

## BAŞKALAŞIM ve PID ALGORİTMASI İLE HEXAROTOR İHA'NIN SAPMA HAREKETİ KONTROLÜ

Oğuz KÖSE<sup>1</sup>  
Gümüşhane Üniversitesi, Gümüşhane

### ÖZET

Günümüzde insansız hava araçlarına (İHA) olan ilgi giderek artmaktadır. Hayatın her alanında kullanılan bu araçlara yönelik geliştirme çalışmaları ise hızla devam etmektedir. Bu çalışma kapsamında başkalaşım özelliğine sahip bir hexarotor'un oransal-integral-türev (PID) denetleyici ile sapma hareketi kontrolü ele alınmıştır. Başkalaşım ile hexarotor kol uzunlukları değiştirilmiştir. Her değişim durumu Solidworks programında modellenerek gerekli parametreler buradan sağlanmıştır. Özellikle başkalaşım durumunda hexarotor katı cisim modeli ve kolların dönme eksenine olan uzaklıkları değiştiği için atalet momenti değerleri simülasyonlar için gerekli parametrelerdir. Simülasyonlar ise Matlab/Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Hexarotor matematiksel modeli ise Newton hareket kanunlarından elde edilmiştir. Simülasyonlar hexarotor verilen 1°'lik sapma açısı yörüngesini sabit PID katsayıları ile başarılı bir şekilde takip etmiştir. Ancak tasarım performans kriterlerinde kollar kısalduğunda hexarotor'un yörüngeye daha hızlı oturduğu, kollar uzadıkça ise hexarotor'un yörüngeye daha geç oturduğu sonucuna varılmıştır.

### GİRİŞ

İnsansız hava araçları üzerine araştırma, çalışma ve geliştirmeler gün geçtikçe hızlı bir şekilde artmaktadır. İHA'lar askeri operasyonlar, spor, hava durumu, sinema sektörü, tarım ve son yıllarda dünya üzerinde etkili olan Covid-19 önlemleri kapsamında spreyleme [Arief, Subiyanto, Andrasto, Sukamta, Sulistyawan, Sarwono, Alfian, Wicaksono, Amelia ve Putra, 2021] gibi birçok alanda hem tedbir amaçlı hem de veri toplama kaynağı olarak sıkça kullanılmaktadır. İHA'lar üzerine araştırma ve çalışmaların ilk zamanlarında quadrotor olarak bilinen dört rotorlu hava araçları ile kısıtlı çalışmalar yapılmaktaydı [Alaimo, Artale, Milazzo, Ricciardello ve Trefiletti, 2013]. Ancak günümüze gelindiğinde hexarotor gibi altı rotorlu ve octorotor gibi sekiz rotorlu hava araçları da popülerlik kazanmıştır. Hexarotor tipi İHA'ların daha fazla uçuş süresi ve quadrotor tipi İHA'lara göre hata toleransının daha iyi olması ve daha fazla faydalı yük taşıma kapasitesinin olması ön plana çıkarmaktadır. İHA'ların hayatın her alanında kullanılması boyutları ile ilgili yeni bir problemi de beraberinde getirmiştir [Bai, 2017]. Mağara gibi alanlara, operasyon sırasında kapalı bir alana girilmek istendiğinde ya da arama kurtarma faaliyetlerinde insanlara açık alanda erişmek ve malzeme desteğinde bulunabilmek için kanat açıklığı birkaç metreyi bulan ya da avuç içi büyüklüğünde İHA'lar kullanılması gerekliliği ortaya çıkmıştır. İHA'ların uçuş durumunda kanat açıklıklarını değiştirmesi ise hem kontrol açısından hem de stabil uçuş açısından birçok parametreyi etkileyen bir durum olarak karşımıza çıkmaktadır [Oktay ve Kose, 2020].

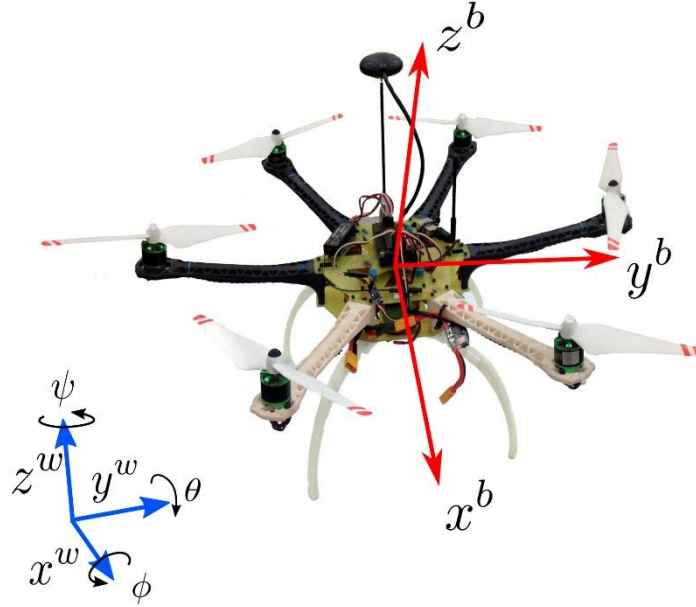
Bu çalışma, hexarotor tipi İHA'nın modellenmesi, değişen kol uzunlukları durumu başkalaşım ile sapma hareketinin kontrol edilmesini amaçlamaktadır.

<sup>1</sup> Dr. Öğr. Üyesi, Havacılık Yönetimi Böl., E-posta: oguzkose24@gmail.com

## YÖNTEM

### Hexarotor Matematiksel Modeli ve Başkalaşım

Hexarotor basit olarak bir gövdenin kollarının uç kısımlarına yerleştirilmiş altı rotordan oluşan yapıya sahiptir. Hexarotor temel hareketlerini gerçekleştirebilmesi için iki referans çerçeve tanımlanır. Bunlar dünya çerçevesi (earth frame) ve gövde çerçevesidir (body frame). Dünya çerçevesine göre gövde çerçevesinin açısal pozisyonların Euler açıları olan  $(\phi, \theta, \psi)$  ile tanımlanır. Hexarotor temel hareketleri olan yatış, yunuslama ve sapma hareketlerini  $x, y$  ve  $z$  eksenleri üzerinde yapar. Bu çalışmanın konusu olan sapma hareketini ise  $z$  ekseninde gerçekleştirir. Sapma hareketi dönülmek istenen yöndeki rotor hızları artırılıp, ters yöne dönen rotorların hızları azaltılarak gerçekleştirilebilir.



Şekil 1: Hexarotor eksenleri ve hareketleri

Hexarotor matematiksel modeli Newton hareket kanunlarına göre türetilir. Hexarotor lineer matematiksel modeli aşağıdaki gibi yazılabilir [Suprpto ve Kusumoputro, 2017].

$$\ddot{x} = g\theta \quad (1)$$

$$\ddot{y} = -g\phi \quad (2)$$

$$\ddot{z} = -g + \frac{U_1}{m} \quad (3)$$

$$\ddot{\phi} = \frac{U_2}{I_x} \quad (4)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{U_3}{I_y} \quad (5)$$

$$\ddot{\psi} = \frac{U_4}{I_z} \quad (6)$$

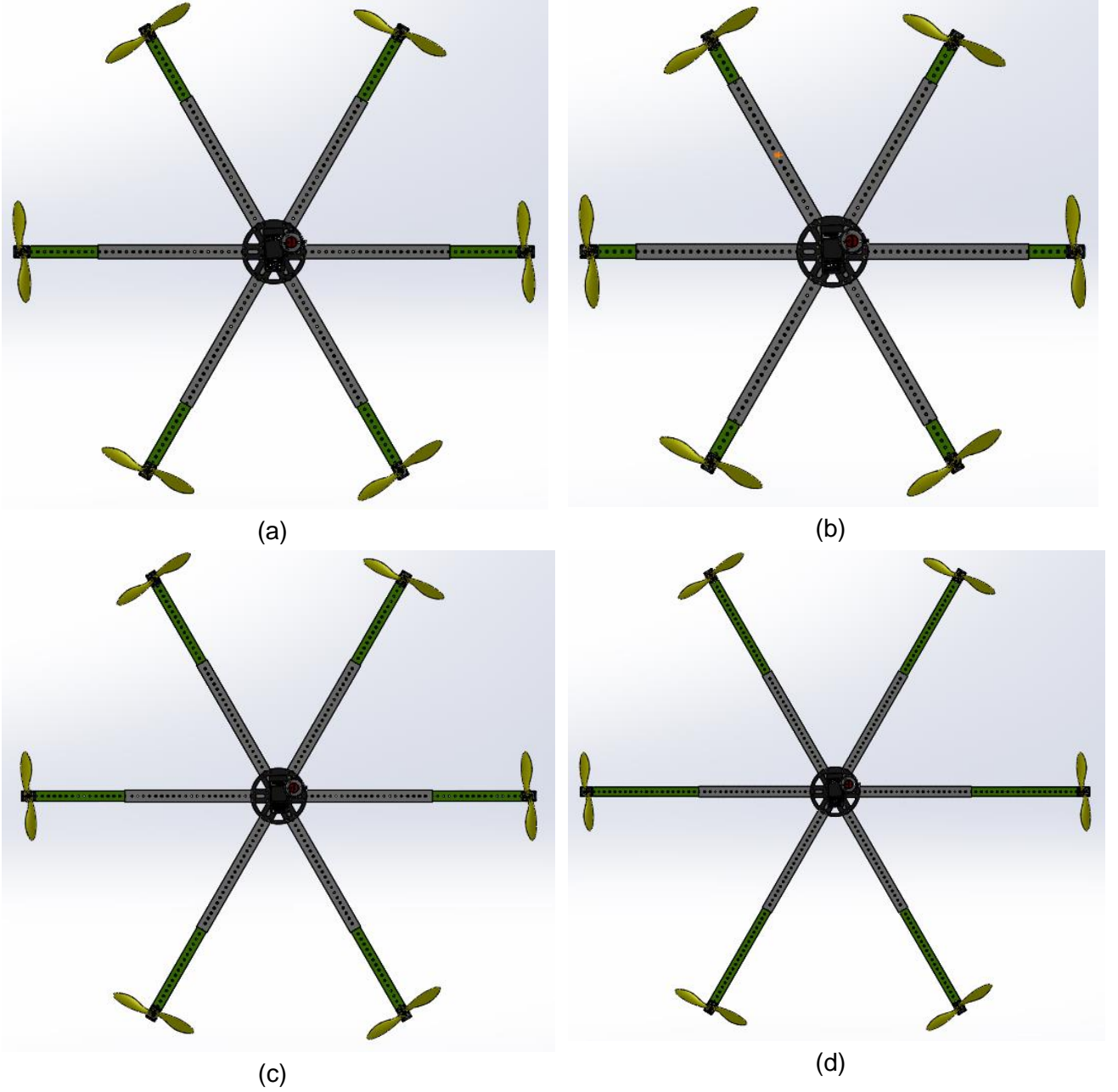
Burada  $g$  yerçekimi ivmesi,  $I_x, I_y$  ve  $I_z$  eksenler etrafında oluşan atalet momenti ve  $U_4$  ise sapma hareketi için kontrol girişidir. Bu çalışmada sapma uçuş kontrol edildiği için  $\psi$  değeri kontrol altında tutulur.  $U_4$  kontrol girişi ise aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$U_4 = d(-\omega_1^2 + \omega_2^2 - \omega_3^2 + \omega_4^2 - \omega_5^2 + \omega_6^2) \quad (7)$$

Burada  $d$  sürükleme katsayısı,  $\omega_i$  ise rotor açısal hızlarını ifade eder.

Başkalaşım insansız hava araçlarının uçuş esnasında ya da uçuş öncesinde geometrisinde meydana gelen değişiklikler olarak ifade edilebilir [Oktay ve Kose, 2019]. Hexarotor tipi insansız hava araçlarında başkalaşım kanat uzunluklarının uzatılıp ya da kısaltılması yolu ile elde

edilir[Oktay ve Kose, 2021]. Hexarotor uçuşuna 0,5 m kol uzunluğu ile başlamıştır. Ardından kol uzunluğu azaltılarak 0,43 m düşürülmüştür. Daha sonra kol uzunluğu 0,58 m değerine getirilmiş ve en son olarak 0,65 m uzunluğuna getirilerek kollar başkalaşım sonlandırılmıştır. Aşağıdaki şekilde hexarotor başlangıç durumu ve üç farklı başkalaşım durumu gösterilmiştir.



Şekil 2: (a) Başlangıç durumu, (b) Başkalaşım 1, (c) Başkalaşım 2, (d) Başkalaşım 3

Başkalaşım esnasında hexarotor katı cisim modeli değiştiği için ve kanatların dönme noktasına olan uzaklıkları değiştiği için atalet momentleri üzerinde değişiklik olacaktır. Ancak hexarotor kütlelerinde herhangi bir değişiklik olmamaktadır. Atalet momentleri analitik yöntemlerle hesaplamak yerine önceden belirlenmiş kol uzunlukları Solidworks programında çizilerek atalet momenti değerleri buradan elde edilmiştir. Aşağıdaki tabloda hexarotor uçuşa başladığı başlangıç durumu ile birlikte üç farklı başkalaşım durumuna ait atalet momenti değerleri verilmiştir.

Tablo 1: Hexarotor atalet momenti değerleri

Durum	Kol uzunluğu(m)	Kütle(kg)	$I_x(kg * m^2)$	$I_y(kg * m^2)$	$I_z(kg * m^2)$
Başlangıç	0,50	3,21	3,01	3,02	0,37
1	0,43	3,21	2,96	2,96	0,26
2	0,58	3,21	2,02	2,02	0,49

3	0,65	3,21	3,15	3,15	0,63
---	------	------	------	------	------

## Kontrol Sistemi

Hexarotor kontrolü için PID algoritması kullanılmıştır. PID algoritması endüstriyel sistemlerde yaygın olarak kullanılan oransal, integral ve türev denetlecilerinin birleşiminden oluşan algoritmadır[Njinwoua ve Wouwer, 2018]. Basitliği, güçlülüğü ve geniş uygulanabilir alanından dolayı tercih edilmektedir. PID kontrolör sistemin çıkış değişkeni değerini geri besleyerek bir ayar noktası ile farkını alarak sonucu minimize etmeye çalışmaktadır[Bennett, 2000]. Burada sistemin çıkış değeri oransal, integral ve türev bloklarından geçirilerek hesaplanır. Her blok için sisteme göre  $k_p$ ,  $k_i$  ve  $k_d$  katsayıları hesaplanması gerekir. Bu katsayılar çeşitli yöntemlerle hesaplanabileceği gibi deneme yanılma yolu ile de hesaplanabilir[Soria ve Rossomando, 2018]. Bu çalışmada kullanılan sapma uçuş kontrolü için PID matematiksel ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$U_{\psi}(t) = K_{p_{\psi}} e(t) + K_{i_{\psi}} \int_0^t e(t) dt + K_{d_{\psi}} \frac{de(t)}{dt} \quad (8)$$

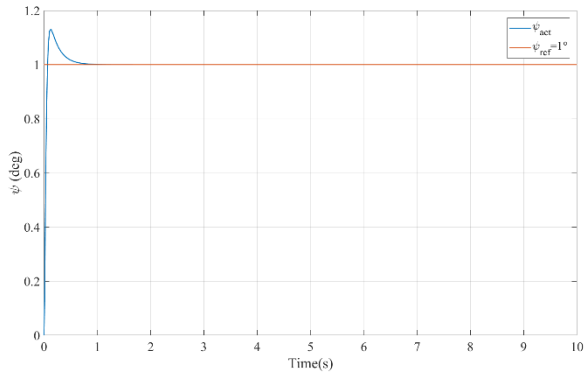
## UYGULAMALAR VE DEĞERLENDİRME

Hexarotor tam modeli ve başkalaşım durumları Şekil 2'de gösterildiği gibi Solidworks programında çizilmiştir. Simülasyonlar ise Matlab/Simulink ortamında durum uzay modeli yaklaşımı kullanılarak yapılmıştır. Simülasyonlarda hexarotor başlangıç durumu ve üç başkalaşım durumu ele alınmıştır. PID katsayıları her uçuş için sabit tutulmuştur. Tablo 2'de PID katsayıları gösterilmiştir.

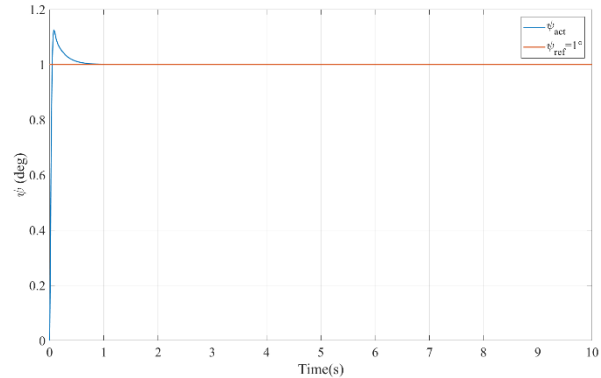
Tablo 2: PID katsayıları

P	I	D
50	1	10

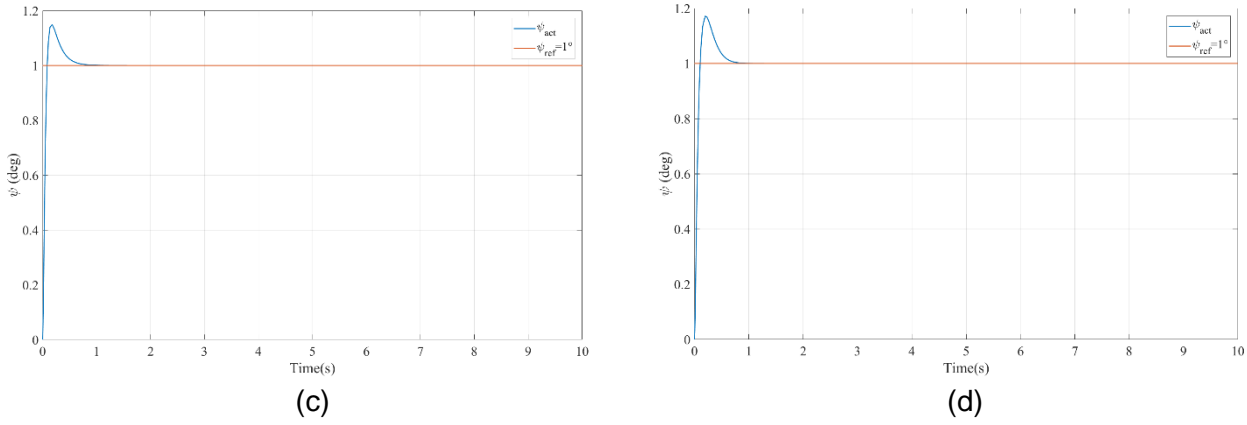
Sapma hareketi için ise  $1^\circ$ 'lik yörünge izlenilmesi hexarotor'dan istenmiştir. İstenilen yörüngeyi hexarotor başarılı bir şekilde izlemiştir. Şekil 3'te simülasyon çıktıları gösterilmiştir.



(a)



(b)



Şekil 3: Simülasyon sonuçları (a) Başlangıç durumu, (b) Başkalaşım 1, (c) Başkalaşım 2, (d) Başkalaşım 3

Hexarotor verilen yörüngeyi başarılı bir şekilde izlemiştir. Ancak burada tasarım performans kriterleri olan yükselme zamanı, yerleşme zamanı ve aşım gibi değerler başkalaşım durumunun hexarotor üzerinde ki etkisini inceleyebilmek için gerekli parametrelerdir. Bu parametreler Matlab/Simulink ortamında PID bloğu vasıtası ile elde edilebilmektedir. Aşağıdaki tabloda tasarım performans kriterleri verilmiştir.

Tablo 3: Tasarım performans kriterleri

	Yükselme Zamanı (saniye)	Yerleşme Zamanı (saniye)	Aşım (%)
Başlangıç Durumu	0.0453	0.468	13.2
Başkalaşım 1	0.0329	0.393	12.6
Başkalaşım 2	0.0584	0.524	15.1
Başkalaşım 3	0.0728	0.571	17.2

## SONUÇ

Bu çalışmada hexarotor tipi İHA'nın başkalaşım durumunda sapma hareketi kontrolü ele alınmıştır. Hexarotor tam modeli Solidworks programında çizilerek simülasyonları Matlab/Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Kontrol algoritması olarak ise PID kontrol kullanılmıştır. Başlangıç durumu ve başkalaşım durumlarında PID katsayıları sabit olarak kabul edilmiştir.

Şekil 3'te simülasyonlar incelendiğinde hexarotor verilen 1°'lik sapma açısını başarılı bir şekilde kontrol etmiş ve yörüngeyi izlemiştir. Ancak burada tasarım performans kriterleri verilen yörüngeye izlenmesi ile ilgili yükselme zamanı, yerleşme zamanı ve aşım gibi değerleri analiz etmek için gereklidir. Tasarım performans kriterleri incelendiğinde başlangıç durumuna göre hexarotor kolları kısaldığı zaman değerlerde düşmeler olduğu görülmektedir. Bu değerler hexarotor'un daha hızlı bir şekilde yörüngeye oturduğunu göstermektedir. Kol uzunlukları artırıldığında ise tasarım performans kriterlerinde yükselmeler gözükmemektedir. Bu yükselmeler ise hexarotor'un daha geç yörüngeye oturduğunu göstermektedir.

Gelecek çalışmalarda ise başkalaşım durumunun ve başkalaşım oranına göre PID katsayılarının belirlenmesi optimizasyon algoritmaları ile gerçekleştirilerek her başkalaşım durumunda hexarotor'un daha hızlı bir şekilde yörüngeye oturtulması hedeflenmektedir.

## Kaynaklar

- Alaimo, A., Artale, V., Milazzo, C., Ricciardello, A., & Trefiletti, L. (2013). Mathematical modeling and control of a hexacopter. *2013 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 1043–1050.
- Arief, U. M., Subiyanto, S., Andrasto, T., Sukamta, S., Sulistyawan, V. N., Sarwono, E., Alfian, A. A., Wicaksono, P., Amelia, P. N., & Putra, A. D. H. (2021). Design of hexacopter UAV system for disinfectant spraying. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 700(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/700/1/012023>

- Bai, Y. (2017). *Control and Simulation of Morphing Quadcopter*. Saint Louis University.
- Bennett, S. (2000). The Past of PID Controllers. *IFAC Proceedings Volumes*, 33(4), 1–11. [https://doi.org/10.1016/s1474-6670\(17\)38214-9](https://doi.org/10.1016/s1474-6670(17)38214-9)
- Njinwoua, B. J., & Wouwer, A. Vande. (2018). Cascade attitude control of a quadcopter in presence of motor asymmetry \*. *IFAC-PapersOnLine*, 51(4), 113–118. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.06.055>
- Oktay, T., & Kose, O. (2019). Non Simultaneous Morphing System Design for Yaw Motion in Quadrotors. *Journal of Aviation*, 3(2), 81–88.
- OKTAY, T., & KOSE, O. (2021). Hexarotor Longitudinal Flight Control with Deep Neural Network, PID Algorithm and Morphing. *European Journal of Science and Technology*, 27, 115–124. <https://doi.org/10.31590/ejosat.946884>
- Soria, C. M., & Rossomando, F. G. (2018). *Identification and adaptive PID Control of a hexacopter UAV based on neural networks*. March 2017, 1–18. <https://doi.org/10.1002/acs.2955>
- Suprpto, B. Y., & Kusumoputro, B. (2017). Optimized neural network-direct inverse control for attitude control of heavy-lift hexacopter. *Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering*, 9(2–5), 103–107.
- T. Oktay and O. Kose. (2020). Simultaneous quadrotor autopilot system and collective morphing system design. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 92(7), 1093–1100. <https://doi.org/10.1108/AEAT-01-2020-0026>