

## UYDU YÖNELİM KONTROLÜNDE KUATERNİYON TABANLI PD KONTROLÖR KAZANÇLARININ METASEZGİSEL YÖNTEMLER İLE OPTİMİZASYONU

Mustafa Atakan AFŞAR<sup>1</sup>, Ramazan YEŞİLAY<sup>2</sup> ve Arif ANKARALI<sup>3</sup>

Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Ankara

### ÖZET

*PD kontrolcüler birçok alanda yaygın olarak kullanılan geleneksel bir kontrol yöntemidir. PD kazançlarının uygun şekilde ayarlanması, iyi bir performansa ulaşmak için kritik öneme sahiptir. Bu yüzden PD kazançlarının optimizasyonu günümüzde önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. Bu çalışmada, bir uydunun yönelim kontrolünde kullanılan PD kontrolcüsünün kazançları farklı metasezgisel optimizasyon yöntemleri kullanılarak otomatik olarak ayarlanmıştır. Bu yöntemler, PD kontrolcüsünün kazançlarını farklı optimizasyon tekniklerine dayalı olarak hesaplamak için yinelemeli bir yaklaşım kullanır. Çalışmada ilk olarak uydu kinematiği ve dinamiği elde edilmiş ve PD kontrolcü tasarlanmıştır. Uydunun kinematiği, tekillikleri ortadan kaldırmak için kuaterniyon yöntemi ile hesaplanmıştır. Kuaterniyon yöntemi uydu yöneliminin dört boyutlu bir vektörle temsil edilmesini sağlar ve gimbal kilidi gibi sorunları ortadan kaldırarak daha kararlı ve hassas bir kontrol sunmaktadır. Sonrasında Parçacık Sürü Optimizasyonu, Yapay Sinekkuşu Algoritması ve Gri Kurt Optimizasyonu yöntemleri kazançları elde etmek için uygulanmıştır. Bu yöntemler kendi aralarında koşturma süresi ve en iyi uygunluk değerine göre istatistiksel yöntemler ile kıyaslanmıştır. Yapılan çalışma sonucunda Parçacık Sürü Optimizasyonu ve Gri Kurt Algoritması benzer sonuçlar vermiş ve Yapay Sinekkuşu Algoritmasına göre daha iyi çalışmıştır. Her algoritma her koşturmada rastgele başlangıç koşulları oluşturması nedeniyle aynı algoritmalar on kez koşturulmuştur. Böylece daha adil bir kıyaslama yapılması hedeflenmiştir. Simülasyon sonuçları, kullanılan optimizasyon tekniklerinin uydu yönelim kontrolünde uygulanabileceğini göstermiştir.*

### GİRİŞ

Uyduların görevlerini yerine getirebilmesi için birçok alt sistem bulunmaktadır. Bu alt sistemlerden birisi de Uydu Dinamiği ve Kontrolü Sistemi'dir (UDKS). UDKS, uyduda bulunan çeşitli sensörlerden gelen veriler sayesinde, eyleyicilerin üretmesi gereken torqu belirlemektedir. Bu sayede, uydunun yönelimini (Oryantasyonunu) aktif bir şekilde kontrol eden önemli alt sistemlerden birisidir. Uydu yönelimini otonom sistemler tarafından belirlenen görevlere göre veya yer istasyonundan gelen talimatlara göre değiştirir. Örneğin, uydu batarya sistemini şarj etmek için yönünü bazen güneşe çevirirken bazen de yer istasyonu ile iletişim kurmak için yönünü dünyaya çevirmektedir. (Afşar, Ankaralı ve Yeşilay, 2021). Önceki çalışmada kapsamlı literatür taraması, uyduların çalışma mekanizması ve dinamiğini ifade eden matematiksel denklemler ve kontrol yöntemlerini içeren bir inceleme makalesi yayınlanmıştır (Yeşilay, Ankaralı ve Afşar, 2021). Uyduların yönelimlerini kontrol etmek için geleneksel ve modern birçok kontrolör tasarlanmıştır. Örneğin, PID (Yeşilay, 2021), LQR (Afşar, 2022), MPC (Yang, 2019),  $H^\infty$  (Valentin-Charbonnel, Duc ve Le Ballois, 1999), SMC (Bang, Ha ve Kim, 2005) gibi çalışmalar sıklıkla kullanılan kontrolöre örnek olarak verilebilir. Son zamanlarda makine öğrenimi ve optimizasyon teknikleriyle birlikte sürü zekâsı algoritma teknikleri de kontrol uygulamalarında kullanılmaktadır. Sürü zekâsı algoritmaları, doğadaki canlı sürülerinin davranışlarını taklit eden optimizasyon algoritmaları olarak bilinmektedir (Akyol ve Alataş, 2012). Bu algoritmalar ile; sürünün iş birliği

<sup>1</sup> Araştırma Görevlisi, AYBÜ Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, E-posta: maafsar@aybu.edu.tr

<sup>2</sup> Doktora Öğrencisi, AYBÜ FBE Havacılık ve Uzay Mühendisliği ABD, E-posta: ramazan.yesilay@gmail.com

<sup>3</sup> Prof. Dr., AYBÜ Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, E-posta: aankarali@aybu.edu.tr

yaparak daha karmaşık ve zeki bir davranış sergilemesi amaçlanmaktadır. Bu tür toplu davranışa "kollektif zekâ" da denmektedir. Sürü zekâsı algoritmaları arasında Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), Gri Kurt Optimizasyonu (GKO), Yapay Sinekkuşu Algoritması (YSA), Guguk Kuşu Arama Algoritması, Ateş Böceği Arama Algoritması, Karınca Kolonisi Algoritması ve Arı Kolonisi Algoritması gibi algoritmalar bulunmaktadır (Afşar ve Arslan, 2023). Bu çalışmada PSO, GKO ve YSA metasezgisel optimizasyon teknikleriyle PD kontrolör kazançları optimize edilmiştir.

PSO, 1995 yılında Kennedy ve Eberhart tarafından önerilen ve yaygın olarak kullanılan bir sürü zekâsı algoritmasıdır (Zhang, Wang ve Ji, 2015). PSO, kolay uygulanabilirliği nedeniyle çalışmalarda popüler bir şekilde kullanılmaktadır (Wen ve Meng, 2008). PSO algoritması, rastgele çözümlerden oluşan parçacıkları kullanarak arama uzayında en uygun çözümü bulmayı amaçlamaktadır (Juneja ve Nagar, 2016). PSO'nun, kuantum davranışlı PSO, kaotik PSO ve bulanık PSO gibi çeşitli türleri de geliştirilmiştir. Ayrıca, PSO'nun Genetik Algoritma, Benzetimli Tavlama ve Karınca Kolonisi Algoritması gibi diğer optimizasyon teknikleriyle hibrit çalışmaları da literatüre kazandırılmıştır (Zhang ve diğerleri, 2015).

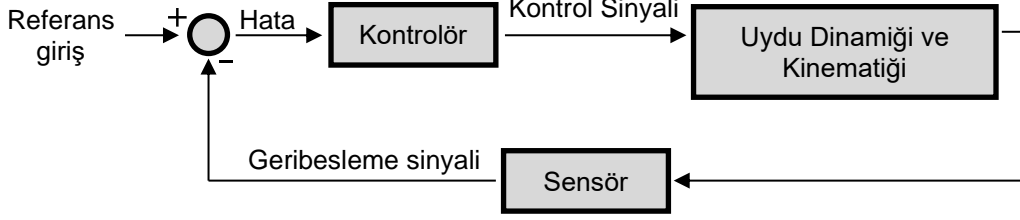
PSO algoritması, çeşitli kontrol ve optimizasyon problemlerinde bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Örneğin, mobil robotların yörünge kontrolünde, PSO ile optimize edilmiş PID kontrolörler, geleneksel yöntemlere göre daha iyi performans göstermiştir (Berber ve diğerleri, 2016). Ayrıca, insansız hava araçlarının (İHA) kontrolünde de PSO algoritması, PID parametrelerinin ayarlanmasında başarıyla uygulanmıştır (Cárdenas R ve diğerleri, 2020). PSO ile ilgili literatür taramasında, bu algoritmanın uydu yöneliminde kullanım durumu araştırılmış; PSO'nun uydu yönelim kontrolünde de başarılı bir şekilde uygulandığı ve karmaşık maliyet fonksiyonlarını etkili bir şekilde ele alarak kontrol parametrelerini optimize edebildiği görülmektedir (Okhitina, Roldugin ve Tkachev, 2022).

GKO algoritması, gri kurtların sosyal hiyerarşisi ve avlanma davranışlarından esinlenerek oluşturulan bir metasezgisel optimizasyon tekniğidir (Mirjalili, Mirjalili ve Lewis, 2014). Algoritma, kurt sürülerinin liderlik hiyerarşisini ve avlanma stratejilerini matematiksel olarak modellemeye çalışır. Son araştırmalar, doğadan esinlenen algoritmalarla optimize edilmiş PID tabanlı kontrolörlere GKO algoritmasının uygulanabilirliğini kanıtlamıştır. Uydu sistemlerine özgü olmasa da, bir döner kanatlı insansız hava aracı yükseklik ve duruş kontrolü için hibrit PD2-LQR kontrolörünü ayarlamak amacıyla iyileştirilmiş GKO tekniğini uygulamış ve izleme, yükselme süresi, yerleşme süresi ve kararlı durum hatası açısından geleneksel denetleyicilerden daha iyi performans gösterdiği görülmüştür (Shauqee, Rajendran ve Suhadis, 2021). Deniz altı aracının kontrolü için GKO uygulanmış ve PID kontrolörünün kazançları belirlenmiştir (Afşar ve Arslan, 2023). Sürekli uçuş sırasında değişen yük miktarları nedeniyle, İHA kontrolör performansının artırılması için PID kontrolörünün kazançları GKO uygulanarak başarılı bir şekilde optimize edilmiştir (Duru, Özaslan ve Soygüder, 2023).

YSA, sinek kuşlarının uçuş düzenlerini ve yiyecek arama stratejilerini taklit eden yeni bir biyo-ilham optimizasyon tekniğidir (Zhao, Wang ve Mirjalili, 2022). Karmaşık ortamlarda navigasyonu optimize etmek ve dinamik karar almak için YSA, İHA yörünge planlamasında uygulanmıştır (Dujari, Patel ve Patle, 2023).

## YÖNTEM

Uydularda eyleyici olarak reaksiyon tekerleği (RT), soğuk gaz itici ve manyetik burucu kullanılmaktadır (Sidi, 1997). Bu çalışmada uydunun yönelimi RT ile kontrol edilecektir. RT, uzay ortamında açısız momentumun korunumu prensibine göre çalışır ve bir elektrik motoru tarafından tahrik edilmektedir. UDKS kapalı döngü kontrol sistemi olarak tasarlanmıştır. UDKS, uydu sistemindeki sensörler yardımıyla elde edilen konum bilgisini referans giriş ile karşılaştırarak yönelim hatasını hesaplamaktadır. Daha sonra RT'nin oluşturması gereken kontrol tork vektörü UDKS tarafından belirlenmektedir. UDKS'nin kapalı döngü diyagramı Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1: UDKS Kapalı Döngü Diyagramı

Euler denklemleri, bir uydu üzerindeki torkları (bozucu ve kontrol torkları) ve bu torkların uydunun açısal hızına olan etkisini tanımlamaktadır. Euler denklemi,

$$I\dot{\omega} + \omega \times (I\omega) = T \quad (1)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $I$  eylemsizlik tensörünü,  $\omega$  açısal hız vektörünü ve  $T$  toplam tork vektörünü temsil etmektedir. Bu denklemin tepki tekeri ile kontrolü için gerekli olan genişletilmiş denklem Denklem-2'de gösterilmiştir.

$$I \cdot \dot{\omega} = -\omega \times (I \cdot \omega + h_w) + T_w + T_d + T_m \quad (2)$$

Burada  $T_d$  bozucu tork,  $T_m$  manyetik tork,  $h_w$  tepki tekeri açısal momentumu ve  $T_w$  tepki tekeri tork vektörlerini temsil etmektedir. Her eksen kontrolü için gerekli olan dinamik denklemler

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_x &= \frac{T_x - (I_y - I_z)\omega_z\omega_y + h_{wz}\omega_y - h_{wy}\omega_z}{I_x} \\ \dot{\omega}_y &= \frac{T_y - (I_z - I_x)\omega_x\omega_z + h_{wx}\omega_z - h_{wz}\omega_x}{I_y} \\ \dot{\omega}_z &= \frac{T_z - (I_x - I_y)\omega_y\omega_x + h_{wy}\omega_x - h_{wx}\omega_y}{I_z} \end{aligned} \quad (3)$$

şeklinde elde edilebilir (Yeşilay ve diğerleri, 2021). Yönelim kinematik denklemleri, uydunun uzaydaki yönelimini göstermektedir. Kuaterniyon yöntemi uydu yöneliminin dört boyutlu bir vektörle temsil edilmesini sağlar ve gimbal kilidi gibi sorunları ortadan kaldırarak daha kararlı ve hassas bir kontrol sunmaktadır. Uydunun kinematığı kuaterniyon yöntemiyle belirlenmiştir. Bu yöntem, açısal hız ile yönelim parametreleri arasındaki ilişkiyi

$$\dot{q} = \frac{1}{2} q \otimes \omega \quad (4)$$

ifadesi ile açıklamaktadır. Burada  $q$  kuaterniyon vektörünü ve  $\otimes$  kuaterniyon çarpımını ifade etmektedir.

Kontrol sistemi, uydunun gerekli uzaysal yönelimini istenen değerlere getirmek ve gerekli ise orada tutmak için kullanılır. Bu çalışmada yönelim kontrolü, PD (Proportional-Derivative) kontrolör ile gerçekleştirilmiştir. PD Kontrolcünün matematiksel modeli

$$T = -K_p e - K_d \dot{e} \quad (5)$$

şeklinde yazılabilir. Burada  $T$  uygulanan kontrol tork vektörünü,  $K_p$  ve  $K_d$  kontrol kazançlarını ve  $e$  ise istenen ve mevcut yönelim arasındaki farkı gösteren hata vektörünü temsil etmektedir.

Bu çalışmada eyleyici olarak tepki tekeri kullanılmaktadır. Tepki tekeri bir DC motor ile tahrik edilerek gerekli torklar elde edilir. Bu sebeple DC motorun elektriksel denklemleri Kirchoff'un Gerilim Yasası kullanılarak aşağıda verildiği gibi yazılabilir;

$$V(t) = I(t)R + L \frac{dI(t)}{dt} + K_b \omega_w(t) \quad (6)$$

Burada  $V(t)$  uygulanan gerilimi,  $I(t)$  motor akımını,  $R$  motor iç direncini,  $L$  motorun endüktansını,  $\omega_w(t)$  motorun açısal hızını ve  $K_b$  geri EMF sabitini ifade etmektedir.

DC motor, tepki tekerini döndürerek uyduya kontrol torku uygular; tepki tekeri ile motorun moment denklemi aşağıda verilmiştir.

$$T_w(t) = I_w \frac{d\omega_w(t)}{dt} + K_b \omega_w(t) \quad (7)$$

Burada,  $T_w(t)$  motor tarafından üretilen torku,  $I_w$  motorun rotorunun ve tekerleğin toplam eylemsizliğini ve  $K_b$  motorun viskoz sönümlenme katsayısını ifade etmektedir.

Tepki tekeri, uydunun yöneliminin tersi yönde bir tork üreterek yönelim kontrol edilmeye çalışılır.

Uydunun yönelim dinamikleri ve motorun tork denklemleri bir arada yazılırsa mekanik denklem

$$I_w \frac{d\omega_w(t)}{dt} = T_w(t) \quad (8)$$

şeklinde elde edilir. Motor torku ve uygulanan akım arasındaki ilişki ise aşağıda verildiği gibi yazılabilir.

$$T_w(t) = K_t I(t) \quad (9)$$

Burada  $K_t$  motor tork sabitini ifade etmektedir.

Motor torkunun giriş voltajı ve kontrol torku ile ilişkisi aşağıda verilmiştir.

$$T_w = \frac{K_t}{R} (V(t) - K_b \omega_w) \quad (10)$$

Çalışmada MAXON EC-i 496654 motoruna ait karakteristik değerler kullanılmıştır. Motorun nominal gerilim altındaki değerleri ve motor karakteristikleri Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1.a: Nominal gerilim altındaki değerler

|                        |          |
|------------------------|----------|
| <b>Nominal gerilim</b> | 18 V     |
| <b>Yüksüz Hız</b>      | 7840 rpm |
| <b>Yüksüz Akım</b>     | 448 mA   |
| <b>Nominal Hız</b>     | 6890 rpm |
| <b>Nominal Tork</b>    | 105 mNm  |
| <b>Nominal Akım</b>    | 4.87 A   |
| <b>Kavrama Torku</b>   | 1960 mNm |
| <b>Kavrama Akımı</b>   | 90.4 A   |

Tablo 1.b: Motor karakteristikleri

|                             |                     |
|-----------------------------|---------------------|
| <b>Terminal Direnç</b>      | 0.199 $\Omega$      |
| <b>Terminal İndüktans</b>   | 0.113 mH            |
| <b>Tork Sabiti</b>          | 21.7 mNm/A          |
| <b>Hız Sabiti</b>           | 441 rpm/V           |
| <b>Hız/Tork Gradyanı</b>    | 4.05 rpm/mNm        |
| <b>Mekanik Zaman Sabiti</b> | 0.975 ms            |
| <b>Rotor Ataleti</b>        | 23 gcm <sup>2</sup> |

Uydunun kazançları optimize edilirken PSO, GKO ve YSA yöntemleri uygulanmıştır. Bu sürü zekâsı algoritmalarının sözde kodları sırasıyla aşağıda verilmiştir.

---

**Algoritma 1** Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO)
 

---

- 1: Başlangıç popülasyonunu rasgele başlat
  - 2: Her bir parçacık için: hızları ve konumları rastgele başlat
  - 3: **while** durdurma kriteri karşılanmadıysa **do**
  - 4:     **for** her bir parçacık **do**
  - 5:         Mevcut pozisyonda uygunluk değerini hesapla
  - 6:         Kişisel en iyi pozisyonu güncelle
  - 7:         Global en iyi pozisyonu güncelle
  - 8:     **end for**
  - 9:     **for** her bir parçacık **do**
  - 10:         Hızı güncelle
  - 11:         Pozisyonu güncelle
  - 12:     **end for**
  - 13: **end while**
  - 14: En iyi global çözümü döndür
- 

---

**Algoritma 2** Gri Kurt Optimizasyonu (GKO)
 

---

- 1: Başlangıç popülasyonunu rasgele başlat
  - 2: Alpha, Beta, ve Delta kurtlarının pozisyonlarını başlat
  - 3: **while** durdurma kriteri karşılanmadıysa **do**
  - 4:     **for** her bir kurt **do**
  - 5:         Mevcut pozisyonda uygunluk değerini hesapla
  - 6:         Alpha, Beta ve Delta pozisyonlarını güncelle
  - 7:     **end for**
  - 8:     **for** her bir kurt **do**
  - 9:         Kurtların pozisyonlarını Alpha, Beta ve Delta'ya göre güncelle
  - 10:     **end for**
  - 11: **end while**
  - 12: En iyi Alpha çözümünü döndür
-

**Algoritma 3 Yapay Sinekkuşu Algoritması (YSA)**

- 1: Başlangıç popülasyonunu rasgele başlat
- 2: **while** durdurma kriteri karşılanmadıysa **do**
- 3: Rehberli beslenme
- 4: Bölgesel beslenme
- 5: Göç beslenmesi
- 6: **end while**

**UYGULAMALAR VE DEĞERLENDİRME**

Bu çalışma, uydu yöneliminin hassas kontrolünü sağlamak amacıyla PD kontrolör kazançlarının tümlenik mutlak hata ölçütünün (IAE) optimizasyonunu hedeflemektedir. Öncelikle bir uydunun kinematik ve dinamik modelleri türetilmiş ve bu matematiksel modellere uygun kontrolör modeli elde edilmiştir. MATLAB Simulink ortamında üç eksen kontrolüne uygun kuaterniyon tabanlı bir PD kontrolör geliştirilmiştir. Devamında PSO, GKO ve YSA olmak üzere üç farklı metasezgisel algoritma kullanılarak gerçekleştirilen optimizasyon işlemi ile uydu kontrol sistemlerinin performansının iyileştirmesi üzerinde çalışılmıştır. Elde edilen bulgular, uydu kontrol sistemlerinde metasezgisel optimizasyon tekniklerinin daha hassas kontrol konusundaki potansiyelini ortaya koymaktadır. Daha önceki yapılan çalışmada 7 farklı algoritma kendi arasında kıyaslanmıştır (Afşar ve Arslan, 2023). Önceki çalışmalarda en iyi metasezgisel yöntemler olarak PSO, GKO ve YSA olarak belirlendiğinden, bu çalışmada seçilen ilgili yöntemlerin başarı performansları birbirleriyle kıyaslanmıştır.

Metasezgisel yöntemlerde belirli bir parçacık sayısı ve yineleme sayısı kullanılarak optimizasyon süreçleri yürütülür. Ancak, bu süreçlerin başlangıç noktaları rastgele belirlendiği için sonuçlar her seferinde farklı elde edilmektedir. Bu nedenle, her bir metasezgisel yöntem için tek bir koşturma yerine 10 kez koşturma yapılmıştır. Bu şekilde, algoritmanın genel performansı hakkında daha güvenilir bir değerlendirme yapılabilir. Farklı başlangıç noktalarından elde edilen sonuçlar, algoritmanın genel başarımını daha doğru bir şekilde yansıtmak için analiz edilmiştir. Ortalama, en iyi, en kötü ve medyan değerleri üzerinden kıyaslamalar yapılmıştır. Algoritmalar ve çözücü ile ilgili parametrik veriler ve çalıştırma koşulları Tablo 2’de sunulmuştur.

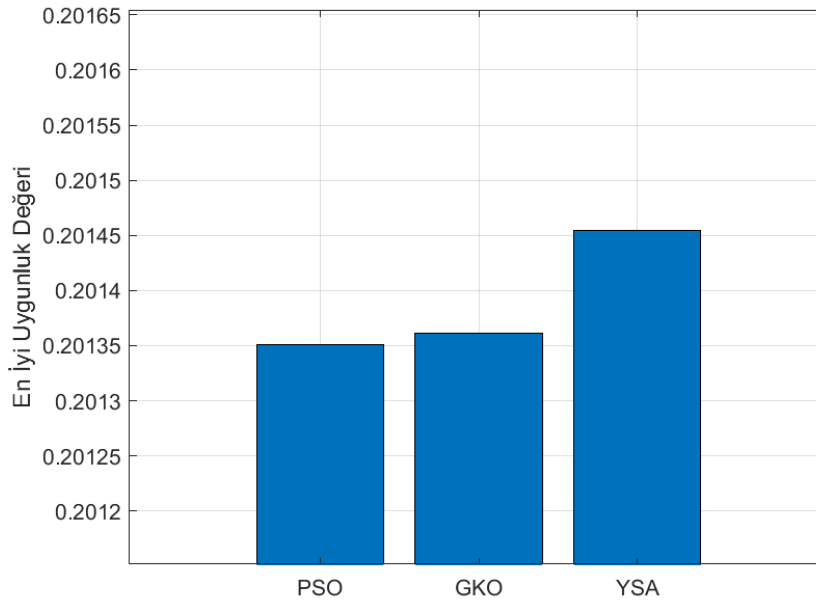
Tablo 2: Metasezgisel algoritma ve çözücü parametreleri

| Parametre                                | Değer             |
|--|-------------------|
| Çözücü                                   | ode3 – Sabit Adım |
| Sabit Adım Değeri                        | 0.001             |
| Çözüm Süresi                             | 15 sn             |
| Eksen Adım Girdileri (x-y-z)             | [20° 35° 15°]     |
| Alt Sınır Koşulları                      | [-5 -5 -5]        |
| Üst Sınır Koşulları                      | [5 5 5]           |
| Problem Boyutu                           | 2                 |
| Parçacık Sayısı                          | 15                |
| Yineleme Sayısı                          | 20                |
| Koşturma Sayısı (her bir algoritma için) | 10                |

Tablo 3'te, uygulanan algoritmaların her biri için en iyi uygunluk değerleri ve bu değerlere karşılık gelen  $K_P$  ve  $K_D$  kazançları sunulmaktadır. Sonuçlar, PSO'nun en düşük uygunluk değeri olan 0,20135 ile en iyi performansı sergilediğini gösterse de GKO'da oldukça yakın bir sonuç elde etmiştir. En kötü performans ise YSA'da elde edilmiştir. Toplamda 10 kez yapılan koşturma sonuçlarında elde edilen bu değerlerin kıyaslaması ve yakınsama grafiği Şekil 2'de gösterilmiştir.

Tablo 3: En iyi uygunluk değeri ve karşılık gelen kazanç değerleri

| Algoritma | En İyi Uygunluk Değeri | $K_P$   | $K_D$   |
|-----------|------------------------|---------|---------|
| PSO       | 0,20135                | 2,43732 | 0,55545 |
| GKO       | 0,20136                | 2,41905 | 0,54752 |
| YSA       | 0,20145                | 2,45432 | 0,56733 |

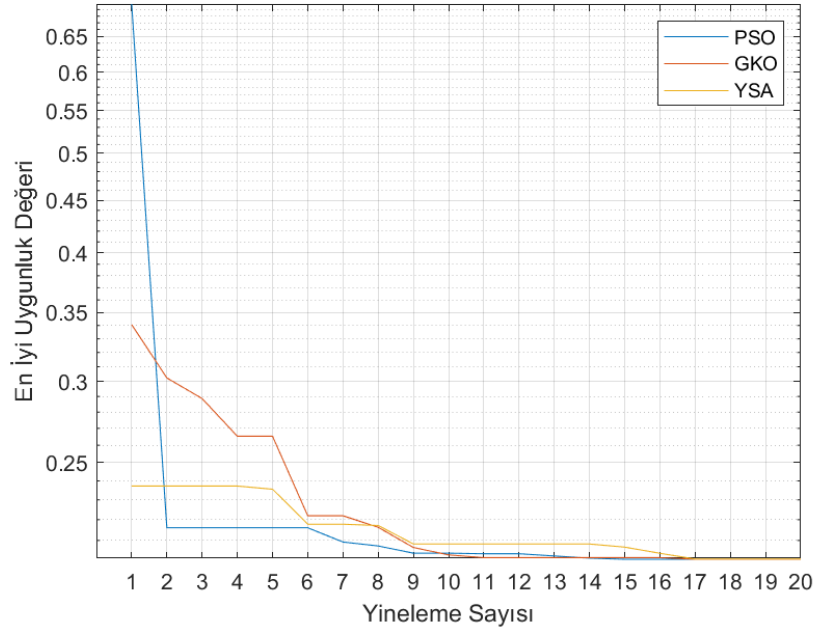


Şekil 2.a: Tüm koşturmalar içerisinde en iyi uygunluk değerleri

Tablo 4'te her algoritma için ortalama, standart sapma, medyan, en iyi ve en kötü uygunluk değerleri 10 kez koşturulan program sonuçlarına göre karşılaştırılmıştır. GKO, ortalamada en düşük standart sapma değeri ve en yüksek doğruluğu sağlayarak en tutarlı sonuçları elde etmiştir. PSO yöntemi de GKO'ya oldukça yakın bir performans sergilemiştir. YSA yöntemi ise en yüksek ortalama uygunluk değeri ve en geniş varyansa sahip olması nedeniyle en az tutarlı sonuçları üretmiştir.

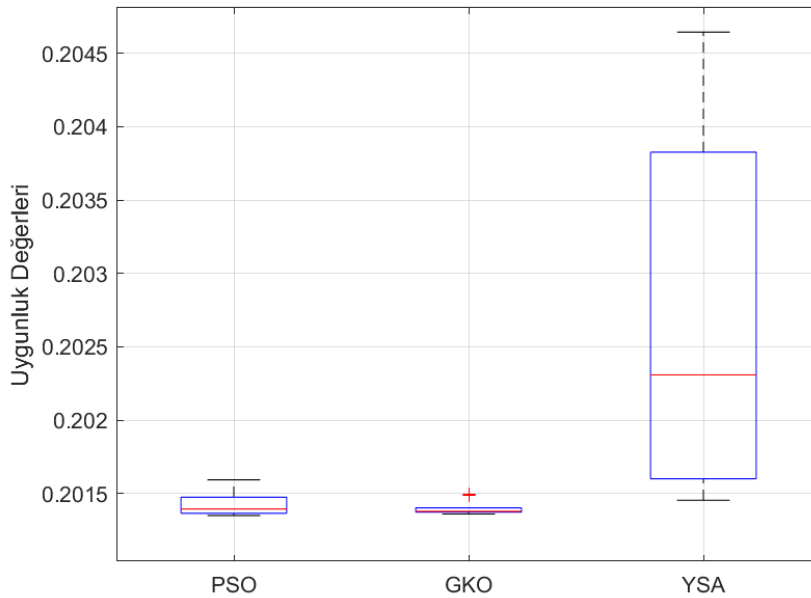
Tablo 4: Uygunluk değerleri kıyaslaması

| Algoritma | Ortalama | Standart Sapma | Medyan  | En İyi  | En Kötü |
|-----------|----------|----------------|---------|---------|---------|
| PSO       | 0,20143  | 0,00008        | 0,20139 | 0,20135 | 0,20159 |
| GKO       | 0,20140  | 0,00005        | 0,20138 | 0,20136 | 0,20150 |
| YSA       | 0,20269  | 0,00124        | 0,20231 | 0,20145 | 0,20464 |



Şekil 2.b: En iyi uygunluk değerinin yakınsama grafiği

Algoritmaların kutu grafiği kıyaslaması Şekil 3'te sunulmuştur. GKO, en düşük medyan değeri ve en kompakt kutu yapısını sergilediği için GKO sonuçlarının yüksek düzeyde kararlılığa sahip olduğunu göstermektedir. PSO'da da GKO'ya oldukça benzer bir kutu grafiği elde edilmiştir. Buna karşılık, YSA algoritması daha geniş bir kutu yapısına sahip olup, sonuçların medyandan daha fazla yayıldığını göstermektedir.



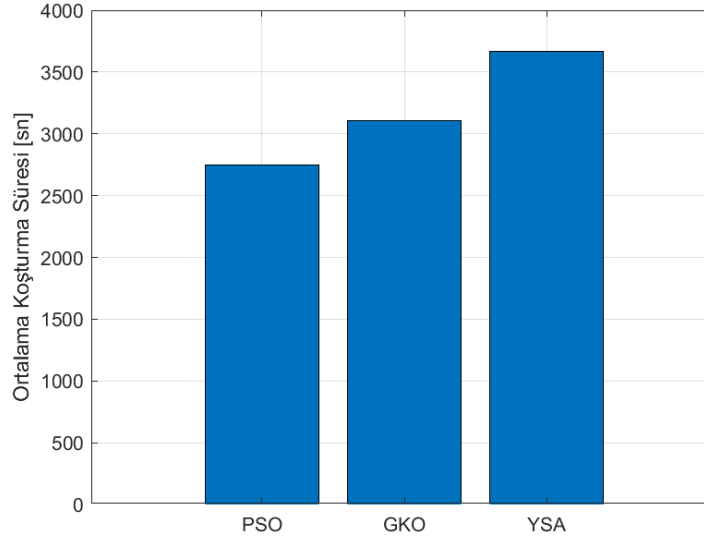
Şekil 3: Algoritmaların kutu grafik kıyaslaması

Tablo 5'te algoritmaların her biri için ortalama, minimum, maksimum ve standart sapma cinsinden süre bilgileri verilmiştir. Ortalama süre açısından karşılaştırılması ise Şekil 4'te gösterilmiştir. PSO yöntemi 2747,90 saniyelik ortalama süre ile en hızlı optimizasyon sürecini gerçekleştirmiştir. GKO algoritması ise PSO'dan daha uzun bir süreye ihtiyaç duymakla birlikte, YSA algoritmasından daha kısa bir süre ile ikinci sırada yer almıştır. Her bir algoritma 10 kez koşurulmuş ve toplam optimizasyon süresi PSO, GKO ve YSA için sırasıyla 7,633; 8,624 ve 10,182 saat olarak ölçülmüştür.



Tablo 5: Tüm koştırmaların süre bilgilerinin kıyaslaması

| Algoritma  | Ortalama [sn] | En Kısa [sn] | En Uzun [sn] | Standart Sapma |
|------------|---------------|--------------|--------------|----------------|
| <b>PSO</b> | 2747,90       | 2632,00      | 2895,30      | 95,45          |
| <b>GKO</b> | 3104,76       | 2914,91      | 3289,02      | 126,59         |
| <b>YSA</b> | 3665,62       | 3502,82      | 3814,87      | 99,38          |



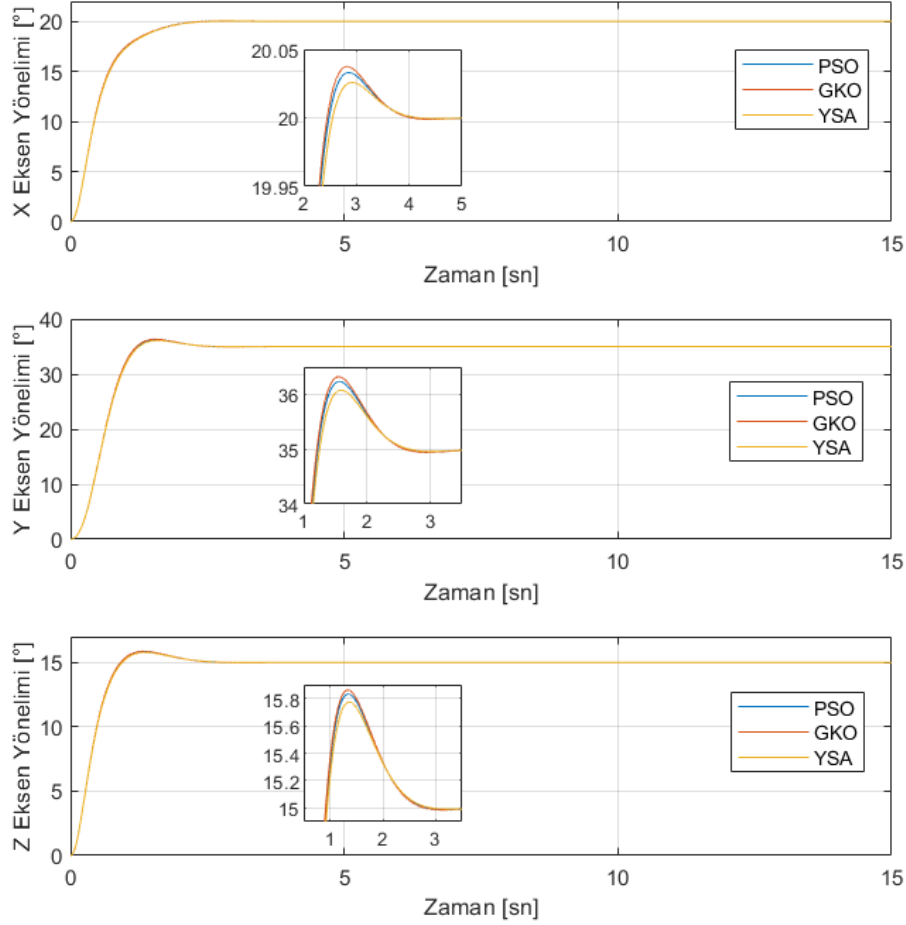
Şekil 4: Algoritmaların ortalama koşturma süreleri

## SONUÇ

Bu çalışmada uydunun yönelimini kontrol etmek için elde edilen dinamik ve kinematik modeller MATLAB Simulink ortamında modellenmiş ve sonrasında bir PD kontrolör tasarlanmıştır. PD kontrolörün kazanç değerleri, geleneksel yöntemler (örn. Ziegler Nichols yöntemi) veya deneme yanılma ile ayarlanabilir. Uydu yöneliminin matematiksel modelinin doğrusal olmayan doğası sebebiyle Simulink ortamında doğrudan ayarlamak mümkün değildir. Bu çalışmada doğrusal olmayan matematiksel modelin PD kontrolörü, IAE değerine göre PSO, GKO ve YSA olmak üzere üç farklı metasezgisel yöntem ile optimize edilerek, performansları birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

Tablo 3'te elde edilen kazanç değerlerine göre her bir ekseninde tüm algoritmaların nasıl bir davranış sergilediği Şekil 5'te gösterilmiştir. Her ne kadar uygunluk fonksiyonu değerleri ve koşturma süreleri açısından algoritmalar arasında farklılıklar oluşsa da kontrolcü davranışları tüm algoritmalarda birbirine oldukça benzer sonuç elde edilmiştir. Bundan önceki yapılan çalışmada PSO, GKO ve YSA diğer metasezgisel yöntemler arasında en iyi yöntemler olarak belirlenmişti. Dolayısıyla burada benzer sonuçların elde edilmiş olması önceki çalışmanın doğruluğunu ortaya çıkarmaktadır. Algoritmalar, IAE uygunluk fonksiyonuna göre neredeyse aynı kontrolcü kazanç değerlerine yakınsamıştır.

PSO hem en iyi uygunluk değerine hem de diğer algoritmalara göre daha hızlı ve tutarlı optimizasyon sürecini sağlayarak en başarılı algoritma olarak öne çıkmıştır. GKO algoritması, PSO'ya yakın bir performans sergilemiş ancak koşturma için daha uzun bir süreye ihtiyaç duymuştur. YSA algoritması ise diğer iki algoritmaya kıyasla daha az tutarlı ve daha uzun süreli bir optimizasyon süreci göstermiştir. Bu sonuçlar, PSO'nun uydu dinamiği ve kinematiğini kontrol eden PD kontrolörün kazançlarının optimize edilmesinde en etkili yöntem olduğunu göstermektedir.



Şekil 5: Adım girdilerin en iyi kazanç değerlerine göre davranışı

## Kaynaklar

- Afşar, M. A. (2022). *Satellite attitude control by using reaction wheels with LQR control method*. Ankara Yıldırım Beyazıt University.
- Afşar, M. A., Ankaralı, A. ve Yeşilay, R. (2021). Design and control of single axis attitude control system. *Global Conference on Engineering Research (GLOBECER'21)* içinde . Bandırma/Turkey.
- Afşar, M. A. ve Arslan, H. (2023). Optimizing PID Gains of a Vehicle using the state-of-the-art Metaheuristic Methods. *Academic Platform Journal of Engineering and Smart Systems*, 11(3), 107–117. doi:10.21541/APJESS.1266949
- Akyol, S. ve Alataş, B. (2012). Güncel Sürü Zekası Optimizasyon Algoritmaları. *Nevşehir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 1(1), 36–50. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/nufbed/issue/27853/294758> adresinden erişildi.
- Bang, H., Ha, C. K. ve Kim, J. H. (2005). Flexible spacecraft attitude maneuver by application of sliding mode control. *Acta Astronautica*, 57(11), 841–850. doi:10.1016/J.ACTAASTRO.2005.04.009
- Berber, Ö., Ateş, M., Alruim Alhasan, H., Güneş, M., Sütçü, K., Üniversitesi, İ., ... Kahramanmaraş, T. (2016). Parçacık Sürü Optimizasyonu ve PID ile Mobil Robotun Optimum Yörünge Kontrolü. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19(3), 165–169. doi:10.17780/KSUMBD.282335
- Cárdenas R, C. A., Grisales, V. H., Collazos Morales, C. A., Cerón-Muñoz, H. D., Ariza-Colpas, P.

- ve Caputo-Llanos, R. (2020). Quadrotor Modeling and a PID Control Approach. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)* içinde (C. 11886 LNCS, ss. 281–291). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. doi:10.1007/978-3-030-44689-5\_25/FIGURES/7
- Dujari, R., Patel, B. ve Patle, B. K. (2023). Artificial Hummingbird Algorithm: A Novel Approach for Efficient Path Planning of Drones. *2023 Third International Conference on Ubiquitous Computing and Intelligent Information Systems (ICUIS)*, 270–275. doi:10.1109/ICUIS60567.2023.00052
- Duru, A. S., Özaslan, T. ve Soygüder, S. (2023). Enhancing Trajectory Following in VTOL Cargo UAVs: Adaptive Control in Changing Payload Scenarios. *ISAS 2023 - 7th International Symposium on Innovative Approaches in Smart Technologies, Proceedings*. doi:10.1109/ISAS60782.2023.10391097
- Juneja, M. ve Nagar, S. K. (2016). Particle swarm optimization algorithm and its parameters: A review. *International Colloquium on Computing, Communication, Control, and Management*. doi:10.1109/ICCCCM.2016.7918233
- Mirjalili, S., Mirjalili, S. M. ve Lewis, A. (2014). Grey Wolf Optimizer. *Advances in Engineering Software*, 69, 46–61. doi:10.1016/J.ADVENGSOFT.2013.12.007
- Okhitina, A., Roldugin, D. ve Tkachev, S. (2022). Application of the PSO for the construction of a 3-axis stable magnetically actuated satellite angular motion. *Acta Astronautica*, 195, 86–97. doi:10.1016/J.ACTAASTRO.2022.03.001
- Shauqee, M. N., Rajendran, P. ve Suhadis, N. M. (2021). Quadrotor Controller Design Techniques and Applications Review. *INCAS BULLETIN*, 13(13), 179–194. doi:10.13111/2066-8201.2021.13.3.15
- Sidi, M. J. (1997). *Spacecraft dynamics and control: A practical engineering approach*. *Spacecraft Dynamics and Control: A Practical Engineering Approach*. Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9780511815652
- Valentin-Charbonnel, C., Duc, G. ve Le Ballois, S. (1999). Low-order robust attitude control of an earth observation satellite. *Control Engineering Practice*, 7(4), 493–506. doi:10.1016/S0967-0661(99)00006-4
- Wen, L. ve Meng, F. (2008). An improved PSO for the multi-depot vehicle routing problem with time windows. *Proceedings - 2008 Pacific-Asia Workshop on Computational Intelligence and Industrial Application, PACIIA 2008*, 1, 852–856. doi:10.1109/PACIIA.2008.9
- Yang, Y. (2019). *Spacecraft Modeling, Attitude Determination, and Control Quaternion-based Approach*. *Spacecraft Modeling, Attitude Determination, and Control Quaternion-based Approach*. doi:10.1201/9780429446580
- Yeşilay, R. (2021). *Satellite attitude control: feedback quaternion pd controller design with fuzzy gain scheduling and an experimental case study on one axis control*. Ankara Yıldırım Beyazıt University.
- Yeşilay, R., Ankaralı, A. ve Afşar, M. A. (2021). A review paper: the dynamics, kinematics, design and control of satellite simulators with spherical air bearing. *Global Conference on Engineering Research*.
- Zhang, Y., Wang, S. ve Ji, G. (2015). A Comprehensive Survey on Particle Swarm Optimization Algorithm and Its Applications. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015(1), 931256. doi:10.1155/2015/931256
- Zhao, W., Wang, L. ve Mirjalili, S. (2022). Artificial hummingbird algorithm: A new bio-inspired optimizer with its engineering applications. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 388, 114194. doi:10.1016/J.CMA.2021.114194