te sunulmuştur. Kazanç payının sonsuz olması, faz payının 180 dereceye yakın olması ve bant genişliğinin maksimum değerde olması Bode analizinde istenilen en iyi durumdur. Tablo 4'te görüleceği üzere BRO/PID-F denetleyicisinin kazanç payı ve bant genişliği değerleri sırasıyla  $\infty$  dB ve 155.8625 Hz olarak bulunmuştur. Bu da BRO/PID-F kazanç payı ve bant genişliği değerleri bakımından diğer denetleyicilere göre daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymaktadır. Faz payı değerlerine bakıldığında ise 179.6000° değeriyle en iyi sonucun BRO/PID denetleyicisine ait olduğu görülmektedir.



**Şekil 7.** BRO/PID-F denetleyiciye sahip UEK sisteminin Bode diyagramı

**Figure 7.** Bode diagram of APC system with BRO/PID-F controller

**Tablo 4.** UEK sisteminin karşılaştırmalı frekans tepkisi performans analizi sonuçları

**Table 4.** Comparative frequency response performance analysis results of the APC system

Denetleyici	Kazanç payı	Faz payı	Bant genişliği
BRO/PID-F (önerilen)	$\infty$ dB	175.8837°	155.8625 Hz
BRO/PID (önerilen)	$\infty$ dB	179.6000°	114.7877 Hz
HHO/PID (Izci vd., 2020)	$\infty$ dB	179.5243°	104.4541 Hz
ASO/PID (Izci vd., 2020)	$\infty$ dB	178.5423°	96.6898 Hz

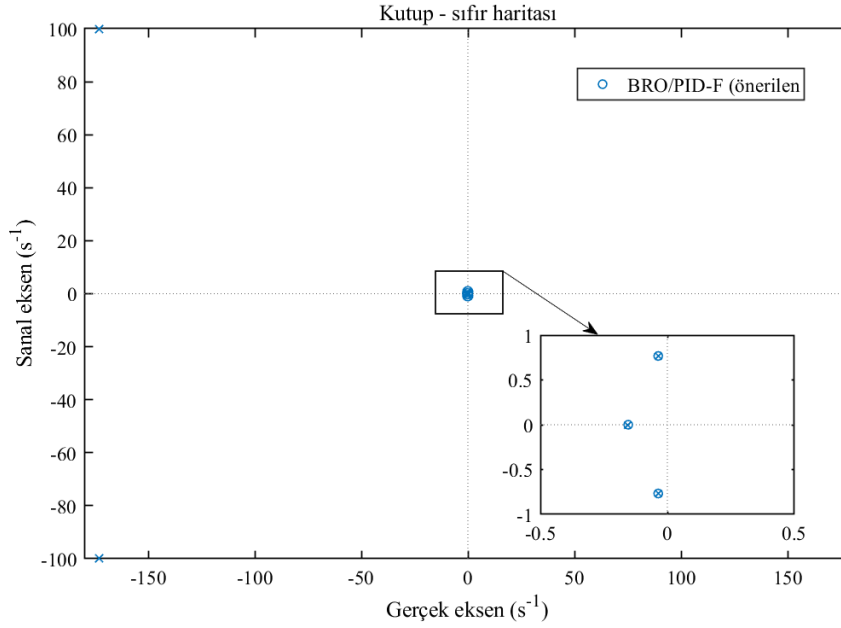
### 3.4. Kutup-sıfır haritası analizi

#### 3.4. Pole-zero map analysis

Önerilen denetleyicilerin ve diğer farklı yaklaşımla tasarlanan PID denetleyicilerin UEK sistemi üzerinde kararlılığını gösterebilmek için son olarak kutup-sıfır haritasından yararlanılmıştır. Matlab/Simulink yardımıyla şekil 8'de önerilen BRO/PID-F denetleyicisinin kutup-sıfır haritası

çizimi elde edilmiştir. Tablo 5'te ise BRO/PID-F, BRO/PID, HHO/PID (Izci vd., 2020) ve ASO/PID (Izci vd., 2020) denetleyicilerine ait kutuplar, sıfırlar ve sönüm oranları verilmiştir. Tablo 5'e bakıldığında tüm denetleyicilerin kutupları koordinat düzleminin sol tarafında yer almaktadır. Yani tasarlanan ve literatürde var olan denetleyicilere sahip UEK sisteminin kararlı bir yapıya sahip olduğu görülmüştür.





**Şekil 8.** BRO/PID-F denetleyicisi tarafından kontrol edilen UEK sisteminin kutup-sıfır haritası  
**Figure 8.** Pole-zero map of APC system controlled by BRO/PID-F controller

**Tablo 5.** UEK sisteminin kutup, sıfır ve sönüm oranı değerleri  
**Table 5.** Pole, zero and damping ratio values of the APC system

Denetleyici	Kutup	Sıfır	Sönüm Oranı
BRO/PID-F (önerilen)	-0.154	-0.0360 + 0.7676i	1
	-0.0368 + 0.765i	-0.0360 - 0.7676i	0.0480
	-0.0368 - 0.765i		0.0480
	-173 + 99.9i		0.866
	-173 - 99.9i		0.866
BRO/PID (önerilen)	-0.159	0.1541	1
	-0.320 + 0.101i	-0.3187 - 0.1187i	0.954
	-0.320 - 0.101i	-0.3187 + 0.1187i	0.954
	-115		1
HHO/PID (Izci vd., 2020)	-0.155	-0.3039 - 0.6877i	1
	-0.305 + 0.686i	-0.3039 + 0.6877i	0.4062
	-0.305 - 0.686i	-0.1541	0.4062
	-104.65		1
ASO/PID (Izci vd., 2020)	-0.1549	-0.1027 - 0.5260i	1
	-0.1048 + 0.5232i	-0.1541	0.1963
	-0.1048 - 0.5232i	-0.1027 + 0.5260i	0.1963
	-97.6713		1

#### 4. Sonuçlar ve öneriler

##### 4. Conclusions and recommendations

Bu çalışmada uçağın havada güvenli gidebilmesinde önemli bir rol oynayan eğim açısının performansını iyileştirebilmek adına PID-F denetleyicisi önerilmiştir. Denetleyicinin en uygun parametrelerini belirleme sürecinde BRO algoritması kullanılmıştır. Ayrıca literatürdeki çalışmalara bakıldığında ölüm oyunu optimizasyonu algoritması UEK sistemi için

önerilen PID-F denetleyicisinin tasarımında ilk kez kullanılmıştır. Karşılaştırmalı analiz sonuçlarına göre BRO/PID-F denetleyicisi eklenmiş UEK sistemi en iyi geçici tepki profiline ve iyi bir frekans tepkisine sahip olduğu görülmektedir. Yani diğer denetleyicilere göre en iyi maksimum aşım, yerleşme zamanına, yükselme zamanına ve ZLG değerine sahiptir. Aynı zamanda, önerilen algoritma tabanlı denetleyiciler için kararlılık analizi de dikkate alınarak yorumlanmıştır. Bant genişliği en yüksek çıkan BRO/PID-F denetleyici

sistemi, geçici durum yanıtında en hızlı aşırımsız yanıtı sağlamıştır. Gelecekte UEK sistemi ile ilgili yapılacak çalışmalarda önerilen PID-F denetleyicisine yeni meta-sezgisel algoritmalar uygulanarak sistemin dinamik tepkisi iyileştirilebilir. Ayrıca, kesir dereceli türev filtresinin sistem dinamiği üzerindeki etkileri incelenebilir.

#### **Yazar katkısı**

*Author contribution*

Yazarların bu çalışmadaki katkı oranları eşittir.

#### **Etik beyanı**

*Declaration of ethical code*

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

#### **Çıkar çatışması beyanı**

*Conflicts of interest*

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

#### **Kaynaklar**

*References*

- Aditya, Chowdhury., & Vishnu, G. N. (2017). Optimization of PID controller gains of an aircraft pitch control system using particle swarm optimization algorithm. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, 7(6), 223-230. <https://doi.org/10.24247/ijmperddc201724>
- Altıntaş, G., & Aydin, Y. (2016). Comparison of fractional and integer order PID controllers on aircraft model using genetic algorithm. *2016 National Conference on Electrical, Electronics and Biomedical Engineering (ELECO)* (pp.242-246), Bursa.
- Ayas, M. S., & Sahin, E. (2021). FOPID controller with fractional filter for an automatic voltage regulator. *Computers & Electrical Engineering*, 90, 106895. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2020.106895>
- Control tutorials for MATLAB and Simulink-(n.d.). <https://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=AircraftPitch>
- Du, H., Hu, X., Ma, C., & Zhang, G. (2017). Numerical PI tuning method and its application in aircraft pitch control. *2017 12th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*

(pp. 1270-1274), Siem Reap, Cambodia. <https://doi.org/10.1109/iciea.2017.8283034>

- Gaing, Z. (2004). A particle swarm optimization approach for optimum design of PID controller in AVR system. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 19(2), 384-391. <https://doi.org/10.1109/tec.2003.821821>
- Izci, D., Ekinci, S., Demiroren, A., & Hedley, J. (2020). HHO algorithm based PID controller design for aircraft pitch angle control system. *2020 International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA)* (pp. 1-6). Ankara. <https://doi.org/10.1109/hora49412.2020.9152897>
- Izci, D., Ekinci, S., Zeynelgil, H. L., & Hedley, J. (2021). Performance evaluation of a novel improved slime mould algorithm for direct current motor and automatic voltage regulator systems. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 44(2), 435-456. <https://doi.org/10.1177/01423312211037967>
- Kaçtı, V., Ekinci, S., & Izci, D. (2020). Henry gaz çözünürlük optimizasyonu ile uçak eğim kontrol sistemi için etkin kontrolör tasarımı. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 11(3), 953-964. <https://doi.org/10.24012/dumf.709449>
- Khalid, A., Zeb, K., & Haider, A. (2019). Conventional PID, adaptive PID, and sliding mode controllers design for aircraft pitch control. *2019 International Conference on Engineering and Emerging Technologies (ICEET)* (pp. 1-6), Lahore, Pakistan. <https://doi.org/10.1109/ceet1.2019.8711871>
- Radhakrishnan, C., & Swarup, A. (2020). Performance comparison for fuzzy based aircraft pitch using various control methods. *2020 Second International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA)* (pp. 428-433), Coimbatore, India. <https://doi.org/10.1109/icirca48905.2020.9183199>
- Rahkar Farshi, T. (2020). Battle Royale optimization algorithm. *Neural Computing and Applications*, 33(4), 1139-1157. <https://doi.org/10.1007/s00521-020-05004-4>
- Sayar, E., & Ertunç, H. M. (2018). Fuzzy logic controller and PID controller design for aircraft pitch control. *EuCoMeS 2018*, 53-60. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-98020-1\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-319-98020-1_7)
- Şahin, A. K., Akgül, T., & Çakır, O. (2021). Battle royale optimization based PID controller design for vehicle cruise control system. *5th International Conference on Advances in*

*Natural and Applied Science* (pp 181-191), Ağrı, Türkiye.

- Şahin, A. K., Tas, T., Bertug, E., & Ayas, M. S. (2021). Metaheuristic algorithm based PI controller design for Linearized quadruple-tank process. *2021 3rd International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA)* (pp 1-6), Ankara, Türkiye. <https://doi.org/10.1109/hora52670.2021.9461399>
- Şahin, E. (2019). Design of a PID controller with fractional order derivative filter for automatic voltage regulation in power systems. *4th International Symposium on Innovative Approaches in Engineering and Natural Sciences Proceedings* (pp. 23-27), Samsun, Türkiye. <https://doi.org/10.36287/setsci.4.6.013>
- Vishal, & Ohri, J. (2014). Ga tuned LQR and PID controller for Aircraft Pitch Control. *2014 IEEE 6th India International Conference on Power Electronics (IICPE)* (pp. 1-6), Kurukshetra, India. <https://doi.org/10.1109/iicpe.2014.7115839>
- Wahid, N., & Rahmat, M. F. (2010). Pitch control system using LQR and fuzzy logic controller. *2010 IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications (ISIEA)* (pp. 389-394), Penang, Malaysia. <https://doi.org/10.1109/isiea.2010.5679436>
- Yıldırım, Ş., & Savaş, S. (2009). PID denetim organı kullanarak uçaklarda kalkış ve iniş halinde yunuslama (Pitch) açısı kontrolü. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 25(1), 287-301.
- Zaeri, R., Ghanbarzadeh, A., Attaran, B., & Zaeri, Z. (2011). Fuzzy logic controller based pitch control of aircraft tuned with bees algorithm. *The 2nd International Conference on Control, Instrumentation and Automation* (pp. 705-710), Shiraz, Iran. <https://doi.org/10.1109/icciautom.2011.6356745>