



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



# Bir insansız hava aracı sisteminin tasarımı, benzetimi ve gerçekleştirilmesi<sup>1</sup>

## *Design, simulation and implementation of an unmanned aerial vehicle system*

Yazar(lar) (Author(s)): Elif Ece ELMAS<sup>1</sup>, Mustafa ALKAN<sup>2</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0001-9804-0112

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0002-8503-9697

**To cite to this article:** Elmas E.E., Alkan M., “Bir insansız hava aracı sisteminin tasarımı, benzetimi ve gerçekleştirilmesi”, *Journal of Polytechnic*, 26(2): 929-940, (2023).

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Elmas E.E., Alkan M., “Bir insansız hava aracı sisteminin tasarımı, benzetimi ve gerçekleştirilmesi”, *Politeknik Dergisi*, 26(2): 929-940, (2023).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.1037319

# Bir İnsansız Hava Aracı Sisteminin Tasarımı, Benzetimi ve Gerçekleştirilmesi

## Design, Simulation and Implementation of an Unmanned Aerial Vehicle System

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Bu çalışmada, sıklıkla kullanılan dokuçarların çalışma ilkeleri, hareket denklemleri ve durum değişkenleri incelenmiştir.
- ❖ Dörtuçarın teorik çalışmaları ve performans özelliklerini çıkarmak için “eCalc” programı kullanılmıştır.
- ❖ Bir dörtuçarın planlanan manevra hareketlerine göre benzetim sonuçları incelenmiştir.
- ❖ Bu çalışmada İHA olarak bir dörtuçarın yazılım ve donanım bileşenleri tanıtılmıştır.

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

Çalışmada X(Çarpı) şeklinde bir dörtuçarın e-Calc programı kullanılarak performans özellikleri çıkarılmış bu özelliklere göre sistem için gerekli olan yazılım ve donanım mimarileri kullanılarak dörtuçar gerçekleştirilmiştir.



Şekil. Gerçekleştirilen dörtuçar /Figure. Built quadrotor

### Amaç (Aim)

Bir İHA genel sistemin ve alt sistemleri için gerekli olan donanım ve yazılım mimarileri tasarlanarak uygulamada kullanılacak bir dörtuçarın gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır./ It is aimed to realize a quadcopter to be used in practice by designing the hardware and software architectures required for a UAV general system and its subsystems.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Dörtuçarın donanım ve tasarım ihtiyaçları belirlenirken e-Calc programı kullanılmıştır. Matlab Simulink programı kullanılarak İHA'nın manevra hareketlerinin benzetimi gerçekleştirilmiştir. / The e-Calc program was used to determine the hardware and design needs of the quadrotor. The maneuver movements of the UAV were simulated using the Matlab Simulink program.

### Özgünlük (Originality)

“e-Calc” programı kullanılarak İHA'nın donanım ve tasarım ihtiyaçları belirlenmiştir./ The hardware and design needs of the UAV were determined using the Calc program.

### Bulgular (Findings)

e-Calc programı tasarlanan dörtuçarın benzetim çalışmaları değerlendirildiğinde manevra hareketlerinde meydana gelen ani değişikliklere karşı sistem cevabının çok hızlı olduğu ve değişikliklerin takip edildiği görülmektedir. / Evaluating the simulation studies of the quadcopter designed using the e-Calc program, it is seen that the system's response to sudden changes in maneuvering movements is very fast and the changes are followed.

### Sonuç (Conclusion)

“eCalc” programı kullanılarak tasarlanan İHA ların benzetim testlerinden başarılı sonuçlar elde edilmiştir./ Successful results were obtained from the simulation tests of the UAVs designed using the “eCalc” program.

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Bir İnsansız Hava Aracı Sisteminin Tasarımı, Benzetimi ve Gerçekleştirilmesi<sup>1</sup>

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Elif Ece ELMAS\*, Mustafa ALKAN**

Teknoloji Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 16.12.2021 ; Kabul/Accepted : 07.04.2022 ; Erken Görünüm/Early View : 27.06.2022)

## ÖZ

Teknolojide elde edilen gelişmelerle birlikte İnsansız Hava Aracı (İHA) sistemlerinin kullanım alanları yaygınlaşmakta ve çeşitlenmektedir. Günümüzde İHA'lar uzaktan algılama, fotogrametri, trafik denetimi ve büyük tesislerin gözetimi gibi birçok farklı amaçla kullanılmaktadırlar. Bu çalışmada, İHA olarak bir dörтуçar gerçekleştirilmiştir. Bu dörтуçarın teorik çalışmaları ve performans özelliklerini çıkarmak için "eCalc" programı kullanılmıştır. eCalc'te tasarım süreci ve benzetim işlemleri etkileşimli olup, mümkün olduğunca gerçek elemanların özelliklerinin kullanıldığı gerçeğe çok yakın ortamlar oluşturulabilmektedir. eCalc ile elde edilen sonuçlar MATLAB uygulamalarından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak, bir İHA genel sistemi ve alt sistemleri için gerekli olan donanım ve yazılım mimarileri tasarlanarak uygulamada kullanılacak dörтуçar gerçekleştirilmiştir. Yer kontrol istasyonu, olarak Mission Planner kullanılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** İnsansız hava aracı, dörтуçar, multikopter, dörтуçar, quadkopter.

# Design, Simulation and Implementation of an Unmanned Aerial Vehicle System

## ABSTRACT

With the developments in technology, the usage areas of Unmanned Air Vehicle (UAV) systems become widespread and diversify. Nowadays, UAVs are used for many different purposes such as remote sensing, photogrammetry, traffic control and monitoring of large facilities. In this work, a quadcopter was built as UAV. The eCalc program was used to extract the performance characteristics of this quadcopter. eCalc's design process and simulation processes are interactive. With the eCalc, the real elements can be created which are very close to the reality. The results obtained with eCalc were compared with the results obtained from MATLAB applications, and the hardware and software architectures required for an UAV general system and subsystems were designed and the quadcopter to be used in practice was realized. Mission Planner was used as a ground control station.

**Keywords:** Unmanned aerial vehicle, multicopter, quadcopter.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Teknolojide elde edilen gelişmelerle birlikte İnsansız Hava Aracı (İHA) sistemlerinin kullanım alanları yaygınlaşmakta ve çeşitlenmektedir. 20. Yüzyılın başlarından beri kullanılan İHA'lar, iki binli yılların başlarından günümüze dek hızla yayılmış, sistemlerin sayısı ve çeşitleri artmış günlük hayatta kullanım alanı genişlemiştir.

İHA'ların bugün kat ettiği gelişmeler Archibald Montgomery Low, Elmer Ambrose Sperry, Peter Cooper Hewitt'in 1.Dünya savaşı öncesi ve sırasındaki çalışmalarına dayanmaktadır [1].

İHA'ların kullanım alanlarına örnek olarak; uzaktan algılama, istihbarat ve güvenlik amaçlı kullanım, kıyı ve sahil şeridinin gözlenmesi, haritacılık, arama/kurtarma

çalışmaları, çevresel gözlemler, kirlilik tespiti, hava durumu izleme, yangın izleme, tarımsal uygulamalar, kentsel dönüşüm çalışmaları, doğal afetlerin izlenmesi, arkeolojik çalışmalar gibi alanlar sayılabilir.

Bu sistemler için Drone, İHA, İHA Sistemi, Uzaktan Kontrol Edilen Hava Aracı gibi farklı adlandırılmalar yapılmaktadır.

Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü, İnsansız Hava Aracı Sistemleri Talimatı (SHT-İHA)'da [2] İHA Sistemi, "İHA ile kontrol istasyonu, komuta ve kontrol veri bağı, kalkış ve iniş sistemi gibi uçuşun sağlanması için gerekli olan, birbirinden ayrı sistem elemanlarının bütünü olarak tanımlanmaktadır" şeklinde tarif edilmektedir.

Savunma Sanayi Başkanlığı (SSB) Yol Haritasında ise İHA Sistemi [3], "hava aracı, görev sistemleri, yer

<sup>1</sup> Bu çalışma, Gazi Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Programı kapsamında, "Bir İnsansız Hava Aracı Gerçekleştirme ve Hareketli Nesnelere Tespit ve Takibinde Kullanımı" başlıklı yüksek lisans tezinden düzenlenmiştir.

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : eelmas@kko.msu.edu.tr

sistemleri ve hava-yer tümleşik sistemlerinin bileşiminden oluşan ve görevin icrasına yönelik gerekli tüm bileşenleri kapsayan sistem olarak tanımlanmaktadır” şeklinde ifade edilmiştir. Bir başka tanımda ise İHA sistemleri, “Kendisini kullanan operatörü taşımayan, aerodinamik kuvvetlerin kullanılmasıyla kaldırma kuvveti oluşturan, otonom uçabilen veya uzaktan kumanda edilen, faydalı yük taşıyabilen motorlu hava aracı” olarak ifade edilmektedir.

Multicopter, multirotor veya drone diye adlandırılan ‘çokluuçar’ ya da ‘dikuçar’lar son zamanlarda gitgide artan şekilde ilgi çekmektedirler. Dikuçarlar, helikopterlerdeki ana rotor/lar (döner kanatlar) ve bir kuyruk rotoru yerine çok pervane ile kaldırma kuvveti sağlayarak dikine iniş kalkış yapabilen, üç eksenle hareket yeteneğine sahip uçan hava araçlarıdır.

İHA ların modellenmesi, kullanılan motor ve pervane performans özelliklerinin kestirilmesi ve değerlendirilmesi önem arz etmektedir. Bayraktar vd., bir quadrotörün dinamik modellenmesi ile itme ve tork katsayılarının optimizasyonu ve simülasyonu üzerine çalışma yapmışlardır [4]. Özçınar vd. tepki kuvveti gözetleyici yöntemini baz alarak sisteme etkileyen dış kuvvetlerin kestirimi ile sensör kullanmaksızın tork kontrolünün uygulanmasına olanak sağlayan bir çalışma gerçekleştirmiştir [5]. Gürgöze vd., DC motorlu sistemlerde arzu edilen hareketin yapılabilmesi için DC motor parametrelerinin elde edilmesine yönelik bir deneysel çalışma ile sonucunda bulunan parametrelerin bir dc motor Simulink modeli üzerinden çıkış alındığı çalışma yapmışlardır [6].

Bu çalışmada İHA olarak bir dörtuçar (Quadcopter) seçilmiştir. Bu dörtuçarın teorik çalışmaları ve performans özellikleri çıkarılmıştır. Daha sonra, bir İHA genel sistemi ve alt sistemleri için gerekli olan donanım ve yazılım mimarileri tasarlanarak uygulamada kullanılacak bir dörtuçar gerçekleştirilmiştir.

## 2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

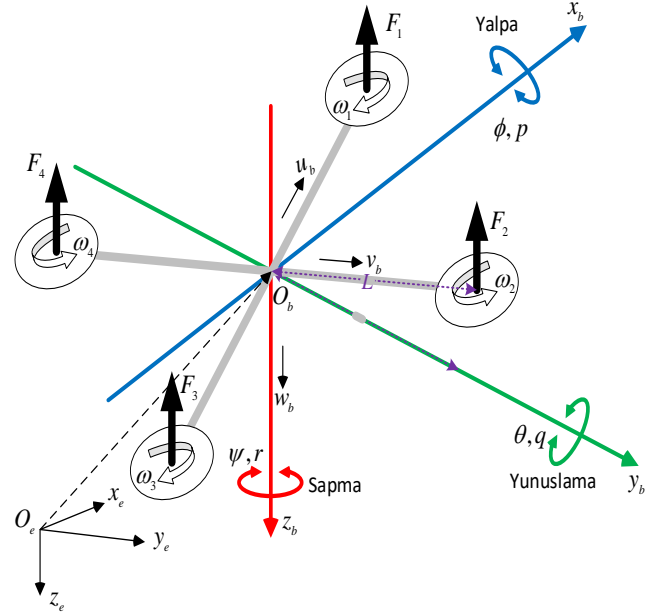
Bu çalışmada, katı (rigid) bir gövde üzerinde dört rotor bulunan bir dörtuçarın modeli için hareket denklemleri üzerinde durulmuştur. Hareketli eksenleri özümsemeye yönelik çalışmalar yapılmıştır. Ardından, tanımlanan bu eksen takımları arasındaki ilişki matematiksel olarak gösterilerek ve Newton’un genelleştirilmiş ikinci yasasından yararlanılarak serbestlik açılarıyla ilişkili eşitlikler elde edilmiştir.

Bu bölümde çalışmada kullanılan dörtuçar modeli ve hareket denklemleri ile birlikte altıuçar ve sekizuçar gibi farklı multirotor model ve hareket denklemleri de gösterilmiştir.

Dikuçarların matematiksel denklemleri (Mathematical equations of drones) kapsamında bu bölümde Newton’un hareket denklemlerinden faydalanılarak, bir dörtuçarın

matematiksel model çıkartılmıştır. Dörtuçarın yapısı Şekil 1.’de gösterilmiştir. Şekil 1. üzerinde motorlar tarafından üretilen itki kuvvetleri, gövde üzerindeki koordinat sistemi  $O_b$  ve dünya üzerindeki sabit koordinat sistemi  $O_e$  gösterilmiştir.

Sistemin dinamik davranışlarının belirlenmesi kontrol teorisinde sistem durum değişkenlerine göre yapılmaktadır.



Şekil 1. Dörtuçarın itki kuvvetleri ve kullanılan koordinat eksen takımları (Figure 1 Thrust forces of drones and coordinate axis)

Dörtuçarın dönüş hareketleri için  $O_b$  hareketli eksen takımı üzerinde üçü Euler açısı üçü dörtuçarın açısal hızlarını tanımlayan altı durum değişkeni bulunmaktadır. Euler açıları:

$$\begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Yalpa açısı} \\ \text{Yunuslama açısı} \\ \text{Sapma açısı} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Dörtuçarın açısal hızlarını tanımlayan:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Yalpa hızı} \\ \text{Yunuslama hızı} \\ \text{Sapma hızı} \end{bmatrix} \quad (2)$$

değişkenleridir.  $O_b$  hareketli eksen takımının,  $O_e$  sabit eksen takımına göre çizgisel hareketlerinin belirlenmesi amacıyla altı durum değişkeni kullanılır. Dörtuçarın ağırlık merkezinin çizgisel hızı;

$$\begin{bmatrix} u_b \\ v_b \\ w_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Boylamsal hız} \\ \text{Enlemsel hız} \\ \text{Dikey hız} \end{bmatrix} \quad (3)$$

dikuçarın konumu;

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Boylam konumu} \\ \text{Enlem konumu} \\ \text{Yükseklik} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Yerkürenin üzerindeki sabit koordinat eksen takımına göre belirlenmiştir. Her iki eksen takımı üzerinde toplam on iki durum değişkeni belirlenmiştir.

#### Pervanelerin itki kuvveti ve momenti (Propulsion and moment of propellers)

Dik uçarları uçurmak için itki kuvvetine gereksinim duyulur. İtki kuvveti pervanenin güç ve açısal hızına bağlıdır. Momentum teorisine göre, dokuçarlarda güç, itki kuvveti ile hava hızının çarpımına eşittir. Motorun belirli bir süre içinde harcadığı enerji, pervanelerin ürettiği kuvvet ile yer değiştiren havanın hareket ettiği mesafenin çarpımına eşit olduğundan,  $i$ . pervane için;

$$P_i \cdot dt = F_i \cdot dx \quad (5)$$

eşitliği yazılabilir.  $P_i$  eşitliğin bir tarafında tek bırakılırsa;

$$P_i = F_i \frac{dx}{dt} \quad (6)$$

elde edilir. Eğer dokuçar havada asılı duruyorsa, bu durumda aracın hızı  $v$ , sifira eşit olduğundan eşitlik;

$$P_i = F_i v \quad (7)$$

olacaktır. Burada  $v$  hava akış hızıdır.  $v$  eşitliğin bir tarafında tek bırakılırsa ;

$$v = \sqrt{\frac{F_i}{2\rho A}} \quad (8)$$

elde edilir. Burada,  $A$  pervanenin süpürdüğü alanı,  $\rho$  ise çevresindeki havanın yoğunluğudur. Basitleştirilmiş güç denklemini kullanarak,

$$P_i = \frac{K_v}{K_t} \tau \omega = \frac{K_v K_t}{K_t} F_i \omega = \frac{F_i^2}{\sqrt{2\rho A}} \quad (9)$$

Burada  $F_i$  itki kuvvetini göstermektedir.  $F_i$  eşitliğin bir tarafına toplanırsa;

$$F_i = \left( \frac{K_v K_t \sqrt{2\rho A}}{K_t} \omega \right)^2 = k \omega^2 \quad (10)$$

elde edilir. Burada  $k$  pervane aerodinamik itki katsayısı olmak üzere, itki kuvveti  $F_i$ , motorun açısal hızının  $\omega$  karesi ile orantılı olduğu görülmektedir. Bir dörüçar için bu durumda tüm motorların itki kuvvetlerin toplamı  $F_B$  hareketli eksen takımı  $O_b$ 'ye göre;

$$F_B = \sum_{i=1}^4 F_i = k \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \sum \omega_1^2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

olacaktır.

$Z$  eksenini doğrultusunda, bütün motorların ürettikleri momentlerin pervaneleri döndürmesi sonucunda dokuçarlar yerçekimini ve sürtünme kuvvetlerini yenerek havalanmaktadırlar. Pala elemanı teorisine göre, sürüklenme kuvveti (Drag force)  $F_D$ , akış dinamiğinin sürüklenme denklemi ile elde edilebilir [7];

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D A v^2 \quad (12)$$

Burada,  $A$  pervanenin süpürdüğü alanı,  $\rho$  pervane çevresindeki havanın yoğunluğunu,  $C_D$  sabit bir katsayı,  $v$  hava akış hızını göstermektedir. Bu nedenle  $i$ .ci motorun sürüklenme (drag) momenti,

$$M_i = \frac{1}{2} R \rho C_D A v^2 = \frac{1}{2} R \rho C_D A (\omega R)^2 = b \omega^2 \quad (13)$$

ve  $i$ .ci motorun momenti  $\tau_i$ ;

$$\tau_i = b \omega^2 \quad (14)$$

ile ifade edilebilir. Denklemlerde görüldüğü gibi sürüklenme ve motor momenti aynı değerleri alır fakat yönü terstir. Burada  $b$  sürüklenme katsayısı,  $R$  pervanenin yarıçapı ve  $\omega$  pervanenin açısal hızıdır. Şekil 2.'de motorların toplam momenti, sürüklenme momenti ve itki kuvvetinin hıza göre değişimi gösterilmiştir.

Motor için  $z$  eksenindeki momentin denklemi;

$$\tau_z = b \omega^2 + I_{zz} \dot{\omega} \quad (15)$$

bulunur.

Burada,  $\dot{\omega}$  pervanenin açısal ivmesini,  $I_{zz}$  ise motor  $z$ -ekseni etrafındaki atalet momentini göstermektedir. Eğer dokuçar sabit bir hızla uçuyorsa bu durumda  $\dot{\omega} = 0$  olacak ve  $z$  eksenindeki momentin denklemi;

$$\tau_z = (-1)^{i+1} b \omega_1^2 \quad (16)$$

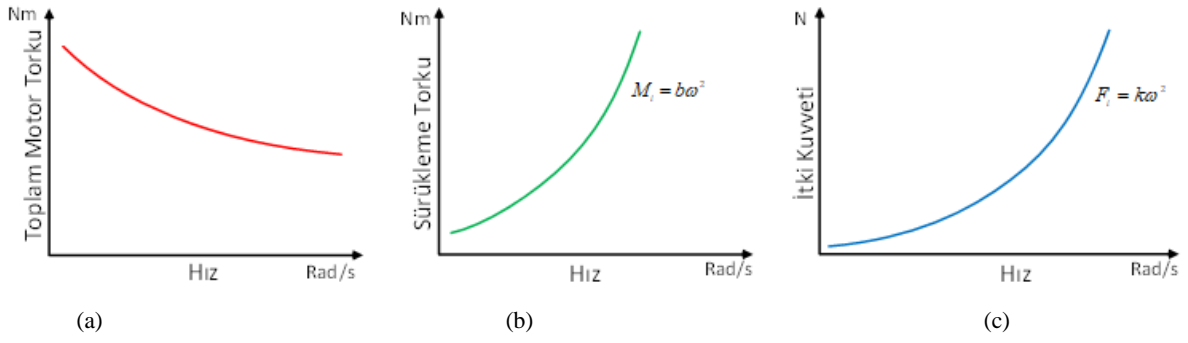
olarak sadeleştirilebilecektir. Pervanenin dönüşüne bağlı olarak, saat yönünde veya saatin ters yönünde döndüğünden,  $(-1)^{i+1}$  terimi sırasıyla pozitif veya negatif olacaktır. Böylece, bir dörüçarda  $\psi$  açısıyla yapılan sapma hareketi için her pervanenin ürettiği momentlerin toplamı;

$$\tau_\psi = b (\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) \quad (17)$$

elde edilir. Aynı şekilde  $\phi$  açısıyla yapılan yalpa ve  $\theta$  açısıyla yapılan yunuslama hareketleri için toplam momentler;

$$\tau_\phi = L k (\omega_1^2 - \omega_3^2) \quad (18)$$

$$\tau_\theta = L k (\omega_2^2 - \omega_4^2) \quad (19)$$



**Şekil 2.** a) Toplam motor momenti b) Sürüklenme momenti c) İtki kuvvetinin hıza göre değişimleri (Figure 2 a) Total motor torque b) Drag torque c) Variations of thrust according to speed)

ile hesaplanabilmektedir.  $L$  herhangi bir pervane ile dörtuçarın merkezinin arasındaki mesafeyi göstermektedir. Bu durumda artı sınıfı bir dörtuçar için toplam moment hareketli eksen takımı  $O_b$ 'ye göre matrisel formda;

$$\tau_B = \begin{bmatrix} Lk(\omega_1^2 - \omega_3^2) \\ Lk(\omega_2^2 - \omega_4^2) \\ b(\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) \end{bmatrix} \quad (20)$$

şeklinde yazılabilir. Burada moment vektörü bileşenleri  $[\tau_\phi, \tau_\theta, \tau_\psi]$  olarak verilmiştir. Pervanelerin ürettiği itki kuvvetlerine göre, üç eksenli momentler tanımlanmıştır.

### 2.1 Yerçekimi ivmesi (Gravity acceleration)

Yerçekimi ivmesi dıkuçarın gövdesinin ağırlık merkezi üzerinde etkimektedir.  $O_e$  sabit eksen takımında yerçekimi kuvveti;

$$F_e = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ m \cdot g \end{bmatrix} \quad (21)$$

ile ifade edilen sabit bir vektördür. Bu vektörü dönüşüm matrisi  $R_e^b$ 'yi kullanarak  $O_b$  eksenine dönüştürürsek;

$$F_b = R_e^b \cdot F_e \quad (22)$$

$$F_b = \begin{bmatrix} -m \cdot g \cdot \sin\theta \\ m \cdot g \cdot \sin\phi \cdot \cos\theta \\ m \cdot g \cdot \cos\phi \cdot \cos\theta \end{bmatrix} \quad (23)$$

olacaktır.

### 2.2 Kararlı devinim etkisi (Stable motion effect)

Dıkuçarların kendi merkezi etrafında dönmesi sonucu oluşan açısal hız ve her motorun/pervanenin kendi eksenleri etrafında dönmesi sonucu oluşan açısal hızdan dolayı oluşan kararlı devinim etkisi (Gyroscopic Effect) devinim momenti üretmektedir. Üretilen bu moment,  $O_b$  eksen takımına sabitlenmiştir.

Artı sınıfı bir dörtuçar için toplam devinim momenti  $\tau_{bdevinim}$ ;

$$\tau_{bdevinim} = \sum_{i=1}^n J_T \cdot \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \mp \omega_i \end{bmatrix} \quad (24)$$

ile hesaplanır. Burada,  $n$  toplam motor sayısı,  $\omega_i$   $i$ . motorunun hızını,  $J_T$  bir motorun ve pervanenin kendi dönme eksenlerinde oluşturdukları toplam atalet momentini göstermektedir.  $i$ . Motorun açısal hızı  $\omega_i$ , döndürme yönüne bağlı olarak pozitif veya negatiftir. Her bir motor için açısal hız vektörleri saat yönünde dönüş için pozitif, aksi yönde dönüş için negatif değer almaktadır.

### Açısal moment ve atalet matrisi (Angular moment and inertia matrix)

Dıkuçarlarda doğrusal hareket;

$$m\ddot{x} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -mg \end{bmatrix} + R_e^b F_B + F_D \quad (25)$$

ile ifade edilmektedir. Burada hareketli eksene göre  $F_D$  sürüklenme ve  $F_B$  itki kuvvetleridir.  $R_e^b$  dönüşüm matrisi,  $g$  yerçekimi ivmesini ve  $\vec{x}$  dıkuçarın konumunu göstermektedir.

Dıkuçar için Euler denklemleri kullanılarak açısal denklemler vektör formunda yazılır;

$$\tau = I\dot{\omega} + \omega \times (I\omega) \quad (26)$$

elde edilir. Düzenleme yapılırsa eşitlik;

$$\dot{\omega} = \begin{bmatrix} \dot{\omega}_x \\ \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_z \end{bmatrix} = I^{-1}(\tau - \omega \times (I\omega)) \quad (27)$$

şeklini alır. Bağlı ataletler ihmal edilip sadece temel eksenler üzerindeki hareketler dikkate alınır, dıkuçarın



atalet momenti  $I$ , köşegen (diyagonal) bir matris olacaktır.

$$I = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (28)$$

Dolayısıyla, hareketli eksen takımı için dokuçarın momentlerine göre açısal hızlarını tanımlayan dönüş hareket denklemi;

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}_x \\ \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_\phi / I_{xx} \\ \tau_\theta / I_{yy} \\ \tau_\psi / I_{zz} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{I_{yy} - I_{zz}}{I_{xx}} \omega_y \omega_z \\ \frac{I_{zz} - I_{xx}}{I_{yy}} \omega_x \omega_z \\ \frac{I_{xx} - I_{yy}}{I_{zz}} \omega_x \omega_y \end{bmatrix} \quad (29)$$

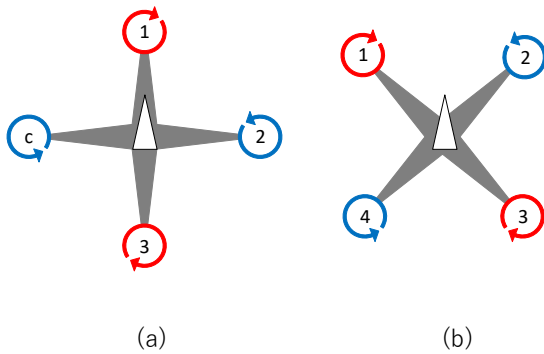
elde edilir.

### 2.3 Dokuçar yapıları (Drone Structures)

Dokuçarlar, kullanılan motor ya da pervane sayısına ve bunların düzenlenme şekillerine göre adlandırılırlar. Dokuçarlarda, artı (+), çapraz (x) ve H şekillerinde simetrik olarak düzenlenmiş 3, 4, 6 ve 8'li motor ve pervaneler kullanılmaktadır [8]. Değişken açılı pervanelere ya da fan tipi pervanelere sahip çeşitleri de bulunmaktadır.

#### 2.3.1 Dörtüçar yapıları (Quadrotor structures)

Dörtüçarlar, artı, çapraz ve H şekillerinde düzenlenmiş kollara yerleştirilmiş dört motor ve komşularına göre ters yöne dönen dört pervaneden oluşmaktadır. Daha kolay denetlenmesi ve daha fazla hızlanma özellikleri nedeniyle genellikle çapraz sınıfı yapılar tercih edilmektedir [8]. Şekil 3.'de artı ve çapraz sınıfı dörtüçar yapıları görülmektedir.



Şekil 3. a) Artı sınıfı b) çapraz sınıfı dörtüçar yapıları (Figure 3 Structure of a) + configured b) x configured quadrotor)

#### Artı Sınıfı Dörtüçarlarda Kuvvet ve Moment denklemleri (Force and torque equations in + configured quadrotor)

Artı sınıfı dörtüçarda hareketli eksene etkiyen yerçekimi:

$$F_b = \begin{bmatrix} -m \cdot g \cdot \sin\theta \\ m \cdot g \cdot \sin\phi \cdot \cos\theta \\ m \cdot g \cdot \cos\phi \cdot \cos\theta \end{bmatrix} \quad (30)$$

Motorların toplam itki kuvveti:

$$F_B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b(\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) \end{bmatrix} \quad (31)$$

Motorların itki kuvveti ve pervanelerin sürüklediği havanın  $z_e$  eksenine doğrultusunda ürettikleri moment:

$$\tau_B = \begin{bmatrix} L k (\omega_1^2 - \omega_3^2) \\ L k (\omega_2^2 - \omega_4^2) \\ b (\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) \end{bmatrix} \quad (32)$$

Kararlı devinim etkisi:

$$\tau_{bdevinim} = J_T \begin{bmatrix} q(\omega_1 - \omega_2 + \omega_3 - \omega_4) \\ p(-\omega_1 + \omega_2 - \omega_3 + \omega_4) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (33)$$

*Çapraz Sınıfı Dörtüçarlarda Kuvvet ve Moment (Force and torque equations in x configured quadrotor)*

Çapraz sınıfı dörtüçarlarda hareketli eksene etkiyen yerçekimi:

$$F_b = \begin{bmatrix} -m \cdot g \cdot \sin\theta \\ m \cdot g \cdot \sin\phi \cdot \cos\theta \\ m \cdot g \cdot \cos\phi \cdot \cos\theta \end{bmatrix} \quad (34)$$

Motorların toplam itki kuvveti:

$$F_B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b(\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2) \end{bmatrix} \quad (35)$$

Motorların itki kuvveti ve pervanelerin sürüklediği havanın  $z_e$  eksenine doğrultusunda ürettikleri moment:

$$\tau_B = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} L k (\omega_1^2 - \omega_2^2 - \omega_3^2 + \omega_4^2) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} L k (\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) \\ b (-\omega_1^2 + \omega_2^2 - \omega_3^2 + \omega_4^2) \end{bmatrix} \quad (36)$$

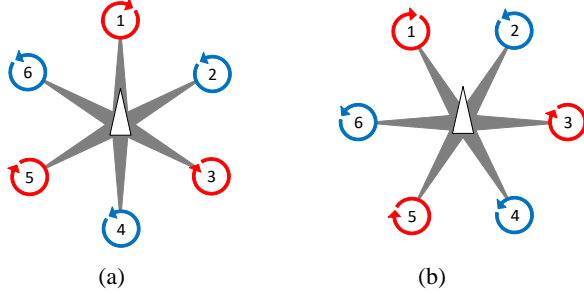
Kararlı devinim etkisi:

$$\tau_{bdevinim} = J_T \begin{bmatrix} q(\omega_1 - \omega_2 + \omega_3 - \omega_4) \\ p(-\omega_1 + \omega_2 - \omega_3 + \omega_4) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (37)$$

#### 2.3.2 Altıçar yapıları (Hexarotor structures)

Altıçarlar, çapraz, artı ve H şekillerinde düzenlenmiş kollara yerleştirilmiş altı motor ve komşularına göre ters yöne dönen altı pervaneden oluşmaktadır. Altıçarlar, dörtüçarlara çok benzemekle birlikte daha fazla motor ve pervane kullanıldığından yapıları daha büyüktür ve daha

fazla yük kaldıracabilmektedirler. Bu dikeçerler, motorun birisinde ya da ikisinde bir arıza oluştuğu zaman güvenli bir şekilde iniş yapabildikleri için dörtuçarlarla göre daha güvenli uçuş sağlayabilmektedirler. Şekil 4.'de artı ve çapraz sınıfı altıuçar yapıları görülmektedir.



Şekil 4. a) Artı sınıfı b) çapraz sınıfı altıuçar yapıları (Figure 4 Structure of a) + configured b) x configured hexarotor)

#### Artı Sınıfı Altıuçarlar Kuvvet ve Moment (Force and torque equations in + configured hexarotor)

Artı sınıfı bir altıuçar hareketli eksene etkileyen yerçekimi:

$$F_b = \begin{bmatrix} -m \cdot g \cdot \sin\theta \\ m \cdot g \cdot \sin\phi \cdot \cos\theta \\ m \cdot g \cdot \cos\phi \cdot \cos\theta \end{bmatrix} \quad (38)$$

Motorların toplam itki kuvveti:

$$F_B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -b (\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2 + \omega_5^2 + \omega_6^2) \end{bmatrix} \quad (39)$$

Motorların itki kuvveti ve pervanelerin sürüklediği havanın  $Z_e$  ekseni doğrultusunda ürettikleri moment:

$$\tau_B = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} L k (-\omega_2^2 - \omega_3^2 + \omega_5^2 + \omega_6^2) \\ \frac{1}{2} L k (2\omega_1^2 + \omega_2^2 - \omega_3^2 - 2\omega_4^2 - \omega_5^2 + \omega_6^2) \\ -b (-\omega_1^2 + \omega_2^2 - \omega_3^2 + \omega_4^2 - \omega_5^2 + \omega_6^2) \end{bmatrix} \quad (40)$$

Kararlı devinim etkisi:

$$\tau_{b_{devinim}} = J_T \begin{bmatrix} q(\omega_1 - \omega_2 + \omega_3 - \omega_4 + \omega_5 - \omega_6) \\ p(-\omega_1 + \omega_2 - \omega_3 + \omega_4 - \omega_5 + \omega_6) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (41)$$

#### Çapraz Sınıfı Altıuçarlar Kuvvet ve Moment (Force and torque equations in x configured hexarotor)

Çapraz sınıfı bir altıuçar hareketli eksene etkileyen yerçekimi:

$$F_b = \begin{bmatrix} -m \cdot g \cdot \sin\theta \\ m \cdot g \cdot \sin\phi \cdot \cos\theta \\ m \cdot g \cdot \cos\phi \cdot \cos\theta \end{bmatrix} \quad (42)$$

Motorların toplam itki kuvveti:

$$F_B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -b (\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2 + \omega_5^2 + \omega_6^2) \end{bmatrix} \quad (43)$$

Motorların itki kuvveti ve pervanelerin sürüklediği

havanın  $Z_e$  ekseni doğrultusunda ürettikleri moment:

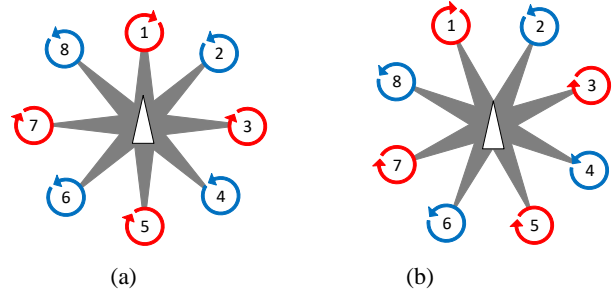
$$\tau_B = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} L k (\omega_1^2 - \omega_2^2 - 2\omega_3^2 - 2\omega_4^2 + \omega_5^2 + 2\omega_6^2) \\ \frac{\sqrt{3}}{2} L k (\omega_1^2 + \omega_2^2 - 2\omega_4^2 - \omega_5^2) \\ b (-\omega_1^2 + \omega_2^2 - \omega_3^2 + \omega_4^2 - \omega_5^2 + \omega_6^2) \end{bmatrix} \quad (44)$$

Kararlı devinim etkisi:

$$\tau_{b_{devinim}} = J_T \begin{bmatrix} q(\omega_1 - \omega_2 + \omega_3 - \omega_4 + \omega_5 - \omega_6) \\ p(-\omega_1 + \omega_2 - \omega_3 + \omega_4 - \omega_5 + \omega_6) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (45)$$

#### 2.3.3 Sekizuçar yapıları (Octorotor structures)

Sekizuçarlar, çapraz, artı ve H şekillerinde düzenlenmiş sıralı ve çiftli kollara yerleştirilmiş sekiz motor ve komşularına göre ters yöne dönen sekiz pervaneden oluşmaktadır. Sekizuçarlar, altıuçarlar ve dörtuçarlar çok benzemekle onlara göre daha fazla yük kaldıracabilmektedirler. Sekiz uçarlar, motorun birisinde ya da ikisinde bir arıza oluştuğu zaman güvenli bir şekilde iniş yapabildikleri için dörtuçarlar veya altıuçarlar göre daha güvenli uçuş sağlayabilmektedirler. Şekil 5.'de artı ve çapraz sınıfı sekizuçar yapıları görülmektedir.



Şekil 5. a) Artı sınıfı b) çapraz sınıfı sekizuçar yapıları (Figure 5 Structure of a) + configured b) x configured octorotor)

#### Artı Sınıfı Sekizuçarlar Kuvvet ve Moment (Force and torque equations in + configured octorotor)

Artı sınıfı bir sekizuçar hareketli eksene etkileyen yerçekimi:

$$F_b = \begin{bmatrix} -m \cdot g \cdot \sin\theta \\ m \cdot g \cdot \sin\phi \cdot \cos\theta \\ m \cdot g \cdot \cos\phi \cdot \cos\theta \end{bmatrix} \quad (46)$$

Motorların toplam itki kuvveti:

$$F_B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -b (\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2 + \omega_5^2 + \omega_6^2 + \omega_7^2 + \omega_8^2) \end{bmatrix} \quad (47)$$



Motorların itki kuvveti ve pervanelerin sürüklediği havanın  $Z_e$  eksenine doğrultusunda ürettikleri moment:

$$\tau_B = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} L k (-\omega_2^2 - \sqrt{2}\omega_3^2 - \omega_4^2 + \omega_6^2 + \sqrt{2}\omega_7^2 + \omega_8^2) \\ \frac{1}{2} L k (\sqrt{2}\omega_1^2 + \omega_2^2 - \omega_4^2 - \sqrt{2}\omega_5^2 - \omega_6^2 + \omega_8^2) \\ b (-\omega_1^2 + \omega_2^2 - \omega_3^2 + \omega_4^2 - \omega_5^2 + \omega_6^2 - \omega_7^2 + \omega_8^2) \end{bmatrix} \quad (48)$$

Kararlı devinim etkisi:

$$\tau_{b_{devinim}} = J_T \begin{bmatrix} q(\omega_1 - \omega_2 + \omega_3 - \omega_4 + \omega_5 - \omega_6 + \omega_7 - \omega_8) \\ p(-\omega_1 + \omega_2 - \omega_3 + \omega_4 - \omega_5 + \omega_6 - \omega_7 + \omega_8) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (49)$$

Çapraz Sınıfı Sekizuçarlarda Kuvvet ve Moment (Force and torque equations in x configured octorotor)

Çapraz sınıfı bir sekizuçarda hareketli eksene etkiyen yerçekimi:

$$F_b = \begin{bmatrix} -m \cdot g \cdot \sin\theta \\ m \cdot g \cdot \sin\phi \cos\theta \\ m \cdot g \cdot \cos\phi \cdot \cos\theta \end{bmatrix} \quad (50)$$

Motorların toplam itki kuvveti:

$$F_B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -b (\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2 + \omega_5^2 + \omega_6^2 + \omega_7^2 + \omega_8^2) \end{bmatrix} \quad (51)$$

Motorların itki kuvveti ve pervanelerin sürüklediği havanın  $Z_e$  eksenine doğrultusunda ürettikleri moment:

$$\tau_B = \begin{bmatrix} L k [\vartheta(\omega_1^2 - \omega_2^2 - \omega_5^2 + \omega_6^2) + \delta(-\omega_3^2 - \omega_4^2 + \omega_7^2 + \omega_8^2)] \\ L k [\vartheta(\omega_3^2 - \omega_4^2 - \omega_7^2 + \omega_8^2) + \delta(\omega_1^2 + \omega_2^2 - \omega_5^2 - \omega_6^2)] \\ b (-\omega_1^2 + \omega_2^2 - \omega_3^2 + \omega_4^2 - \omega_5^2 + \omega_6^2 - \omega_7^2 + \omega_8^2) \end{bmatrix} \quad (52)$$

$$\vartheta=0,382683 \text{ ve } \delta=0,923880$$

Kararlı devinim etkisi:

$$\tau_{b_{devinim}} = J_T \begin{bmatrix} q(\omega_1 - \omega_2 + \omega_3 - \omega_4 + \omega_5 - \omega_6 + \omega_7 - \omega_8) \\ p(-\omega_1 + \omega_2 - \omega_3 + \omega_4 - \omega_5 + \omega_6 - \omega_7 + \omega_8) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (53)$$

## 2.4 Dikuçarların Denetimi (Control of Drones)

Denetim için önemli olan denklemler aşağıda özetlenmiştir [9-16]. İlk denklem seti dikuçarın temel hareket komutlarına göre nasıl hızlandığını göstermektedir.

$$\ddot{X} = (\sin\psi \sin\phi + \cos\psi \sin\theta \cos\phi) \frac{U_1}{m} \quad (54)$$

$$\ddot{Y} = (-\cos\psi \sin\phi + \sin\psi \sin\theta \cos\phi) \frac{U_1}{m} \quad (55)$$

$$\ddot{Z} = -g + (\cos\theta \cos\phi) \frac{U_1}{m} \quad (56)$$

$$\dot{p} = \frac{I_{yy} - I_{zz}}{I_{xx}} q r - \frac{J_{TP}}{I_{xx}} q \omega + \frac{U_2}{I_{xx}} \quad (57)$$

$$\dot{q} = \frac{I_{zz} - I_{xx}}{I_{yy}} p r + \frac{J_{TP}}{I_{yy}} p \omega + \frac{U_3}{I_{yy}} \quad (58)$$

$$\dot{r} = \frac{I_{xx} - I_{yy}}{I_{zz}} p q + \frac{U_4}{I_{zz}} \quad (59)$$

İkinci denklem seti pervanelerin hızlarının temel hareketlerle ilişkisini göstermektedir.

$$U_1 = b (\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2) \quad (60)$$

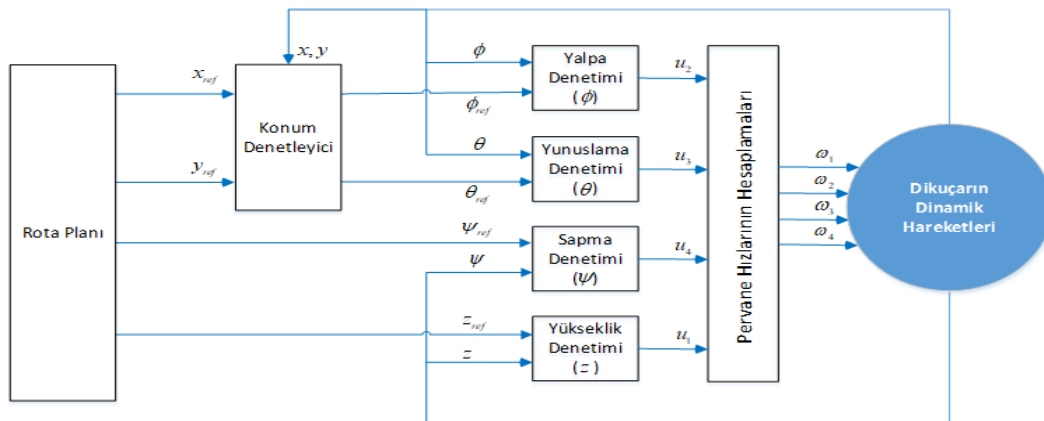
$$U_2 = L b (-\omega_2^2 + \omega_4^2) \quad (61)$$

$$U_3 = L b (-\omega_1^2 + \omega_3^2) \quad (62)$$

$$U_4 = k (-\omega_1^2 + \omega_2^2 - \omega_3^2 + \omega_4^2) \quad (63)$$

$$\omega = -\omega_1 + \omega_2 - \omega_3 + \omega_4 \quad (64)$$

Bu denklemlerden dikuçarın dinamik hareketlerinin motor hızlarıyla değiştiği açıkça görülmektedir.



Şekil 6. Bir çapraz sınıfı dörtuçarın denetim çevrimi (Figure 6 Control cycle of a crossed x configured quadrotor)

Pervane hızları durum uzayı formunda yazılırsa;

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b & b & b & b \\ 0 & -Lb & 0 & Lb \\ -Lb & 0 & LB & 0 \\ -k & k & -k & k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1^2 \\ \omega_2^2 \\ \omega_3^2 \\ \omega_4^2 \end{bmatrix} \quad (65)$$

elde edilir.

Şekil 6.'da bir çapraz sınıfı dörtüçarın denetim çevrimini göstermektedir. Şekil 6.'da görülen dokuçarın denetlenmesi için bir iç bir de dış döngü olmak üzere iki döngü bulunmaktadır. İç döngü yalpa ( $\phi$ ), yunuslama ( $\theta$ ), sapma ( $\psi$ ) ve yükselti  $z$  olmak üzere dört durumu, dış döngü ise ( $x, y$ ) konumları denetlemektedir. Denetim çevriminde bulunan iç döngünün dinamikleri, dış döngünün dinamiklerine göre daha hızlı olmalıdır.

Dörtüçarın  $x, y, z$  eksenleri boyunca ve bu eksenler etrafındaki hareketinin PD denetleyici ile denetlenmesi için sistem dinamiklerini tanımlayan hareket denklemleri arasındaki karşılıklı etkiler yok sayılarak sistemin hareketi dört bağımsız kanala ayrılmıştır.

### 3. BİR DÖRTÜÇARIN TASARIM VE DİNAMİK BENZETİMİ (DESIGN AND DYNAMIC SIMULATION OF A QUADROTOR)

Bu çalışmada İHA olarak bir dokuçar kullanılmıştır. Bu dokuçarın teorik çalışmaları ve performans özelliklerini çıkarmak için "eCalc" programı kullanılmıştır [17]. eCalc 2004'ten beri, uçakların, dokuçarların, İHA'ların ve helikopterlerin sürücülerinin benzetimini yapmak, hesaplamak, değerlendirmek ve tasarlamak için geliştirilmiş web tabanlı bir programdır.

eCalc'te tasarım süreci ve benzetim işlemleri etkileşimli olup, mümkün olduğunca gerçek elemanların özelliklerinin kullanıldığı gerçeğe çok yakın ortamlar oluşturulabilmektedir.

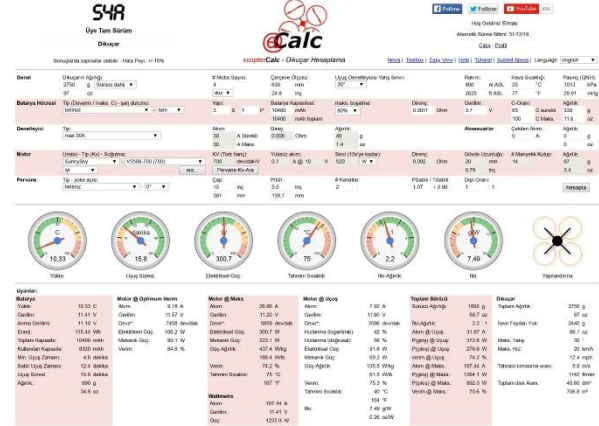
eCalc ortamında;

1. Dokuçarın çalışacağı rakım ve basınç gibi ortam ve çevre şartları performansı doğrudan etkilediğinden bu değerler girilebilmektedir.
2. Dokuçarın çerçeve boyutu ve ağırlığı, olası yapıları değiştirdiğinden programda tanımlanabilmektedir.
3. Motor sayısı ve düzenlemeler seçilebilmektedir.
4. Bataryanın hücre sayısı, kapasitesi ve C-Derecesi, dokuçarın uçuş zamanını ve performansını doğrudan etkilediği için farklı yapıların kullanılması mümkündür.
5. Denetleyici/ESC'de akım sınırları tanımlanabilmektedir.
6. Pervane, seçtiğiniz çerçeve için kullanılacak en uygun pervane ve hatve açısı seçilebilmektedir.
7. eCalc, web üzerinde bulunabilecek en kapsamlı dokuçar motorları veritabanına sahip olduğundan en uygun motoru seçme imkanı sağlamaktadır.

Dokuçar sistemini oluşturan elamanlar ve bunlara ait parametreleri gösteren eCalc arayüz çıktısı Şekil 7.'de verilmiştir. Şekil 7.'de, dokuçarın parametrelerini, seçilen elamanlarını, performans değerlerini göstermektedir.

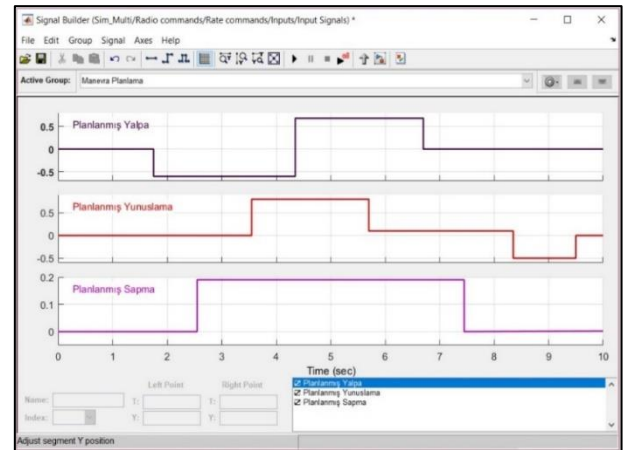
#### Bir Dörtüçarın Benzetimi (Simulation of A Quadrotor)

Çapraz sınıfı bir dokuçar sistemin dinamiklerinin test edilmesi ve denetleyicilerin tepkilerini gözlemleyecek bir benzetim çalışmaları kaynak [18] temel alınarak bu çalışmada kullanılan dokuçarın parametrelerine göre düzenlenmiştir.



Şekil 7. Dokuçarın parametreleri, seçilen bileşenler, performans değerleri (Figure 7 Quadrotor parameters, selected components, performance values)

Ayrıca, MATLAB Simulink'te bulunan "Signal Builder" bloğu kullanılarak değiştirilebilir parçalı doğrusal sinyal kaynakları oluşturularak Manevra planlaması yapılabilecek bir modül eklenmiştir. Şekil 8.'de manevra planlama bloğu görülmektedir.



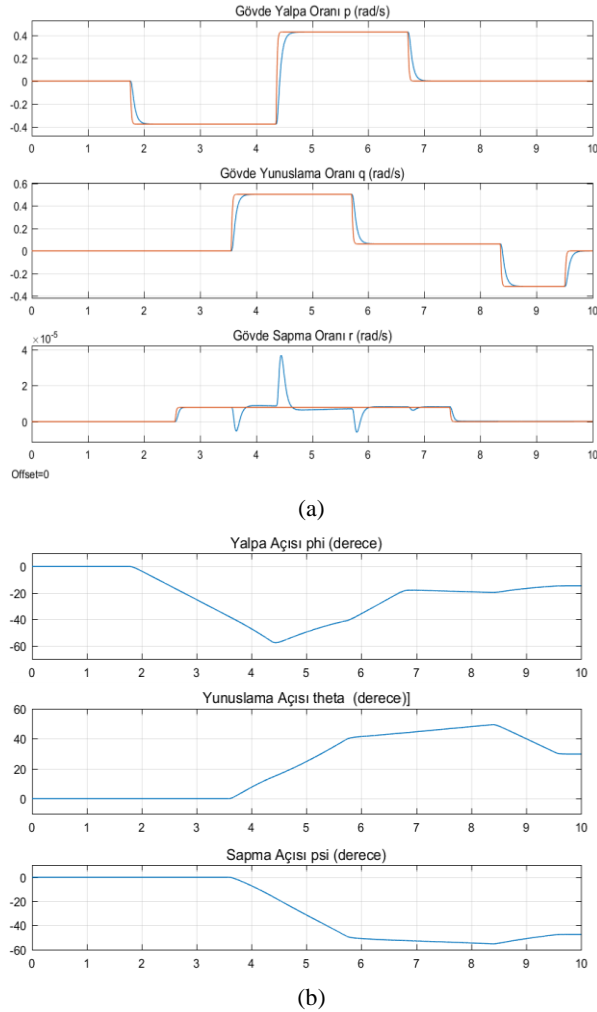
Şekil 8. Manevra planlama bloğu (Figure 8 Maneuver planning block)

#### Bir dokuçarın benzetim sonuçları (Simulation results of a quadrotor)

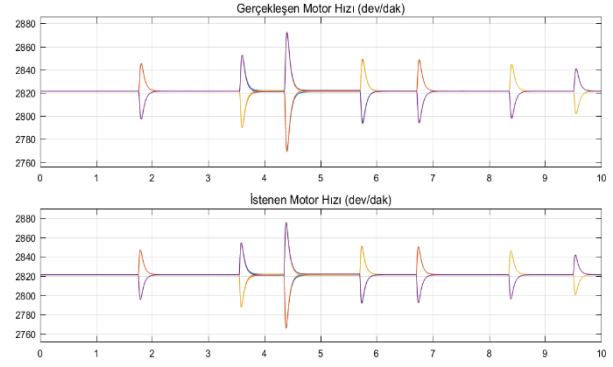
Benzetim çalışmaları planlanan bu manevra hareketlerine göre yapılmıştır. Şekil 9'dan görüldüğü gibi yalpa, yunuslama ve sapma manevra hareketleri için

ani değişken değerler planlanmıştır ve ani değişken hız profili uygulanmıştır. Ani ve yüksek genlikte değişen hız profilleri için kontrolörler yeterli hızda cevap vermekte ve nihai sistem hareketi tatmin edici bir başarımlı göstermektedir. Benzetim çalışmalarından elde edilmiş sonuçlar Şekiller 9-11'de gösterilmiştir.

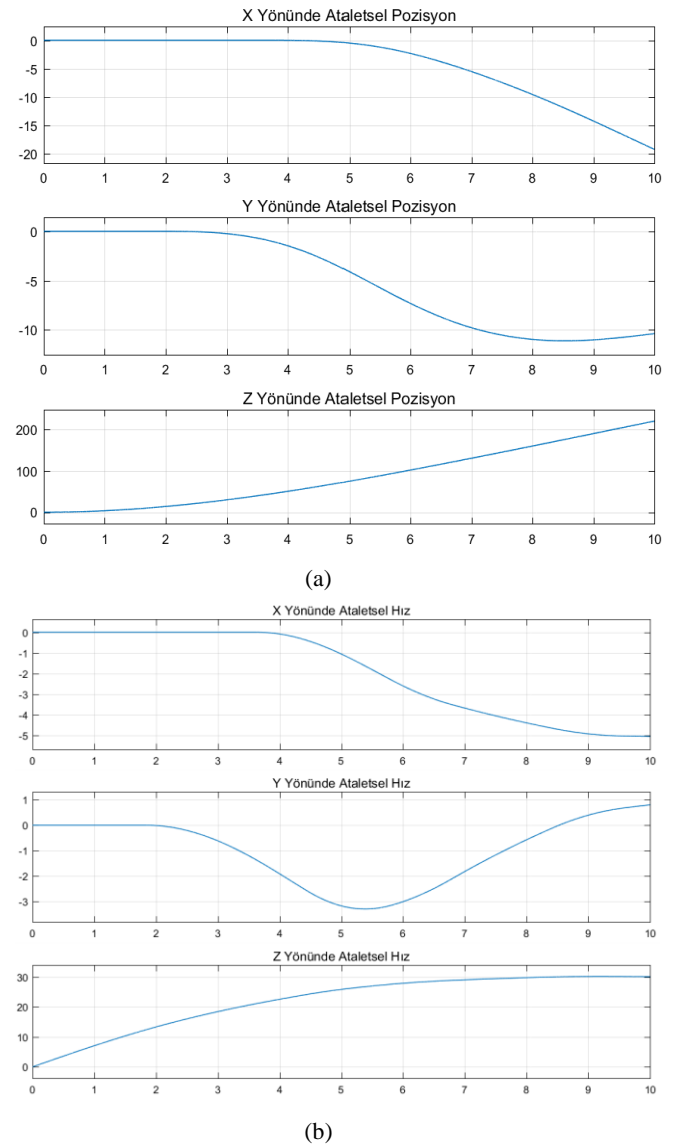
Benzetim ortamında manevra hareketlerinde meydana gelen ani değişiklikleri sistemin cevabının çok hızlı olduğu, değişiklikleri takip ettiği görülmektedir. Takip esnasında yerel aşımalar görülmektedir. Fakat sistem yapısından dolayı bu aşımalar herhangi sistemin tasarım kriterlerinin yerine getirilmesi de dâhil olmak üzere bir soruna yol açmamaktadır.



**Şekil 9.** a) Gerçekleşen ve istenen gövde yalpa, yunuslama ve sapma oranları, b) Yalpa, yunuslama ve sapma açıları (Figure 9 a) Actual and desired body yawing, pitching and rolling rates, b) yawing, pitching and rolling angles)



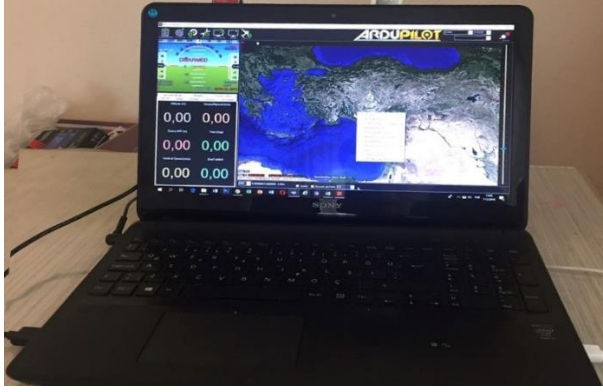
**Şekil 10.** Gerçekleşen ve istenen motor hızı (Figure 10 Actual and desired engine speed)



**Şekil 11.** X, Y ve Z yönlerinde a) ataletsel pozisyonlar, b) ataletsel hızlar (Figure 11 a) Inertial positions in the X, Y and Z directions, b) Inertial speeds)







Şekil 13. Gerçekleştirilen yer kontrol istasyonu (Figure 13 Built ground control station)

Bu makalede insansız hava aracı olarak bir dörтуçar gerçekleştirilerek testlerde kullanılmıştır. Dörтуçarlar, 6 serbestlik derecesinde hareket edebilmektedirler. Bu hareket serbestlikleri sadece dörтуçarın dört motorunun hızı olmak üzere 4 denetim girişi vardır. Dörтуçarlar, durumlarını değiştirmeden dikey z ekseninde hareket ederken, yatay x ve y eksenlerinde hareket edebilmelidirler. Sadece 4 denetim girişi ile 6 serbestlik derecesini denetlemek mümkün olmadığından, istenen x, y, z konumlarına ve istenen bir istikamete uçurabilmek için denetleyiciler tasarlanmalıdır. Sapma ve yalpa açıları korunurken, dörтуçar yunuslama yapabilmelidir. Şekil 14.'de gerçekleştirilen dörтуçar görülmektedir.



Şekil 14. Gerçekleştirilen dörтуçar (Figure 14 Built quadrotor)

## 5. SONUÇ (CONCLUSION)

Günümüzde dronlar, kullanılan motor ya da pervane sayısına ve bunların düzenlenme şekillerine göre adlandırılırlar. Dikuçarlarda, artı (+), çapraz (x) ve H şekillerinde simetrik olarak düzenlenmiş 3, 4, 6 ve 8'li motor ve pervaneler kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, en sıklıkla kullanılan dikuçarların çalışma ilkeleri ele alınmış, hareket denklemleri çıkarılmış, eksen takımları arasındaki ilişki matematiksel olarak gösterilerek ve Newton'un genelleştirilmiş ikinci yasasından yararlanılarak serbestlik açılarıyla ilişkili eşitlikler elde edilmiştir.

Bu çalışmada İHA olarak bir dörтуçar gerçekleştirilerek kullanılmıştır. Bu dörтуçarın teorik çalışmaları ve

performans özelliklerini çıkarmak için "eCalc" programı kullanılmıştır. Bu özelliklere göre dikuçar genel sistemi ve alt sistemleri için gerekli olan donanım ve yazılım mimarileri tasarlanarak uygulamada kullanılacak dörтуçar gerçekleştirilmiştir.

Özellikle son yıllarda gerek ülkemizde ve gerekse yurtdışında geliştirilmiş çok sayıda yer kontrol istasyonu yazılımı bulunmaktadır. Bu yazılımların kimisi ticari yazılımlar, kimisi açık kaynak kodlu programlardır. Bu çalışmada açık kaynak kodlu Mission Planner kullanılmıştır.

Ticari bir uçuş denetleyicisi ile istenilen kabiliyetlere sahip, insansız hava araçları için de hayati öneme sahip olan yeni bir uçuş denetleyici sisteminin tasarım sonuçlarının birlikte değerlendirilmesi sonraki çalışmalarda incelenebilir.

## TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

07/2017-02 kodlu projeye vermiş oldukları destekten dolayı Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkür ederiz.

## ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

## YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

**Elif Ece ELMAS:** Tasarımı, deneyleri yapmış ve sonuçlarını analiz etmiştir.

**Mustafa ALKAN:** Tasarımı, deneyleri yapmış ve sonuçlarını analiz etmiştir.

## ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Kahveci, M., ve Can, N., "İnsansız hava araçların: Tarihçesi, tanımı, dünyada ve Türkiye'deki yasal durumu", *Selçuk Üniversitesi Mühendislik Bilim ve Teknik Dergisi*, 5(4), 511-535, (2017).
- [2] İnternet: İnsansız Hava Aracı Sistemleri Talimatı URL: [https://iha.shgm.gov.tr/public/document/SHT-IHA\\_REV1.pdf](https://iha.shgm.gov.tr/public/document/SHT-IHA_REV1.pdf) Son Erişim Tarihi: 24.08.2021.
- [3] "Türkiye İnsansız Hava Aracı Sistemleri Yol Haritası", Savunma Sanayi Müsteşarlığı, (2011).
- [4] Bayraktar Ö. ve Güldaş A. "Quadrotor itme ve tork katsayılarının optimizasyonu ve Matlab/Simulink ile simülasyonu", *Politeknik Dergisi*, 23(4): 1197-1204, (2020).

- [5] Özçınar E. C., ve Uğurlu B., “Tepki kuvveti gözetleyici tabanlı tork kontrolü”, *Politeknik Dergisi*, 24(4): 1629-1635, (2021).
- [6] Gürgöze G. ve Türkoğlu İ., “Mobil robotlarda kullanılan DC motorların parametrelerinin belirlenmesi için deney düzeneği geliştirilmesi”, *Politeknik Dergisi*, 25(1): 115-121, (2022).
- [7] Yükselen, M. A., “Aerodinamik Ders Notları”, *İTÜ Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uçak Mühendisliği Bölümü*, İstanbul, (2011).
- [8] İnternet: Types of Multicopter URL: <https://oscarliang.com/types-of-multicopter/> Son Erişim Tarihi: 24.08.2021.
- [9] Bresciani, T., “Modelling, Identification and Control of a Quadrotor Helicopter”, *Master Thesis*, Lund University ISSN 0280-5316 ISRN LUTFD2/TFRT-5823-SE, (2008).
- [10] Tosun, D. C., “Dört Motorlu Bir İnsansız Hava Aracı için Adaptif Kontrol Sistem Tasarımı”, *Yüksek Lisans Tezi*, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, (2015).
- [11] Güçlü, A., “Attitude and Altitude Control of an Outdoor Quadrotor”, *Yüksek Lisans Tezi*, Atılım Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (2012).
- [12] Bayrakçeken, M. K., “Dikine İniş Kalkış Yapabilen Dört Rotorlu Hava Aracının (Quadrotor) Uçuş Kontrolü”, *Doktora Tezi*, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, (2013).
- [13] Akyüz, S., “Dört Rotorlu İnsansız Hava Aracı (Quadrotor)’ın PD Ve Bulanık Kontrolcü Tasarımı ve Benzetim Uygulaması”, *Yüksek Lisans Tezi*, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, (2013).
- [14] Kıyak, E., “Durum geribeslemeli uçuş kontrol sistem tasarımı”, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 25, 409-425, (2009).
- [15] Kahvecioğlu, A., Parlaktuna, O., Korul, H., ve Işık, Y., “Bir uçağın irtifa kontrolünde klasik ve bulanık pd denetleyici performanslarının karşılaştırılması”, *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, 2(3), 9-20, (2006).
- [16] Mehmet, E.Ö., “Dört Kanatlı Bir Döner kanat Sisteminin Modeli ve PD Kontrolör ile Yörünge Kontrolü”, *Türk Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı*, İstanbul, (2007).
- [17] İnternet: URL: <https://www.ecalc.ch/motorcalc.php> Son Erişim Tarihi: 24.08.2021.
- [18] Vervoort, W.J., “A Modular Simulation Environment For The Improved Dynamic Simulation Of Multirotor Unmanned Aerial Vehicles”, *Master Thesis*, University of Illinois at Urbana-Champaign, (2016).
- [19] Dikmen, İ. C., Arısoy, A., ve Temeltaş, H., Dikey iniş-kalkış yapabilen dört rotorlu hava aracının (quadrotor) uçuş kontrolü, *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, 4(3), 33-40, (2009).
- [20] Meriç, Y. ve Bayılmış, C., “Dört rotorlu insansız hava aracı (quadrotor) uygulaması”, *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS’11)*, 16-18 May 2011, Elazığ, (2011).
- [21] İnternet: Pixhawk Overview URL: <https://ardupilot.org/copter/docs/common-pixhawk-overview.html> Son Erişim Tarihi: 24.08.2021.
- [22] İnternet: <http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fwww.aliexpress.com%2Fitem%2FDIY-Full-Set-2-4GHz-4-Axis-Quadcopter-RC-Drone-630mm-Frame-Kit-MINI-PIX-GPS%2F32851262028.html%3Fspm%3Da2g0s.9042311.0.0.4f4d4c4dzEybRq+&date=2018-12-21>.
- [23] İnternet: Limskey lityum polimer güç Lipo pil 11.1v 10400mAh 30C 3S T/XT60 tak için RC helikopter araba tekne Quadcopter parçaları Bateria URL: <https://tr.aliexpress.com/item/32807873931.html> Son Erişim Tarihi: 24.08.2021.
- [24] İnternet: 40km RFD 900 artı 900MHz Ultra uzun menzilli radyo veri Modem için anten ile APM PIX uçuş kontrolörü URL: <https://tr.aliexpress.com/item/32407769963.html> Son Erişim Tarihi: 24.08.2021.
- [25] İnternet: Mission Planner Features/Screens URL: <https://ardupilot.org/planner/docs/mission-planner-features.html> Son Erişim Tarihi: 24.09.2021