



## DÖNER KANAT İHA MODELLENMESİ VE DENETİMİ: BİR KONTROL TASARIM UYGULAMASI

Erol DUymAZ<sup>1\*</sup>, Abdullah Ersan OĞUZ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ostım Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Yapay Zekâ Mühendisliği Bölümü, 06374, Ankara, Türkiye

<sup>2</sup>Mudanya Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, EE Mühendisliği Bölümü, 16940, Bursa, Türkiye

**Özet:** İnsansız Hava Araçlarının (İHA) kullanımı konusunda son yıllarda çok büyük gelişmeler kaydedilmiş olup İHA'ları artık yalnız askeri ve endüstriyel uygulamalarda değil eğitimden lojistiğe oradan görsel sanatlara kadar her alanda görmek mümkündür. Öte yandan ülkemizde genel olarak mühendislik fakültelerinde elektrik-elektronik, mekatronik, kontrol mühendisliği bölümlerinde kontrol teorisi uygulamaları için deneysel platform sorunları zaman zaman göze çarpmaktadır. Bu çalışmada, lisans eğitimlerinde kontrol tasarımı uygulaması için bir İHA modellemesi ve denetimi yaklaşımı önerilmiştir. İHA modellemesi benzetim ortamında gerçekleştirilmiş, PD (Oransal-Türevsel) kontrol uygulaması ise benzetim ortamı ve örnek bir platform üzerinden gerçekleştirilmiştir. Teorik tartışmalardan sonra önerilen İHA sistem denetiminin hem benzetim ortamlarında hem de deneysel ortamlarda düşük maliyetli bir kontrol tasarım uygulama aracı olarak kullanılmasının mümkün olduğu görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** İHA denetimi, Sistem modelleme, Kontrolör tasarımı, Deneysel eğitim uygulaması


### Rotary Wing UAV Modeling and Control: A Control Design Application


**Abstract:** The great progress has been made in the use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in recent years, and it is now possible to see UAVs not only in military and industrial applications but also in every field, from education to logistics and visual arts. On the other hand, experimental platform problems for control theory applications in electrical-electronics, mechatronics and control engineering departments in engineering faculties are occasionally noticeable from time to time. In this study, a UAV modeling and control approach is proposed for control design application in undergraduate engineering education. UAV modeling was carried out in a simulation environment, and PD (Proportional-Derivative) control application was carried out on a sample platform along with simulation experiments. After theoretical discussions, it has been seen that it is possible to use the proposed UAV system control as a low-cost control design application tool in both simulation and experimental environments.

**Keywords:** UAV control, System modeling, Controller design, Experimental training application

\*Sorumlu yazar (Corresponding author): Ostım Technical University, Faculty of Engineering, Department of AI, 06374, Ankara, Türkiye

E mail: erolduymaz@hotmail.com (E. DUymAZ)

Erol DUymAZ  <https://orcid.org/0000-0002-3428-6807>

Abdullah Ersan OĞUZ  <https://orcid.org/0000-0003-3413-7876>

**Gönderi:** 25 Nisan 2024

**Kabul:** 19 Temmuz 2024

**Yayınlanma:** 15 Eylül 2024

**Received:** April 25, 2024

**Accepted:** July 19, 2024

**Published:** September 15, 2024

**Cite as:** Duymaz E, Oğuz AE. 2024. Rotary wing UAV modeling and control: A design application. BSJ Eng Sci, 7(5): xx-xx.

### 1. Giriş

Son yıllarda büyük oranda yaygınlaşan İHA'ların tasarımı konusunda artık çok sayıda kolay erişilebilir bilgi ve uygulama mevcuttur. Yeni dönem çalışmaları amaca uygun olarak daha düşük maliyetle daha uzun süre operasyon yapabilen, görev performansı yüksek İHA tasarımları üzerine yoğunlaşmıştır.

Diğer taraftan mühendislik fakültelerine elektrik, elektronik, bilgisayar, makine ve havacılık-uzay gibi birçok bölümde temel derslerden olan otomatik kontrol, geri beslemeli sistemler, kontrol teorisi, kontrol sistem tasarımı, modern kontrol vb. derslerin uygulamaları için deneysel teçhizat temini temel sorunlardandır.

Bu çalışmada, lisans eğitimlerinde kontrol tasarımı uygulaması kapsamında doğrusal olmayan bir modele sahip olan İHA'nın denetimi için kontrolör sistemleri tasarlanmış ve başarımları basamak tepkileri ile verilen yönergeleri/yörüngeleri takip etme yeteneklerinden gözlenmiştir. Tasarlanan denetleyicilerin performansı

bozucu bir etkiyi geri çevirme (robustness), sistem kararlılığını sürdürebilme ve gürültü altındaki davranışları gelecek çalışmalar arasında planlanmıştır. Benzetim sonuçları, uygulamanın eğitim yardımcısı olarak doğrusal yöntemler ile denetlenebilirliği ve klasik kontrol parametreleri gibi faktörlerin kontrol üzerindeki etkilerini göstermiştir.

Teorik tartışmalar ile birlikte hem benzetim hem de deneysel ortamlarda düşük maliyetli kontrol tasarım uygulaması olarak bir İHA denetim sistemi önerilmiştir. Araştırmamıza ilişkin ayrıntılar sonuç bölümünde sunulmuş olmakla birlikte İHA'nın matematiksel modeli, kontrol yöntemi matematik ve formülasyonları, benzetim sonuçları ile bir durum çalışması olarak kontrol tasarım dersi uygulamasına çalışma içerisinde yer verilmiştir.

Her alanda yaygınlaşmaları sonrası İHA'lar hakkındaki araştırma sayıları da son dönemde oldukça artmıştır. Akış aerodinamiğinden yapısal tasarıma, rota planlamasından uçuş kontrolüne, uçuş süresinden sürü



operasyonlarla ilgili çalışmalara kadar birçok alanda İHA araştırması görmek mümkündür.

Bu çalışmalardan bazılarında yapısal tasarım araştırmacıları gövde üzerinde akış incelemelerinde bulunmuşlardır. Yanıktepe ve ark. (2016) delta kanat modeli üzerinde oluşan yakın yüzey akış yapısı ve aerodinamik karakteristiklerini, boya görüntüleme, üç boyutlu Stereoskopik Parçacık Görüntüleme Tekniği (Stereo PIV) ve aerodinamik kuvvet ölçümleri kullanılarak araştırmışlardır. Yanıktepe ve Donald (2004) çalışmalarında yüksek görüntü yoğunluklu parçacık görüntü hız ölçümü tekniği kullanarak düşük süpürme açısına sahip delta kanatlardaki akış yapısını ve özellikle girdap bozulması ile durma fenomenlerinin meydana geldiği çapraz akış düzlemlerini incelemiş, kanattaki buffet (dengesiz/düzensiz titreşim-çalkantı) yüklemesinin bu fenomenlerin önemli kaynakları olduğunu göstermişlerdir. Yanıktepe ve Donald (2005) diğer çalışmalarında ise elmas ve lambda planformlarında anlık ve ortalama akış yapısını aynı ölçüm tekniği ile incelemiştir. Yapısal özellikleri; akış çizgisi topolojisinin desenleri, uzay-zaman görüntülemesinden elde edilen rms hız dalgalanması ve hız spektrumlarının görüntüleri ile birlikte yorumlamışlardır.

Diğer bir gruptaki araştırmalarda, Durmuş ve Duymaz (2023) İHA'ların uzaktan algılama ve görüntüleme alanında kullanımını araştırmış, Duymaz ve ark. (2020) İHA'larda GPS olmayan durumlarda seyrüsefer için EZKH (Eş-zamanlı Konum Belirleme ve Haritalama) çözümlü yeni bir durum tahmin aracı olarak parçacık akış filtresi yöntemini incelemiştir. Dinamik ortamda otonom İHA uçuşu için Oguz ve Duymaz (2016) yapay potansiyel alan tabanlı yeni bir yaklaşım önermişlerdir.

Tosun (2024) uçuş kontrolü için farklı yöntemleri karşılaştırmıştır. Doğrusal uçuş kontrol yöntemlerinden PID ve LQR denetleyicileri ile doğrusal olmayan yöntemlerden geri beslemeli doğrusallaştırma yöntemi, kayan kipli kontrol yöntemi ve geri adımlamalı kontrol yöntemlerini uçuş yörünge kontrolünde kullanmış, her iki tip (doğrusal-doğrusal olmayan) kontrol yaklaşımının quadrotor davranışında etkisini incelemiştir.

Oktay ve Özen (2021) çalışmalarında dört rotorlu İHA ile aynı faydalı yük kapasitesi ve aynı uçuş süresine sahip şekil değiştirebilen İHA sistem tasarımı ve PID (oransal integral türev) kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. Hava aracının üzerinde bulundurduğu MEMS ve engel algılama sensörleri sayesinde dört rotorlunun kolları arasındaki kesişim açısını değiştirecek aktüatörün enerjilendirilmesi ile açı azaltılarak kapalı ortamda engellerden sakınması ve seyrine devam edebilmesi amaçlanmış, hava aracının seyir halinde şekil değiştirmesi neticesinde meydana

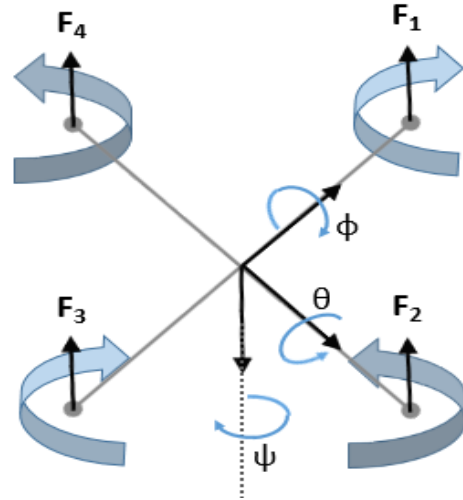
gelen konfigürasyon değişikliğinin uçuş karakteristiğine olan etkileri de çalışmada incelenmiştir.

Elmas ve Alkan (2023) ise İHA tasarımında performans özelliklerini çıkarmak için "eCalc" programı kullanılmıştır. eCalc ile elde edilen sonuçlar MATLAB uygulamalarından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak, bir İHA alt sistemleri için gerekli donanım ve yazılım mimarileri geliştirilerek uygulamada kullanılacak İHA tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Çalışmamızda, yazında geçen diğer araştırmalardan farklı olarak, benzetim ve deney ortamlarında düşük maliyetli bir kontrol tasarım uygulaması ortaya konmaktadır. Eğitim yardımcısı olarak tasarlanan İHA denetim sisteminin doğrusal yöntemler ile denetlenebilirliği ve klasik kontrol parametreleri gibi faktörlerin kontrol üzerindeki etkileri de burada araştırılmıştır.

## 2. Materyal ve Yöntem

Döner kanatlı bir İHA sistemi, ana gövde eksenine bağlı 4 motordan oluşmakta olup sistemin hareket kontrolü motor pervane dönülerinin bağımsız olarak değiştirilmesiyle sağlanır (Şekil 1). Değişen pervane dönüleri, sistemde tork ve momentler oluşturur (Xu ve Ozguner, 2006)



Şekil 1. Döner kanatlı İHA hareket kontrol sistemi.

### 2.1. Sistem Modeli

Döner kanatlı bir İHA sistemi modeli bu bölüm sonunda verilecek olup alt bileşenler şöyledir:

Eşitlik 1'de R, gövde düzleminde hareket düzlemine dönüşüm içeren Euler Rotasyon Matrisini (Directional Cosine Matrix) temsil eder. Gövde düzleminde hareket düzlemine açısal hız dönüşümlerinin yönelimler cinsinden ifadesi ise eşitlik 2 ve 3 ile verildiği gibidir (Bouabdallah ve Siegwart, 2007).

$$R = R_B^N = R_z(\psi) \cdot R_y(\theta) \cdot R_x(\phi) = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & \sin \phi \sin \theta \cos \psi - \cos \phi \sin \psi & \cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi \\ \cos \theta \sin \psi & \sin \phi \sin \theta \sin \psi + \cos \phi \cos \psi & \cos \phi \sin \theta \sin \psi - \sin \phi \cos \psi \\ -\sin \theta & \sin \phi \cos \theta & \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = I \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + R_x(\phi)^T \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} + R_x(\phi)^T R_y(\theta)^T \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin \theta \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \cos \theta \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = T^{-1} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin \phi \tan \theta & \cos \phi \tan \theta \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \frac{\sin \phi}{\cos \theta} & \frac{\cos \phi}{\cos \theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (3)$$

Sistem dinamiği için kullanılan kuvvet denklemi eşitlik 4'de sunulmuştur (Runcharoon ve Srichatrapimuk, 2013):

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} = R \frac{1}{m} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -(F_1 + F_2 + F_3 + F_4) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi) \frac{-U_1}{m} \\ (\cos \phi \sin \theta \sin \psi - \sin \phi \cos \psi) \frac{-U_1}{m} \\ g - \cos \theta \cos \phi \frac{U_1}{m} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Sisteme ait dönel dinamikler (momentler) ise eşitlik 5, 6 ve 7'de sunulduğu gibidir:

$$\begin{aligned} M_{xb} &= l(-F_2 + F_4) = l(U_2), \\ M_{yb} &= l(F_1 - F_3) = l(U_3), \\ M_{zb} &= d(-Q_1 + Q_2 - Q_3 + Q_4) = d(U_4), \\ M_{gx} &= j\dot{\theta}\Omega, \\ M_{gy} &= -j\dot{\phi}\Omega, \\ M_{gz} &= j\dot{\psi}\Omega \end{aligned} \quad (5)$$

Motor pervane dönülerine ait ilişki ise eşitlik 6 ve 7'deki gibi olur;

$$\Omega = \Omega_1 - \Omega_2 + \Omega_3 - \Omega_4 \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} I_x \ddot{\phi} \\ I_y \ddot{\theta} \\ I_z \ddot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{xb} + M_{gx} + (I_x + I_y - I_z) \dot{\theta} \dot{\psi} \\ M_{yb} + M_{gy} + (-I_x - I_y + I_z) \dot{\phi} \dot{\psi} \\ M_{zb} + M_{gz} + (I_x - I_y + I_z) \dot{\phi} \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l(U_2) + j\dot{\theta}\Omega + (I_x + I_y - I_z) \dot{\theta} \dot{\psi} \\ l(U_3) - j\dot{\phi}\Omega + (-I_x - I_y + I_z) \dot{\phi} \dot{\psi} \\ (U_4) + j\dot{\psi}\Omega + (I_x - I_y + I_z) \dot{\phi} \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$U_1, U_2, U_3, U_4$  giriş/kontrol sinyallerinin denklem ifadeleri eşitlik 8'de sunulmuştur (Rodríguez ve ark., 2014):

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k & k & k & k \\ 0 & -k & 0 & k \\ k & 0 & -k & 0 \\ d & -d & -d & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega_1 \\ \Omega_2 \\ \Omega_3 \\ \Omega_4 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Sonuç olarak durum-uzay modelinde kullanılan durum denklemi aşağıda eşitlik 9 ve 10'da verilmiştir:

$$x = [x \quad \dot{x} \quad y \quad \dot{y} \quad z \quad \dot{z} \quad \phi \quad \dot{\phi} \quad \theta \quad \dot{\theta} \quad \psi \quad \dot{\psi}]^T \quad (9)$$

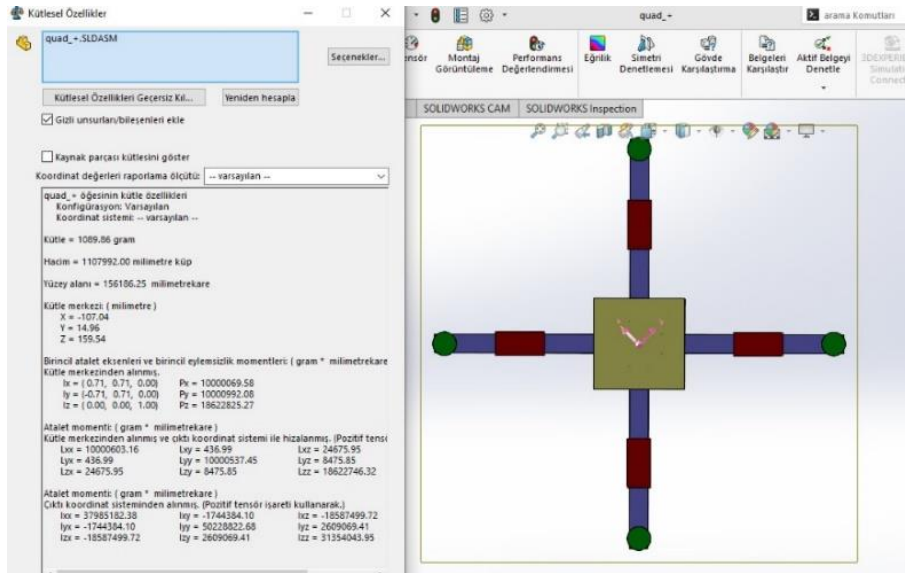
$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \\ \dot{y} \\ \ddot{y} \\ \dot{z} \\ \ddot{z} \\ \dot{\phi} \\ \ddot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} \\ \dot{\psi} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ (\cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi) \frac{-U_1}{m} \\ \dot{y} \\ (\cos \phi \sin \theta \sin \psi - \sin \phi \cos \psi) \frac{-U_1}{m} \\ \dot{z} \\ g - \cos \theta \cos \phi \frac{U_1}{m} \\ \dot{\phi} \\ lU_2 + j\dot{\theta}\Omega + (I_x + I_y - I_z) \dot{\theta} \dot{\psi} \\ \dot{\theta} \\ lU_3 - j\dot{\phi}\Omega + (-I_x - I_y + I_z) \dot{\phi} \dot{\psi} \\ \dot{\psi} \\ U_4 + j\dot{\psi}\Omega + (I_x - I_y + I_z) \dot{\phi} \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Döner kanatlı İHA'nın mekanik tasarımı ve eylemsizlik moment hesaplamaları Solidworks ortamında gerçekleştirilmiştir (Şekil 2).

Bu bölümde kullanılan ve döner kanatlı İHA sistem (Şekil 2) modelini tanımlayan sabitler ise Tablo 1'de verildiği

gibidir (Swarup, 2014).

Burada verilen eşitliklerle tanımlanan döner kanatlı İHA sistem modellemesinin Matlab benzetim ortamında gerçekleştirilmesinden sonra Bölüm 2.2'de belirtilen denetim yaklaşımları uygulanmıştır.



Şekil 2. Döner kanatlı İHA tasarımı benzetim modeli.

Tablo 1. Döner kanatlı İHA sistemi model sabitleri

Sembol	Sabit (Değişken)	Değer (Büyüklük)
Ix	X eksenli etrafındaki İHA atalet momenti	$I_x = 10,65 \cdot 10^{-3}$
Iy	Y eksenli etrafındaki İHA atalet momenti	$I_y = 10,65 \cdot 10^{-3}$
Iz	Z eksenli etrafındaki İHA atalet momenti	$I_z = 21,2 \cdot 10^{-3}$
J	Pervane eksenli etrafındaki toplam dönme atalet momenti	$J = 6,5 \cdot 10^{-5}$
k	İtme faktörü	$k = 3,13 \cdot 10^{-5}$
d	Sürükleme faktörü	$d = 7,5 \cdot 10^{-7}$
l	İHA'nın merkezine olan uzaklık	$l = 0,21$
m	İHA'nın kg cinsinden kütlesi	$m = 0,784$
g	Yerçekimi ivmesi	$g = 9,81$

## 2.2. Sistem Kontrolü

PID (oransal-integral-türevsel) denetleyiciler en yaygın doğrusal kontrol yaklaşımlarından olup Cp-Ci-Cd katsayıları sistemde yükselme zamanı (rise time), aşım (overshoot), kararlı-hal hatası (steady-state error) üzerinde etkilere sahiptir. (Rooh ve Shahab, 2015)

Çalışmamızda döner kanatlı bir İHA sisteminin platform kontrolünde PID denetleyici kullanımı öngörülmüş olup, önerilen yaklaşımın eğitim yardımcısı olarak kullanımı kapsamında durum çalışması olarak (case study) PD denetimi ele alınmıştır.

Yukarıda Eşitlik (10) ile verilen durum denklemlerinin kısmi türevleri alınarak havada askıda kaldığı denge durumunda doğrusallaştırma yapılır ise elde edilen jakobiyen matrisleri kullanılarak kontrolör parametreleri bulunur.

Burada denge noktası  $(x_0, u_0)$  etrafında sistemin Taylor serisi açılımı eşitlik 11'de verilmiştir (Runcharoon ve Srichatrapimuk, 2013):0

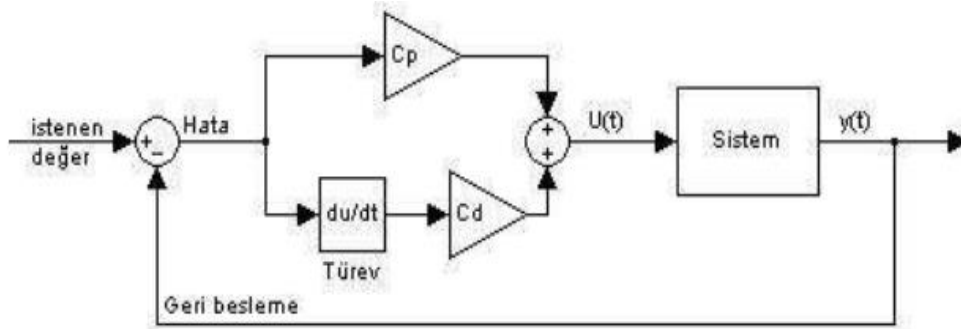
$$f(x, u) \cong f(x_0, u_0) + \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=x_0} (x - x_0) + \left. \frac{\partial f}{\partial u} \right|_{u=u_0} (u - u_0) + \dots \text{diğer terimler} \quad (11)$$

Sistem doğrusallaştırma (linearization) başka bir çalışma konusundan burada ayrıntılarına yer verilmemiş olup ilgili kontrolör parametreleri aşağıda verilen Tablo 2 ile detaylandırılmıştır.

Tablo 2. Kontrolör parametreleri

	Cp	Cd
x	2,28	1,07
y	1,289	1,065
z	2,96	25
$\phi$	0,0842	0,23
$\theta$	0,25	0,90
$\psi$	0,0163	0,2837

Döner kanatlı İHA sistemi için tasarlanan PD (oransal-türevsel) kontrolör benzetim modeli ve örnek uygulama platformu Şekil 3'te verilmiştir. Konum ve yönelim denetim/kontrol performansı Bölüm 3'de belirtilen birim basamak tepkileri ile değerlendirilmiştir.



Şekil 3. Döner kanatlı İHA sistemi (üstte) ve kontrolör benzetim modeli (altta).

### 3. Bulgular

Döner kanatlı İHA sistemi için tasarlanan kontrolör birim basamak tepkileri Şekil 4-7'de verildiği gibi elde edilmiştir.

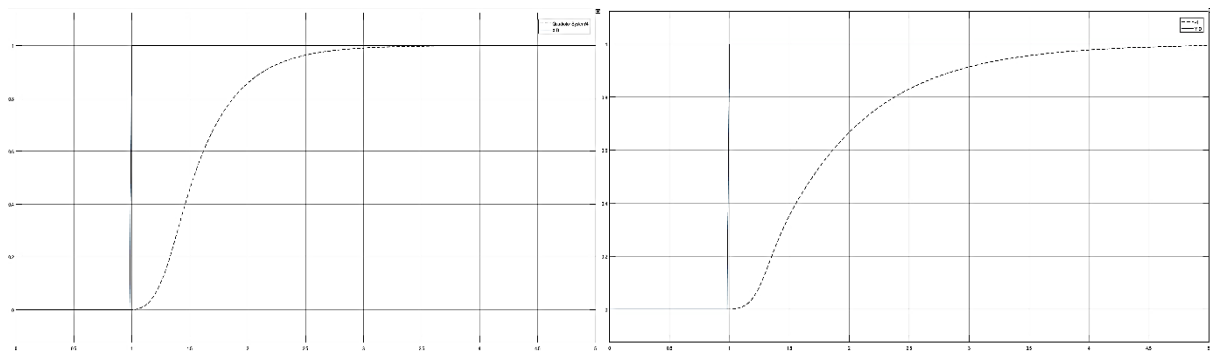
Denetim için teorik tartışmalardan sonra oransal (P) ve türevsel (D) kontrol parametrelerinin sistem üzerindeki etkisi benzetim ortamında değerlendirilebilmekte ve örnek platform üzerinde uygulanabilmektedir. Böylece lisans eğitimlerinde kontrol tasarımı uygulaması için etkin bir yardımcı elde edilmektedir.

Burada önerilen yapıda, İHA sisteminin X,Y,Z konumları için birim basamak tepkileri Şekil 4 ve 5 'de ve dönme (roll), yunuslama (pitch), süpürme (yaw) yönelim açıları için birim basamak tepkileri ise Şekil 5 ve 6 'da sunulmuştur.

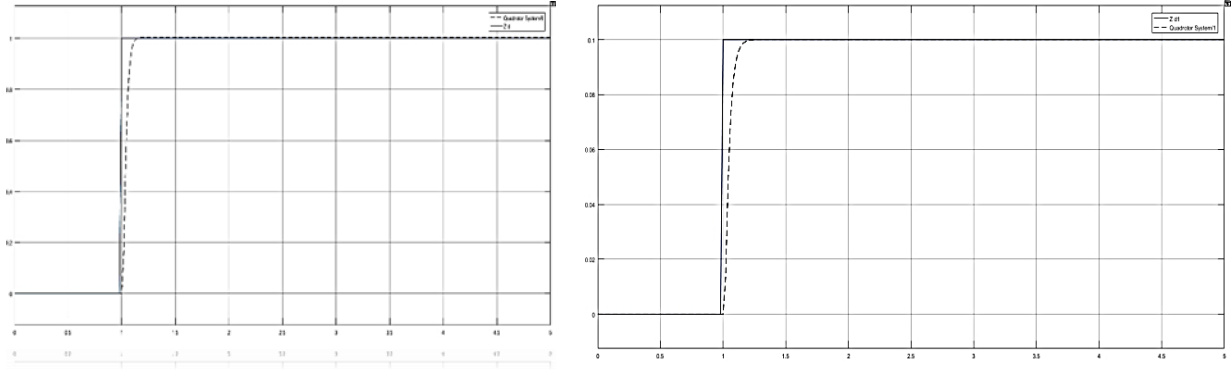
Kontrol katsayılarına bağlı sonuçların yükselme zamanı (rise time), aşım (overshoot), kararlı-hal hatası (steady-state error) gibi parametreler üzerindeki etkileri benzetim ortamında test edildikten sonra örnek platformda (Şekil 3) uygulanmaktadır.

İHA sisteminin benzetim ortamında kontrol komutları ile X ve Y eksenlerindeki hareketleri ve araç seyrüsefer güzergahının 2 eksendeki gösterimi ise Şekil 7 ile sunulmuştur.

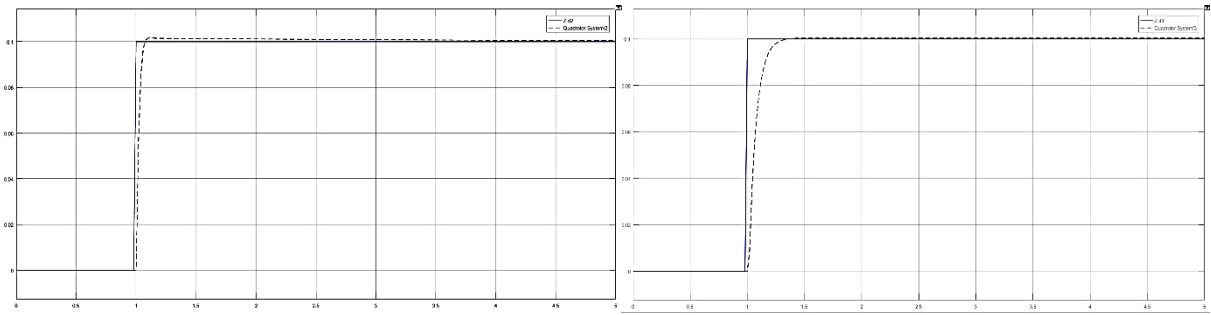
Döner kanatlı İHA sistemi için tasarlanan PD kontrolörün deneysel platform üzerinde gerçek zamanlı uygulamaları ve Donanım içeren Simülasyon (Hardware in the Loop) detayları bu sınırlı çalışma içerisine dahil edilmemiştir. Bununla birlikte sistemin deneysel ve benzetim çalışmalarında eğitim yardımcısı olarak kullanılabileceği değerlendirilmektedir.



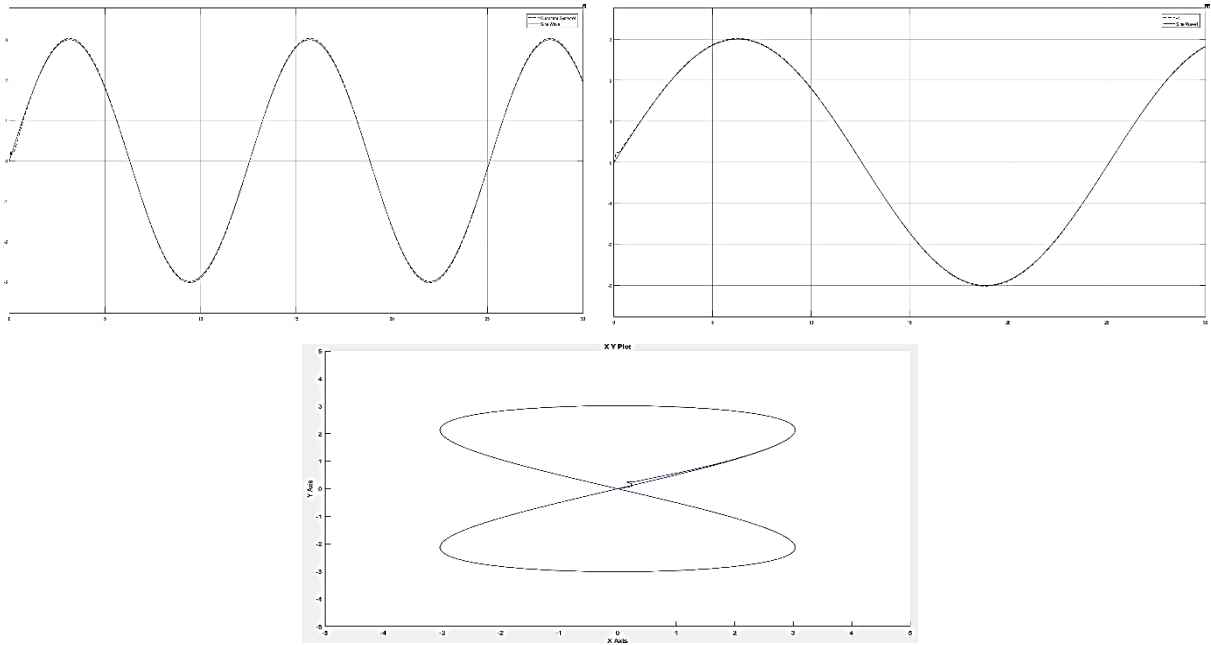
Şekil 4. İHA sisteminin X konum (solda) ve Y konum (sağda) birim basamak tepkileri.



Şekil 5. İHA sisteminin Z konum (solda) ve Roll (solda) birim basamak tepkileri.



Şekil 6. İHA sisteminin Pitch (solda) ve Yaw (solda) birim basamak tepkileri.



Şekil 7. Benzetim ortamında kontrol komutları ile İHA sisteminin X (solda), Y (sağda) eksenlerindeki hareketleri ve güzergahın 2 eksendeki gösterimi (aşağıda).

Çalışmamızın amacı kontrol tasarım eğitimleri için bir uygulama platformu önermek olduğundan kontrol tasarım performansını ölçmek hedeflenmemiş ve kontrol komutlarını izleme doğrulukları ile ilgili metriklere burda yer verilmemiştir. Durum çalışmalarımızda oransal-türevsel ( $C_p$ - $C_d$ ) kontrol katsayılarının sistemde yükselme zamanı (rise time), aşım (overshoot), kararlı-hal hatası (steady-state error) üzerinde etkileri görsel olarak incelenmiştir. Yazında taradığımız Oktay ve Özen

(2021) ve Elmas ve Alkan (2023) gibi çalışmalarla karşılaştırıldığında yukarıdaki senaryolarda aldığımız kontrol performans değerlerinin ise genel olarak başarılı olduğu görülmektedir. İlerleyen çalışmalarda Donanım içeren Simülasyon (Hardware in the Loop- HiL) sistemli kontrolör tasarım özel olarak amaçlandığında doğruluklar ile ilgili metriklere detaylı yer verilmesi ve bunların da eğitim yardımcısı olarak kullanılması planlanmıştır.

#### 4. Tartışma ve Sonuç

İHA'lar üzerinde bir kullanıcı taşımaya gerek duymayan yerden ve önceden programlanmış ve sisteme yüklenmiş bir uçuş rotasına göre görev yapan araçlar olarak günümüzde sivil ve askeri birçok görevde yaygın olarak kullanılmaktadır (Nguyen ve ark., 2020).

Bu makalede İHA'nın temel yapısı ile benzer sistemlerin kontrolü ve kontrol sistemlerinin test edilmesini sağlayacak deney düzeneğinin araştırılması amaçlanmıştır.

Lisans eğitimlerinde kontrol tasarımı uygulaması kapsamında doğrusal olmayan modele sahip olan bir İHA'nın denetimi için tasarlanan kontrolörlerin başarımları basamak tepkilerinden ve verilen yönergeleri/yörüngeleri takip etme yeteneklerinden gözlenmiştir. Benzetim sonuçları, doğrusal yöntemler ile sistem denetlenebilirliğini ve klasik kontrol katsayıları gibi faktörlerin denetim üzerindeki etkilerini içeren uygulamanın eğitim yardımcısı olarak kullanılabileceğini göstermiştir.

Yaklaşımın benzetim ortamına ilave olarak deneysel ortam kullanan düşük maliyetli bir kontrol tasarım uygulaması olarak sistem denetimi eğitimlerinde kullanılmasının mümkün olduğunu gösteren araştırmamıza ilişkin diğer ayrıntılar çalışmamızda sunulmuştur. İHA matematiksel modeli, kontrol yöntemi, matematik ve formülasyonları gibi teorik tartışmalar ile birlikte benzetim sonuçları ve durum çalışması olarak kontrol tasarım dersi uygulamasına da araştırma içerisinde yer verilmiştir.

Laboratuvar ortamında kontrol deney setinden elde edilen sonuçların benzer yapıda bir kontrolör kullanılarak serbest uçuş yapabilecek sistemlerle çeşitli bilimsel yarışma ve çalışmaları hedeflemek için motivasyon sağlayabileceği de değerlendirilmiştir.

Tasarlanan denetleyicilerin performansı bozucu bir etkiyi geri çevirme (robustness), sistem kararlılığını sürdürebilme ve gürültü altındaki davranışları gelecek çalışmalar arasında planlanmıştır.

Gelecek çalışmalarda ayrıca laboratuvar ortamında geliştirilen İHA üzerinde mikro-kontroller kullanılarak farklı denetleyicilerin gerçek zamanlı olarak Donanım içeren Simülasyon (Hardware in the Loop- HiL) sistemine uyarlanması ile ilgili detayların raporlanması amaçlanmıştır.

#### Katkı Oranı Beyanı

Yazar(lar)ın katkı yüzdesi aşağıda verilmiştir. Tüm yazarlar makaleyi incelemiş ve onaylamıştır.

	E.D.	A.E.O.
K	40	60
T	60	40
Y	60	40
VTI	40	60
VAY	40	60
KT	60	40
YZ	60	40
KI	40	60
GR	60	40

K= kavram, T= tasarım, Y= yönetim, VTI= veri toplama ve/veya işleme, VAY= veri analizi ve/veya yorumlama, KT= kaynak tarama, YZ= Yazım, KI= kritik inceleme, GR= gönderim ve revizyon.

#### Çatışma Beyanı

Yazarlar bu çalışmada hiçbir çıkar ilişkisi olmadığını beyan etmektedirler.

#### Etik Onay Beyanı

Bu araştırmada hayvanlar ve insanlar üzerinde herhangi bir çalışma yapılmadığı için etik kurul onayı alınmamıştır.

#### Kaynaklar

- Bouabdallah S, Siegwart R. 2007. Full control of a quadrotor. Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conf. on Intelligent Robots and Systems, October 29, San Diego, California, US, pp: 153-158.
- Canpolat Tosun D. 2024. Bir quadrotorun yörünge takibinde doğrusal ve doğrusal olmayan kontrol yöntemlerinin performans değerlendirmesi. Politeknik Derg, (Erken görünüm). <https://doi.org/10.2339/politeknik.1219648>
- Durmuş A, Duymaz E. 2023. Use of unmanned aerial vehicles for imaging and remote sensing. In: Karakoc, T.H., Özbek, E. (eds) Unmanned Aerial Vehicle Design and Technology. Sustainable Aviation. Springer, Cham, the Netherland, [https://doi.org/10.1007/978-3-031-45321-2\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-031-45321-2_11)
- Duymaz E, Oğuz AE, Temeltaş H. 2020. Exact flow of particles using for state estimations in unmanned aerial systems` navigation. PLoS ONE, 15(4): e0231412. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0231412>
- Elmas EE, Alkan M. 2023. Bir insansız hava aracı sisteminin tasarımı, benzetimi ve gerçekleştirilmesi. Politeknik Derg, 26(2): 929-940. <https://doi.org/10.2339/politeknik.1037319>
- Nguyen T, Quyen V, Nguyen V, Le M, Tran T. 2020. Control Algorithms for UAVs: A Comprehensive Survey, EAI Endorsed Trans Ind Netw Intell Syst, 7: 23-29. <https://doi.org/10.4108/eai.18-5-2020.164586>
- Oguz AE, Duymaz E. 2016. Artificial potential field based autonomus UAV fligh in dynamic environment. 16th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, Jun, June 13-17, Washington DC, US, pp: 1-9. <https://doi.org/10.2514/6.2016-3454>
- Oktay T, Özen E. 2021. Döner kanatlı insansız hava aracının sistem tasarımı ve kontrolü. Avrupa Bil Teknol Derg, 27: 318-324. <https://doi.org/10.31590/ejosat.957056>
- Rodríguez WE, Ibarra R, Romero G, Lara D. 2014. Comparison of

- controllers for a UAV type quadrotor: Feedback control by Bessel's Polynomials and LQR with Kalman Filter. *Appl Mech Mater*, 555: 40-48.
- Rooh A, Li A, Shahab B. 2015. A review of quadrotor UAV: Control methodologies and performance evaluation. *IJAAC*, 10(2): 87-103. <https://doi.org/10.10.1504/IJAAC.2016.076453>
- Runcharoon K, Srichatrapimuk V. 2013. Sliding mode control of quadrotor. *The International Conference on Technological Advances in Electrical, Electronics and Computer Engineering TAECE*, May 9-11, Konya, Türkiye, pp: 552-557.
- Swarup SA. 2014. Comparison of quadrotor performance using backstepping and sliding mode control - semantic scholar. *The International Conference on Circuits, Systems and Control*, November 21-22, Bangalore, India, pp: 7982-7986.
- Xu R, Ozguner U. 2006. Sliding mode control of a quadrotor helicopter. *The 45th IEEE Conference on Decision and Control*, December 13-15, San Diego, CA, US, pp: 4957-4962.
- Yaniktepe B, Donald R. 2004. Flow structure on a delta wing of low sweep angle. *AIAA J*, 42(3): 513-523, <https://doi.org/10.2514/1.1207>.
- Yaniktepe B, Donald R. 2005. Flow structure on diamond and lambda planforms trailing edge region. *AIAA J*, 43(7): 1490-1500, <https://doi.org/10.2514/1.7618>.
- Yaniktepe B, Özalp C, Canpolat Ç. 2016- Aerodynamics and flow characteristics of X-45 delta wing planform, *KSU. J Eng Sci*, 19(1): 1-10, <https://doi.org/10.17780/ksujes.86852>.