



BAŞKALAŞIMIN OCTOROTOR BOYLAMASINA UÇUŞUNA ETKİSİ

Oğuz KÖSE^{1*}

¹Erzincan Binali Yıldırım University, Vocational School, Aircraft Technology Program, 24000, Erzincan, Türkiye

Özet: İnsansız hava araçları (İHA) son yıllarda popülerliği artan hava araçları olarak endüstriyel ve bilimsel çevrede dikkatleri üzerine çekmektedir. İHA'lar üzerinde bulunduğu rotor sayısına göre isimlendirilir. Bu çalışmada döner kanat kategorisinde ve sekiz rotora sahip bir octorotor incelenmiştir. Çalışma kapsamında octorotor kol uzunlukları değiştirilerek (uzatılarak ya da kısaltılarak) başkalaşım uygulanmıştır. Başkalaşım, İHA'larda son yıllarda uçuş üzerine olan etkisinin incelenmesi konusunda araştırmacılar tarafından tercih edilen yöntem olmuştur. Başkalaşım döner kanatlı İHA'larda en yaygın olarak kol uzunluklarının eşzamanlı ya da eş zamanlı olmayan bir şekilde değiştirilmesi ile gerçekleştirilmektedir. Başkalaşımın boylamasına uçuşa olan etkisi yükselme zamanı, yerleşme zamanı ve aşım gibi parametreler kontrol edilerek incelenmiştir. Octorotor tam modeli ve başkalaşım durumuna ait dört adet modeli Solidworks çizim programında gerçeğine uygun olarak çizilmiştir. Ardından buradan elde edilen kütle ve eylemsizlik momenti değerleri ile durum uzay modeli yaklaşımı kullanılarak Matlab/Simulink ortamında 1°lik yörüngeyi izleyen boylamasına uçuş simülasyonları oransal-integral-türev (PID) kontrol algoritması ile gerçekleştirilmiştir. Octorotor matematiksel modeli için Newton Euler yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde doğrusal olmayan yapıya sahip hareket denklemleri doğrusal denklemlere dönüştürülmüştür. Simülasyonlarda verilen yörünge başarılı bir şekilde izlenmiş ve tasarım performans kriterlerine göre değerlendirilmeler yapılmıştır.

Anahtar kelimeler: İHA, Octocopter, Kontrol, PID, Başkalaşım

Effect of Morphing on Octorotor Longitudinal Flight

Abstract: Unmanned aerial vehicles (UAVs) have attracted attention in industrial and scientific environment as air vehicles that have increased in popularity in recent years. UAVs are named according to the number of rotors on them. In this study, an octorotor in the rotary wing category with eight rotors is analysed. Within the scope of the study, morphing was applied by changing (lengthening or shortening) the octorotor arm lengths. In recent years, morphing has been the method preferred by researchers to examine the effect on flight in UAVs. Morphing is most commonly performed by changing the arm lengths collectively or differentially in rotary wing UAVs. Effect of morphing on longitudinal flight was analysed by controlling parameters such as rise time, settling time and overshoot. The full model of the octorotor and four models of the morphing state were drawn in Solidworks drawing program in accordance with the reality. Then, with the mass and inertia moments values obtained from here, longitudinal flight simulations following a 1° trajectory in Matlab/Simulink environment with the state space model approach were performed with the proportional-integral-derivative (PID) control algorithm. Newton Euler method was used for the mathematical model of the octorotor. In this method, equations of motion with nonlinear structure are transformed into linear equations. In the simulations, the given trajectory was successfully followed and evaluated according to the design performance criteria.

Keywords: UAV, Octocopter, Control, PID, Morphing

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Erzincan Binali Yıldırım University, Vocational School, Aircraft Technology Program, 24000, Erzincan, Türkiye

E mail: oguz.kose@erzincan.edu.tr (O. KÖSE)

Oğuz KÖSE



<https://orcid.org/0000-0002-8069-8749>

Gönderi: 29 Mart 2023

Kabul: 17 Nisan 2023

Yayınlanma: 01 Temmuz 2023

Received: March 29, 2023

Accepted: April 17, 2023

Published: July 01, 2023

Cite as: Köse O. 2023. Effect of morphing on octorotor longitudinal flight. BSE Eng Sci, 6(3): 185-192.

1. Giriş

Son yıllarda dikey kalkış ve iniş yapan çok rotorlu İHA'lar kontrol ve modelleme alanında araştırmacıların ilgi odağı haline gelmiştir. Dikey kalkış ve iniş yapabilen İHA'lar yüksek manevra kabiliyetine sahiptir. Bu özelliğinden dolayı doğal afetlerde insanlar için girilmesi riskli alanlarda arama kurtarma aracı olarak kullanılabilirler (Estrada ve Ndoma, 2019). Bunun yanında bu tür araçlar sivil kullanımda fotoğrafçılık (Chen ve ark., 2020), sinema (Mademlis ve ark., 2023), hobi ve posta sektöründe (Iwatav ve ark., 2007) askeri kullanımda ise trafik denetleme (Gupta ve

Verma, 2022), sınır devriyesi (Ahmadian ve ark., 2022) ve istihbarat toplamak (Wilcox, 2015) amaçlı kullanılmaktadır. Bu kadar yaygın kullanılması sonucu İHA'lar havacılık sektörünün önemli bir pazarını oluşturmada, endüstriyel ve akademik olarak geliştirilmesi hızla devam etmektedir. İHA'lar aerodinamik yapısına göre sabit kanatlı ve multi rotor (döner kanatlı) olmak üzere ikiye ayrılır (Singhal ve ark., 2018). Multi rotor İHA'lar ise kullanılan rotor sayısına göre isimlendirilir. Dört rotolu bulunan multi rotor İHA'lara quadrotor (quadcopter), altı rotolu bulunan multi rotor İHA'lara hexarotor (hexacopter) ve



sekiz rotor bulunduran İHA'lara ise octorotor(octocopter) adı verilmektedir. İsmi anılan üç multi rotor en çok tercih edilen multi rotor İHA türleridir. Bunun yanında on ve on iki rotora sahip decacopter ve dodecapter türleride bulunmaktadır. Multi rotor İHA'lar yapısal olarak basit olmasına rağmen kontrol sistemi olarak karmaşık bir yapıya sahiptir. Bundan dolayı son yıllarda multi rotor İHA'ların modellenmesi ve kontrolü üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Wang ve ark. (2016) rüzgar gibi dış bozucular etkisi altında dengesini koruyabilen ve uçuşunu devam ettirebilen bir quadrotor tipi İHA'yı kaskat PID algoritması kullanarak modellemişlerdir. Quadrotor dinamiklerinin matematiksel modeli Newton-Euler metodu kullanılarak geliştirilmiştir. Matematiksel modelde hem doğrusal hem de doğrusal olmayan denklemler türetilmiştir. Ancak durum uzay modeli yaklaşımında doğrusal denklemler kullanılmıştır. Kaskat PID algoritması katsayıları geçmiş deneyimler ve benzer çalışmalardan deneme yanılma yöntemi ile elde edilmiştir. Quadrotor x, y ve z eksenleri üzerindeki hareketleri aşımı en azaltmış, quadrotor'un hız cevabını ise önemli ölçüde artırmıştır. Bununla birlikte quadrotor hareket değişikliklerine karşı daha stabil ve güçlü bir davranış sergilemiştir. Stabil uçuş büyük drift'ler olmadan başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Kurak ve Hodzic (2018) LQ ve LQG metodolojilerini uygulayarak quadrotor kontrol sistemi geliştirmişlerdir. Kontrol sistemi için quadrotor doğrusal olmayan modelini ilk adım için kullanmışlardır. Ardından quadrotor askıda uçuş ya da hover olarak adlandırılan uçuş durumunu dikkate alarak quadrotor doğrusal modelini elde etmişlerdir. Kontrol sisteminin amacı sensör hataları ve çevresel bozulmalar altında quadrotor'un verilen yörüngeyi izlemesidir. Bunun için LQ kontrolör yanında Kalman Filtresi modele dahil edilmiştir. Bununla birlikte kontrolör düzenli olmayan bozulmalar ve belirli bir giriş sinyali için güçlü bir performans sergilemiştir. Ayrıca verilen yörüngeyi sensör hataları ve çevresel bozulmalar altında daha az hata ile izlediğini grafiklerle ortaya koymuş ve geçici hal hatası iyi ayarlanan kontrolör parametreleri ile en aza indirgenmiştir. Sharipov ve ark. (2019) Matlab yazılım paketini kullanarak hexarotor tipi İHA üzerine etkiyen kuvvet dinamiklerinin matematiksel simülasyon sürecini ele almışlardır. Simülasyonda hexarotor üzerine etkiyen rüzgar ve harici bozulmalar ile sensör hataları dikkate alınmıştır. Matlab programında kullanılan bloklar teorik formüller kullanılarak hesaplanmıştır. Matematiksel formüller kullanılarak yapılan simülasyonlar İHA yazılım ve donanımının gelişmesinin her aşamasında hataları etkili bir şekilde hesaplamaya ve ortadan kaldırmaya olanak tanıyarak daha etkili bir uçuş yapılmasını sağlamıştır. Le ve Nam (2015) hexarotor'un kontrol ve yörünge izleme problemini matematiksel model ile ele almışlardır. Hexarotor diferansiyel denklemlerini Newton-Euler denklemleri ile türetmişlerdir. Hexarotor dinamik modelinin daha stabil çalışması için durum uzay modeli quaternion yöntemi ile oluşturulmuştur. Ayrıca

kontrol algoritması olarak PID algoritmasının kullanıldığı çalışmada yatay ve dikey eksenlerdeki uçuşlar başarılı ile Matlab ortamında test edilmiştir. Hemza ve Boualem (2018) bir octorotor için mekanik ve elektrik aksamaları ile dinamik modeli tasarlanmıştır. Octorotor sisteminin dinamik modeli dönme ve öteleme hareketleri için Euler-Lagrangian ve Newton-Euler modelleri ile desteklenmiştir. PID kontrol algoritması octorotor kontrolü için tercih edilmiştir. Octorotor ile yapılan testlerde hem model hem de PID algoritması ağırlık dağıtımı ve rüzgar türbülansı altında hataları minimize ederek uçuşları başarı ile gerçekleştirmiştir.

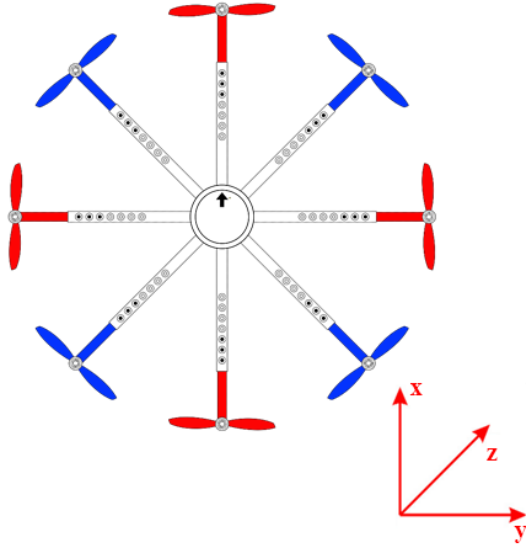
Son yıllarda İHA kontrol ve modellemesi yanında başkalaşım üzerine de birçok çalışma yapılmıştır. Kose ve Oktay (2020a,b) bir octorotor için hem boylamasına hem de yanlamasına uçuşu başkalaşım ve PID algoritması kullanarak Matlab ortamında testlerini gerçekleştirmiştir. Başkalaşım ile kol uzunluklarını değiştirerek uçuşa etkisi incelenmiştir. Başkalaşım ile değişen parametrelerin tespiti için Solidworks programı kullanılarak belirli kol uzunluklarındaki uçuş durumları incelenmiştir. Oktay ve Kose (2020) başkalaşım ile değişen parametreler ve PID katsayılarını belirlemek için optimizasyon yöntemlerini de kullanarak başkalaşımın uçuşa olan etkisini incelemiştir. Çalışmalarında octorotor için simülasyonlarda ki yükselme zamanı, yerleşme zamanı ve aşım gibi tasarım performans kriterleri değerlendirilerek uçuş performansı iyileştirilmeye çalışılmıştır. Kose ve Oktay (2022) başkalaşımın hexarotor sapma uçuşu üzerine etkisini optimizasyon yöntemleri ve PID algoritması kullanarak Matlab ortamında incelemiştir. Kose ve Oktay (2023) başkalaşımın hexarotor boylamasına uçuşu üzerine etkisini derin sinir ağları ve PID algoritması kullanarak incelemişlerdir. Seçilen bir kol uzunluğu derin sinir ağları ile öğrenme gerçekleştirilerek en uzun parametrelerin bulunması sağlanmıştır. Çalışmalarda tasarım performans kriterleri göz önüne alınarak uçuşun hangi durumlarda iyileştiği tespit edilmiştir.

Bu çalışmada octorotor tipi bir İHA modellenmesi ve PID kontrol algoritması kullanılarak başkalaşımın boylamasına uçuş üzerine etkisi incelenmiştir. Octorotor modellemesinde Newton-Euler yaklaşımı kullanılarak doğrusal hareket denklemleri oluşturulmuştur. Doğrusal hareket denklemleri octorotor tüm uçuş durumları için değil sadece boylamasına uçuş durumu için kullanılmıştır. Doğrusal hareket denklemleri kullanılarak durum uzay modeli yaklaşımı kullanılarak Matlab ortamında simülasyon testleri yapılmıştır. Octorotor tam modeli Solidworks programında gerçeğine uygun olarak çizilmiştir. Başkalaşım ise belirli kol uzunluklarına uygulanmıştır. Belirli kol uzunluklarında değişen parametrelerin tespiti için her kol uzunluğu için Solidworks programında tam model çizilerek parametreler buradan elde edilmiştir. Octorotor kontrol algoritması olarak ise yapı basitliği ve kolay uygulanabilirliğinden dolayı PID kontrol algoritması tercih edilmiştir. Simülasyonlar Matlab/Simulink

ortamında gerçekleştirilerek tasarım performans kriterlerine göre hangi kol uzunluklarının octorotor boylamasına uçuşu üzerinde nasıl bir etkiye sahip olduğu belirlenmiş sayısal ifadeler ve grafikler ile ortaya konulmuştur.

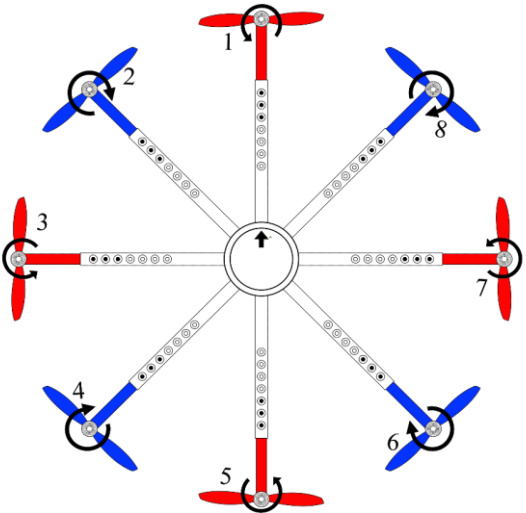
2. Octorotor'un Sistem Modeli ve Başkalaşım

Bir octorotor tipi İHA'nın basitleştirilmiş modeli Şekil 1'de gösterilmiştir. Bir octorotor sekiz adet fırçasız doğru akım motoru bulundurur ve motorlar simetrik olarak çapraz şekilde yerleştirilmiştir.



Şekil 1. Octorotor modeli ve eksen takımı.

Octorotor üzerinde bulunan her rotor bir itki sağlar ve octorotor'un 3 boyutlu uzayda hareketini sağlar. Octorotor hareketi için her rotor bağımsız olarak kontrol edilir. Şekil 2'de gösterilen kırmızı renkli rotorlar saat yönünün tersine doğru dönerken, mavi renkli rotorlar saat yönünde döner.



Şekil 2. Rotor dönüş yönleri

Octorotor kontrolünde her rotor bağımsız olarak kontrol edilir. Boylamasına hareketi gerçekleştirmek için 2 ve 8

numaralı rotor hızları azaltılırken 4 ve 6 numaralı rotor hızları artırılır. Şekil 2'de ok yönü ileriye gösterir. Bu durumda octorotor ileri yönlü bir hareket gerçekleştirir. Eğer 2 ve 8 numaralı rotor hızları artırılır, 4 ve 6 numaralı rotor hızları azaltılırsa octorotor geri yönlü bir boylamasına hareket gerçekleştirilir. Octorotor üzerine etki eden iki tür kuvvet vardır. Bunlar her motorun ürettiği itki (T) ve yer çekimi kuvveti (G). Her rotorun ürettiği toplamları Eşitlik 1'de gösterilmiştir.

$$T = b \sum_{i=1}^8 \Omega_i^2 \quad (1)$$

Burada b rotor itki sabitini ve Ω_i ise i . rotorun açısal hızını göstermektedir. Boylamasına hareket gerçekleştirilirken rotor hızlarının değişmesinden dolayı octorotor boylamasına ekseninde bir tork oluşacaktır. Bu tork ise Eşitlik 2'de gösterilmiştir.

$$\tau_b = bl(\Omega_1^2 + \frac{\sqrt{2}}{2}\Omega_2^2 + \frac{\sqrt{2}}{2}\Omega_8^2 - \Omega_5^2 - \frac{\sqrt{2}}{2}\Omega_4^2 - \frac{\sqrt{2}}{2}\Omega_6^2) \quad (2)$$

Octorotor simetrik bir yapı olduğu için her rotor ağırlık merkezi ve octorotor kendi ağırlık merkezi arasındaki mesafe her kol için eşittir ve bu uzunluk Eşitlik 2'de l ile gösterilmiştir.

Octorotor matematiksel modelini elde edebilmek için Newton'un hareket kanunlarından ve Euler açılarından faydalanılır (Sadeghi ve ark., 2016). Boylamasına eksen üzerinde hareket etmek için her rotorun hızları bağımsız olarak değiştirilirken octorotor üzerinde oluşan tork τ_b ve octorotor'un sahip olduğu eylemsizlik momenti I_y ile ifade edilirse boylamasına uçuş için Euler açısı Eşitlik 3'deki gibi gösterilir.

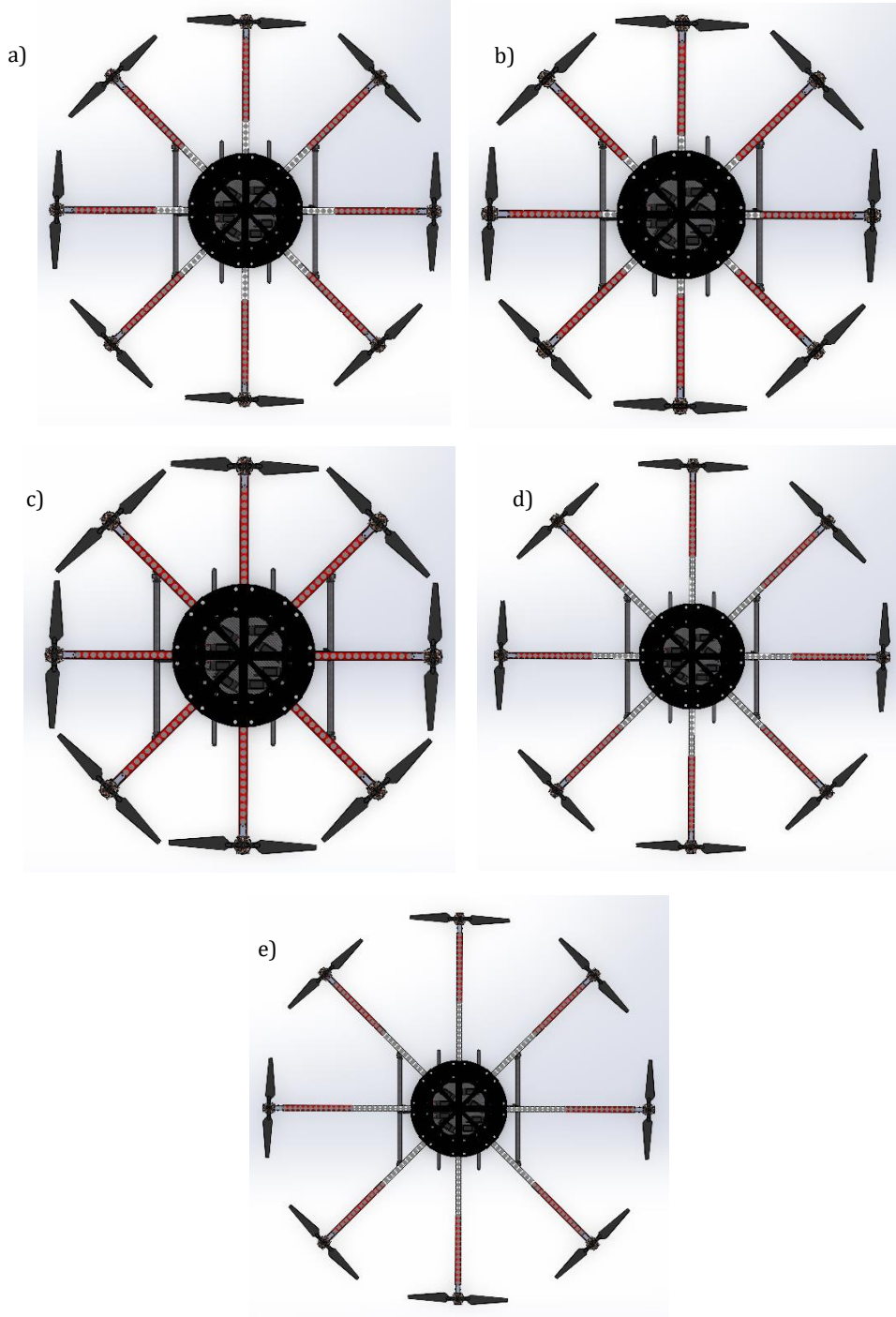
$$\dot{\theta} = \frac{\tau_b}{I_y} \quad (3)$$

Döner kanat İHA'lar tarım sektöründen güvenliğe, hobiden eğlenceye kadar geniş bir yelpazede kullanılan araçlardır. Manevra kabiliyetleri ve kullanım kolaylıklarından dolayı sabit kanatlı hava araçlarına göre daha tercih edilir hale gelmişlerdir (Şahin et al., 2022). Yüksek manevra kabiliyetleri ile farklı uçuş koşullarına ve durumlarına adapte edilmeye uygun hava araçlarıdır. Mağara veya yer altı tünelleri gibi alanların keşfedilmesi veya dar alanlardan geçilmesi gibi durumlarda döner kanatlı İHA'nın geometrik olarak özelliklerinde değişim getirilebilir (Bai, 2017). Bu durum başkalaşım olarak ifade edilir. Daha geniş manada başkalaşım, genel olarak bir İHA'nın geometrisinde meydana gelen değişiklikler olarak nitelendirilebilir (Oktay ve Kose, 2020). Başkalaşım İHA'nın kol uzunluklarının değiştirilmesi ve kolların birbirlerine göre açıların değiştirilmesi gibi yöntemlerle gerçekleştirilebilir. Ayrıca başkalaşım eğer uçuştan önce henüz İHA yerde iken gerçekleştirilirse pasif başkalaşım, İHA havada uçuşuna devam ederken gerçekleştirilirse aktif başkalaşım olarak nitelendirilir (Oktay ve Coban, 2017).

Bu çalışmada octorotor uçuşu esnasında kol uzunlukları uzatılıp kısaltılarak aktif başkalaşım gerçekleştirilmiştir. Uçuşa başlangıç durumu ile birlikte dört adet başkalaşım

gerçekleştirilerek boylamasına uçuş üzerindeki etkisi test edilmiştir. Şekil 3'te sırası ile octotorotor'un başlangıç ve başkalaşım durumları gösterilmiştir. Octotorotor uçuşa başladığı anda kol uzunluğu 0.45 cm'dir. Başkalaşım durumlarında ise kol uzunlukları önce artırılıp sonra azaltılmaktadır. Başlangıç durumundan sonra ilk başkalaşım durumunda kol uzunluğu 0.51 cm, ikinci başkalaşım durumunda 0.39 cm, üçüncü başkalaşım durumunda 0.57 cm ve son başkalaşım durumunda ise 0.33 cm olarak gerçekleşmektedir. Başkalaşım esnasında kolların octotorotor dönme eksenine olan mesafeleri değiştiği için octotorotor eylemsizlik momentinde

değişikler olacaktır. Eylemsizlik momenti ise Eşitlik 3'te gösterildiği gibi doğrudan boylamasına uçuş için kullanılan Euler açısı üzerinde etkilidir. Eylemsizlik momenti basit yapıli cisimler için sabit formüller ile elde edilmesi mümkündür. Ancak octotorotor gibi birçok yapısal eleman barındıran sistemlerde sabit formüller ile elde etmek yerine Şekil 3'te gösterilen Solidworks çizimleri üzerinden elde edilmiştir. Başkalaşım durumunda octotorotor kütlesi sabit kalırken değişen kol uzunluklarına göre eylemsizlik momentleri Tablo 1'de gösterilmiştir.



Şekil 3. (a) Başlangıç durumu(0.45 cm kol uzunluğu), (b) Başkalaşım 1 (0.51 cm kol uzunluğu), (c) Başkalaşım 2 (0.39 cm kol uzunluğu), (d) Başkalaşım 3(0.57 cm kol uzunluğu), (e) Başkalaşım 4 (0.33 cm kol uzunluğu).

Tablo 1. Octorotor başkalaşım durumuna göre eylemsizlik momentleri

Durum	Kol uzunluğu(cm)	Kütle(kg)	Ix(kg*m ²)	Iy(kg*m ²)	Iz(kg*m ²)
Başlangıç	0,45	4,89	1,61	1,61	0,29
1. Başkalaşım	0,51	4,89	1,58	1,66	0,26
2. Başkalaşım	0,39	4,89	1,55	1,57	0,24
3. Başkalaşım	0,57	4,89	1,66	1,72	0,35
4. Başkalaşım	0,33	4,89	1,5	1,54	0,19

3. Kontrol Algoritması

Octorotor boylamasına uçuşu başkalaşım durumlarında uçuş kontrolcüsü olarak oransal-integral-türev(PID) denetleyici tercih edilmiştir. PID kontrol algoritması endüstriyel sistemlerde popüler olarak kullanılır. Performans olarak yüksek olması, kolay anlaşılabilirliği ve analog-dijital süreçlere kolayca uyum sağlaması popüler olmasında etkilidir (Clarke, 1984). Günümüz kontrol sistemlerinin neredeyse tamamına yakını(%95'ten fazlası) PID tipindedir (Kose, 2021). PID kontrolörde ölçülen bir sistem değişkeni bulunur. Bunun yanında sistem değişkeninin gelmesi istenilen birde ayar noktası bulunmaktadır. Ölçülen sistem değişkeni ile ayar noktası arasında ki fark hata değeri olarak ölçülür. PID kontrol burada devreye girerek ölçülen hata değerini minimize etmeye çalışır. Hatayı minimize ederken çeşitli katsayılar sistem içerisinde kullanılır. PID kontrol algoritması oransal (K_p), integral (K_i) ve türevsel (K_d) olmak üzere üç katsayı içerir. Bu katsayıların her birinin kendine özgü görevi vardır. Bu görevler; K_p katsayısı oransal kontrol görevini yerine getirir. Oransal kontrol, türev ve integral kontrol ile

karşılaştırıldığında daha kolaydır. Oransal kontrol, erişilmek istenilen bir noktayı gerçek değer ile karşılandıktan sonra bir hata değeri (e ile gösterilir) elde eder. Bu hata değerini K_p katsayısı ile çarparak küçültmeyi amaçlar. Oransal kontrol görevinde hata hızlı bir şekilde iyileştirilir ancak çıktı değerindeki salınım görülme olasılığı artar.

K_i katsayısı ise integral görevi yerine getirir. İntegral işlemi, elde edilen hata değerinin eğri altında kalan toplamı anlamına gelir. İntegral, hatayı sıfır değerine ulaşıncaya kadar entegre eder. Negatif hata meydana geldiği zaman ise kontrol çıkışı azaltılır, cevap hızını sınırlar ve sistem kararlılığı etkilenir.

K_d katsayısı türevsel görevi yerine getirir. Türevsel kontrol ise zamana bağlı hata değişimi ile ilgilidir. Türevsel kontrol, geçmişteki hata değişimlerinden gelecekte olabilecek değişimleri öngörür. Bu öngörü ile sistemi sınırlar ve yavaşlatır. Eğer kontrolde iki örnekleme arasındaki hatada bir değişim olmadı ise türev sıfırdır. Katsayıların sistem üzerindeki etkisi Tablo 2'de gösterildiği gibidir.

Tablo 2. PID katsayılarının etkileri

Katsayı	Yükselme Zamanı	Aşım	Yerleşme Zamanı	Kalıcı durum hatası
K_p	Kısalır	Artar	Az değişir	Azalır
K_i	Kısalır	Artar	Artar	Ortadan kalkar
K_d	Az Değişir	Azalır	Azalır	Az değişir

Tablo 2'ye göre PID kontrol algoritmasının avantajları şu şekilde sıralanabilir:

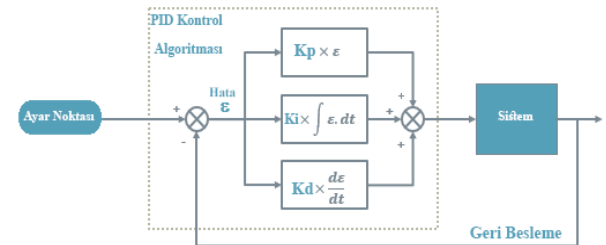
- Uygulanması kolaydır,
- Düşük kaynak tüketimi vardır,
- Ayar uyumsuzluklarına karşı dayanıklıdır,
- Deneme yanılma yöntemleri ile ayarlanması kolaydır,
- Ölçülmemiş bozulmalara karşı iyi yanıt verir.

PID algoritması Şekil 4'deki gibi gösterilebilir. Boylamasına uçuş için kullanılan PID formülü ise Eşitlik 4'te gösterilmiştir.

$$u(t)_{boy} = K_{p_{boy}} e(t) + K_{i_{boy}} \int_0^t e(t)dt + K_{d_{boy}} de(t)/d(t) \quad (4)$$

Octorotor'un boylamasına hareketi için seçilen PID katsayıları tüm uçuş durumları için sabit kabul edilmiştir. PID katsayıları Ziegler-Nichols, Yuwana-Seborg, Cohen-Coon ve deneme yanılma ya da geçmiş tecrübelerle

dayanılarak belirlenebilir. Bu çalışmada boylamasına uçuş için PID katsayıları geçmiş tecrübelerle dayanılarak elde edilmiştir. Buna göre PID katsayıları Tablo 3'de gösterilmiştir.



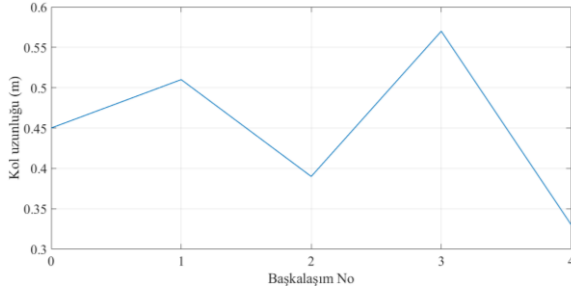
Şekil 4. PID kontrol algoritması.

Tablo 3. PID katsayıları

P	I	D
64	6	64

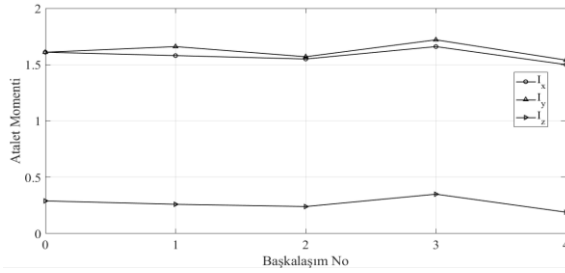
4. Bulgular ve Tartışma

Simülasyonlarda kullanılan octorotor tam modeli ve başkalaşım durumlarının tamamı Solidworks programında çizilmiştir. Kol uzunlukları başkalaşım durumuna göre değiştirilmiştir. Uçuş üzerindeki etkisini kavrayabilmek için kollar sırası ile uzatılmış ve kısaltılmıştır. Kol uzunluklarının başlangıç ve ardından devam eden uzunluk grafiği Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Başkalaşım durumlarında kol uzunluğu.

Başkalaşım ile birlikte kol uzunluklarının değişimi octorotor eylemsizlik momentleri üzerinde de değişiklikler meydana getirecektir. Bu değişim Solidworks programında çizilen tam model ve başkalaşım modelleri üzerinden elde edilerek Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 5. Başkalaşım durumlarında eylemsizlik momentleri.

Tablo 4. Tasarım performans kriterleri

	Yükselme Zamanı(saniye)	Yerleşme Zamanı(saniye)	Aşım(%)
Başlangıç	0.0369	0.296	4,20
Başkalaşım 1	0.0381	0.331	3,99
Başkalaşım 2	0.0359	0.267	4,40
Başkalaşım 3	0.0395	0.373	3,77
Başkalaşım 4	0.0352	0.245	4,56

Tasarım performans kriterleri incelendiğinde başlangıç durumuna göre kollar kısaltıldığında yükselme zamanında düşüş kollar uzadığında ise artış gözlemlenmiştir. Yerleşme zamanında ise kollar kısaltıldığında yerleşme zamanı düşmüş, kollar uzadığında ise yerleşme zamanı artmıştır. Aşım ise kollar kısaltıldığında artmış ve kollar uzadığında artmıştır. Buna göre kolların kısaltılması yükselme ve yerleşme zamanı üzerinde olumlu etki yaparken aşımı artırarak olumsuz etkilemiştir. Burada aşım değerleri PID katsayıları değiştirilerek düşürülebilir fakat çalışmada sabit PID katsayıları tercih edildiği için farklı yöntemlerin kullanılması yoluna gidilmemiştir.

Euler açıları genel olarak $\phi \in]-\pi, \pi], \theta \in]-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}[$ ve $\psi \in]-\pi, \pi]$ arasında kabul edilir. Bundan dolayı verilen PID katsayıları ile birlikte başlangıç ve başkalaşım durumlarında octorotor boylamasına uçuş için 1°'lik yörüngeyi 3 saniye boyunca takip etmesi istenmiştir. Simülasyon grafiklerinde octorotor'un tüm durumlar için yörüngeyi başarılı bir şekilde takip ettiği görülmüştür.

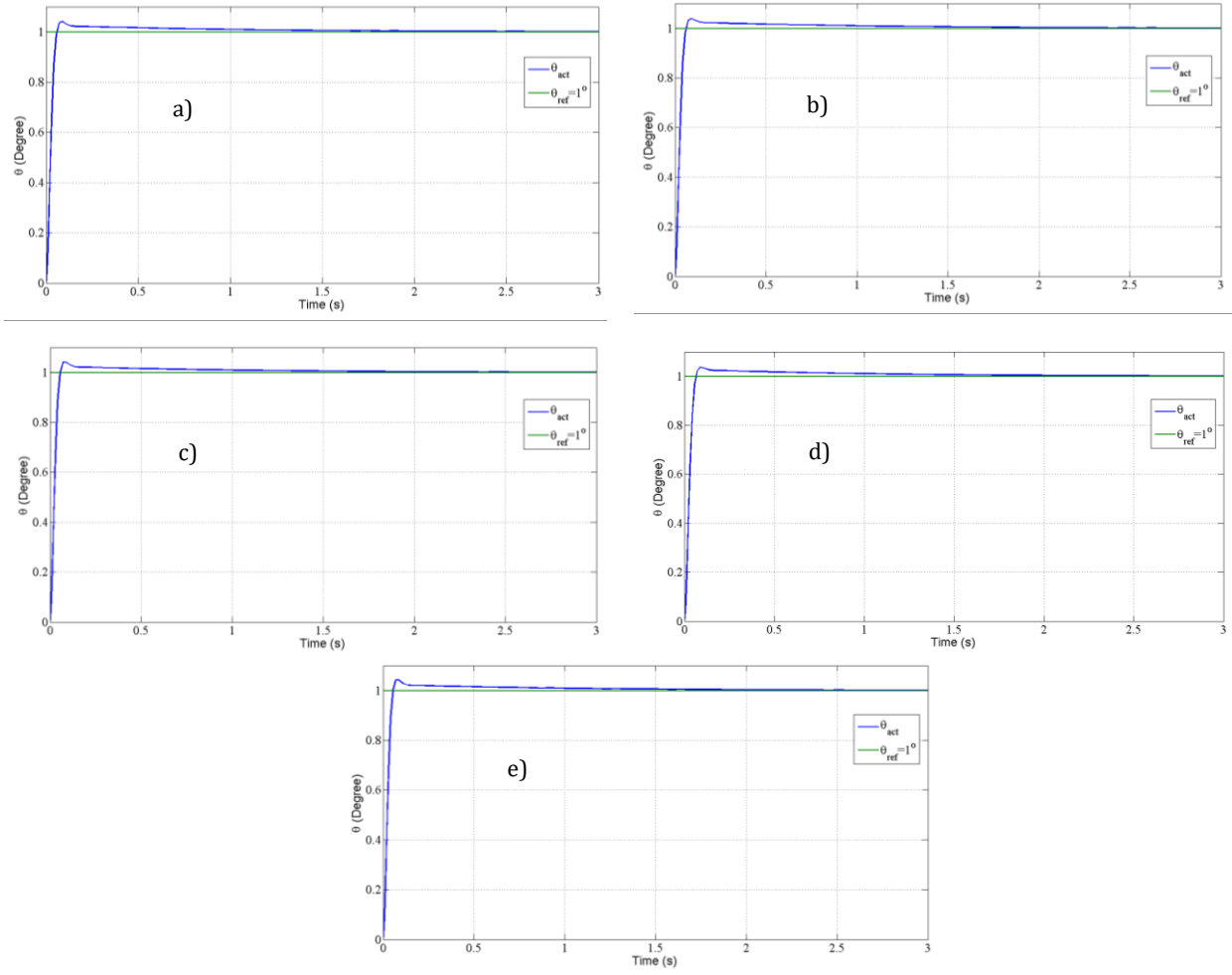
5. Sonuç

Bu çalışmada, octorotor bir İHA'nın başkalaşım durumunun boylamasına uçuş üzerine etkisi incelenmiştir. Değişen kol uzunluklarına bağlı olarak atalet momenti değerlerini belirlemek uçuş kontrolcüsü için zor bir iştir. Bunun üstesinden gelmek için octorotor tam modeli ve başkalaşım modelleri Solidworks programında çizilmiştir. Bu çizimlerden ise atalet momentleri kol uzunluklarına göre elde edilmiştir. Simülasyonlar için ise Matlab/Simulink ortamı kullanılmıştır. Newton Euler yaklaşımı kullanılarak elde edilen hareket denklemleri doğrusal formda kullanılmıştır. Doğrusal formda kullanılan denklemler durum uzay modeli yaklaşımı ile simülasyonlarda kullanılmıştır.

Octorotor boylamasına uçuş için tüm başkalaşım durumları için 1°'lik yörüngeyi takip etmesi istenmiştir. Şekil 7'deki gibi simülasyon grafikleri incelendiğinde, octorotor'un tüm başkalaşım durumları için yörüngeyi izlediği görülmüştür. Ancak başkalaşımın uçuş üzerinde nasıl bir etkisi olduğunu incelemek için yülseme zamanı, yerleşme zamanı ve aşım gibi tasarım performans kriteri değerlerine tek tek bakılması gerekmektedir. Tablo 4'te tasarım performans kriterleri gösterilmiştir.

Buna rağmen PID kontrol algoritması güçlülüğü sayesinde yörüngeyi izleme üzerinde etkili ve başarılı olmuştur.

Gelecekteki çalışmalarda ise hem başkalaşım da ki kol uzunluğu hem de PID katsayıları ve eylemsizlik momentleri gibi değişkenlik gösteren parametreler yapay sinir ağları, derin sinir ağları ve optimizasyon algoritmaları ile tahmin edilerek kol uzunluğuna göre dinamik PID katsayıları belirlenerek tasarım performans kriterlerinin maksimum düzeyde iyileştirilmesi hedeflenmektedir.



Şekil 7. Simülasyon sonuçları (a) Başlangıç Durumu, (b) Başkalaşım 1, (c) Başkalaşım 2, (d) Başkalaşım 3, (e) Başkalaşım 4.

Katkı Oranı Beyanı

Yazar katkı yüzdesi aşağıda verilmiştir. Yazar makaleyi incelemiş ve onaylamıştır.

	O.K.
K	100
T	100
Y	100
VTI	100
VAY	100
KT	100
YZ	100
KI	100
GR	100
PY	100
FA	100

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, PY= proje yönetimi, FA= fon alımı.

Çatışma Beyanı

Yazar bu çalışmada hiçbir çıkar ilişkisi olmadığını beyan etmektedir.

Etik Onay Beyanı

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

Kaynaklar

- Ahmadian N, Lim GJ, Torabbeigi M, Kim SJ. 2022. Smart border patrol using drones and wireless charging system under budget limitation. *Comput Indust Engin*, 164: 107891. doi: 10.1016/j.cie.2021.107891.
- Bai Y. 2017. Control and simulation of morphing quadcopter. MSc thesis, Saint Louis University, Institute of Science, Missouri, USA, pp: 72.
- Chen X, Li G, Yang L, Nie Q, Ye X, Liang Y, Xu T. 2020. Profiling unmanned aerial vehicle photography tourists. *Current Issue Tourism*, 23(14): 1705-1710. doi: 10.1080/13683500.2019.1653832.
- Clarke DW. 1984. PID algorithms and their computer implementation. *Transact Instit Measure Control*, 6(6): 305-316. doi: 10.1177/014233128400600605.
- Estrada MAR, Ndoma A. 2019. The uses of unmanned aerial vehicles -UAV's- (or drones): in social logistic: Natural disasters response and humanitarian relief aid. *Proc Comput Sci*, 149: 375-383. doi: 10.1016/j.procs.2019.01.151.
- Gupta H, Verma OP. 2022. Monitoring and surveillance of urban road traffic using low altitude drone images: a deep learning approach. *Multimed Tools Applicat*, 81(14): 19683-19703.

- doi: 10.1007/s11042-021-11146-x.
- Hemza S, Boualem D. 2018. Study and realization of a prototype octocopter system with PID controller. *Inter J Vehicle Struct Systems*, 10(4): 273–277. doi: 10.4273/ijvss.10.4.09.
- Iwata K, Onda M, Sano M, Komoriya K. 2007. UAV for small cargo transportation. *AIAA InfoTech at Aerospace Conference*, 7-10 May, California, USA, pp: 734–739. doi: 10.2514/6.2007-2784.
- Kose O. 2021. İnovatif yöntemlerle kuadrokopter modellenmesi kontrolü ve gerçek zamanlı uygulamaları. *Doktora Tezi*, Erciyes Üniversitesi, Fenbilimleri Enstitüsü, Kayseri, Türkiye, ss: 127.
- Kose Oguz Oktay T. 2020a. Investigation of the effect of differential morphing on forward flight by using PID algorithm in quadrotors. *J Aviation*, 4(1): 15–21.
- Kose Oguz Oktay T. 2020b. Investigation of the effect of differential morphing on lateral flight by using PID algorithm in quadrotors. *European J Sci Technol*, 18 636–644. doi: 10.31590/ejosat.702727.
- Kose Oguz Oktay T. 2022. Hexarotor yaw flight control with SPSA PID algorithm and morphing. *Inter J Intel Systems Applicat Engin*, 10(2): 216–221. doi: 10.1039/b000000x.
- Kose Oguz Oktay T. 2023. Simultaneous design of morphing hexarotor and autopilot system by using deep neural network and SPSA. *Aircraft Engin Aerospace Technol*, 95(6): 0002-2667. doi: 10.1108/AEAT-07-2022-0178.
- Kurak S, Hodzic M. 2018. Control and estimation of a quadcopter dynamical model. *Period Engin Nat Sci*, 6(1): 63–75. doi: 10.21533/pjen.v6i1.164.
- Le D-K, Nam T-K. 2015. A study on the modeling of a hexacopter. *J Korean Soci Marine Engin*, 39(10): 1023–1030. doi: 10.5916/jkosme.2015.39.10.1023.
- Mademlis I, Torres-González A, Capitán J, Montagnuolo M, Messina A, Negro F, Le Barz C, Gonçalves T, Cunha R, Guerreiro B, Zhang F, Boyle S, Guerout G, Tefas A, Nikolaidis N, Bull D, Pitas I. 2023. A multiple-UAV architecture for autonomous media production. *Multimedia Tools Applicat*, 82(2): 1905–1934. doi: 10.1007/s11042-022-13319-8.
- Oktay T, Coban S. 2017. Lateral autonomous performance maximization of tactical unmanned aerial vehicles by integrated passive and active morphing. *Inter J Adv Res Engin*, 3(1): 1. doi: 10.24178/ijare.2017.3.1.01.
- Sadeghi PS, Shahri AM, Ardestani MA, Rezazadeh S. 2016. LQG-I control for attitude stabilization of V8 octorotor flying robot. 2016 Artificial Intell Robot IRANOPEN, 2016: 151–157. doi: 10.1109/RIOS.2016.7529506.
- Şahin H, Kose O, Oktay T. 2022. Simultaneous autonomous system and powerplant design for morphing quadrotors. *Aircraft Engin Aerospace Technol*, 94(8): 1228–1241. doi: 10.1108/AEAT-06-2021-0180.
- Sharipov D, Abdullaev Z, Tazhiev Z, Khafizov O. 2019. Implementation of a mathematical model of a hexacopter control system. *International Conference on Information Science and Communications Technologies: Applications Trends and Opportunities ICISCT*, 3-4 November, Tashkent, Uzbekistan, pp: 1-5. doi: 10.1109/ICISCT47635.2019.9011842.
- Singhal G, Bansod B, Mathew L. 2018. Unmanned aerial vehicle classification applications and challenges: A review. Preprint, 1–19. doi: 10.20944/preprints201811.0601.v1.
- Oktay T, Kose O. 2020a. Simultaneous quadrotor autopilot system and collective morphing system design. *Aircraft Engin Aerospace Technol*, 92(7): 1093–1100. doi: 10.1108/AEAT-01-2020-0026.
- Oktay T, Kose O. 2020b. Hover control with differential and collective morphing in quadrotors. 10th International Conference on Mathematics Engin Natural and Medical Sciences, 5-7 May 2020, Batumi, Georgia, pp: 124–132.
- Wang P, Man Z, Cao Z, Zheng J, Zhao Y. 2016. Dynamics modelling and linear control of quadcopter. *International Conference on Advanced Mechatronic Systems ICAMechS*, November 30 - December 3, Melbourne, Australia, pp: 498–503. doi: 10.1109/ICAMechS.2016.7813499.
- Wilcox L. 2015. Drone warfare and the making of bodies out of place. *Crit Stud Secur*, 3(1): 127–131. doi: 10.1080/21624887.2015.1005422.