



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

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

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



Quadrotor itme ve tork katsayılarının optimizasyonu ve Matlab/Simulink ile simülasyonu

Optimization of Quadrotor's thrust and torque coefficients and simulation with Matlab/Simulink

Yazar(lar) (Author(s)): Ömer BAYRAKTAR¹, Abdulmecit GÜLDAŞ²

ORCID¹: 0000-0002-9858-5363

ORCID²: 0000-0002-1865-2272

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Bayraktar Ö. ve Gültaş A. "Quadrotor itme ve tork katsayılarının optimizasyonu ve Matlab/Simulink ile simülasyonu", *Politeknik Dergisi*, 23(4): 1197-1204, (2020).

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

DOI: 10.2339/politeknik.636950

Quadrotor İtme ve Tork Katsayılarının Optimizasyonu ve Matlab/Simulink İle Simülasyonu

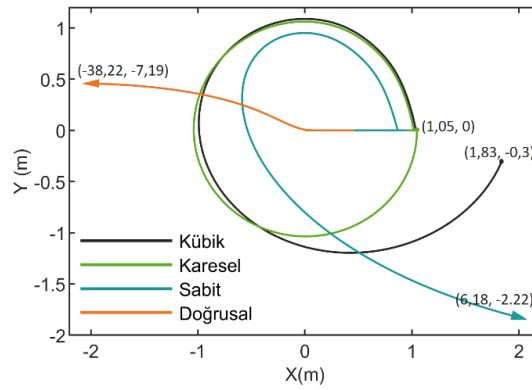
Optimization of Quadrotor's Thrust and Torque Coefficients and Simulation with Matlab/Simulink

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ İtme ve tork katsayılarının optimizasyonu. / Optimization of thrust and torque coefficients.
- ❖ Quadrotorun dinamik modellenmesi ve simülasyonu. / Dynamic modeling and simulation of quadrotor.
- ❖ Yörünge takibindeki hatalar. / Trajectory tracking errors.

Grafik Özet (Graphical Abstract)

İtme ve tork katsayılarının optimizasyonunun yörünge takibinde açıkça ortaya çıkmaktadır. / The importance of optimizing the thrust and torque coefficients clearly revealed in trajectory tracking.



Şekil. Regresyon yöntemlerine göre düzeltilmiş yörünge takibi. / **Figure.** Corrected trajectory tracking according to regression methods.

Amaç (Aim)

İnsansız hava araçlarının yörünge takibindeki hataların en aza indirilmesi. / Minimization of errors in trajectory tracking of unmanned aerial vehicles.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

İtme ve tork katsayıları deneysel olarak ölçülerek regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen denklemler Matlab/Simulink yazılımı ile yörünge takibine göre incelenmiştir. / Regression analyzes were carried out by measuring the thrust and torque coefficients experimentally. The equations were examined according to trajectory tracking with Matlab/Simulink software.

Özgünlük (Originality)

Literatürde itme ve tork kuvvetlerinin elde edilmesinde yaygın olarak kullanılan formülün yeterliliği araştırılmıştır. / Widely used in obtaining thrust and torque forces commonly used in the literature were investigated.

Bulgular (Findings)

Yörünge takibindeki hata miktarı regresyon denklemine bağlı olarak 38,22m ile 0,05m arasında değişmektedir. / The amount of error in trajectory tracking varies between 38.22m and 0.05m depending on the regression equation.

Sonuç (Conclusion)

Kübik ve Karesel itme ve tork kuvveti denklemleri yörünge takibinde diğer yöntemlere göre daha iyi sonuç vermiştir. / The Cubic and Quadratic thrust and torque forces equations gave better results in trajectory tracking.

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.

Quadrotor İtme ve Tork Katsayılarının Optimizasyonu ve Matlab/Simulink ile Simülasyonu

Araştırma Makalesi / Research Article

Ömer BAYRAKTAR*, Abdulmecit GÜLDAŞ

Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 23.10.2019 ; Kabul/Accepted : 22.11.2019)

ÖZ

Bu çalışmada, quadrotorların dinamiğini büyük ölçüde belirleyen itme ve tork kuvvetleri deneysel olarak ölçülmüş ve quadrotorun simülasyon modeli üzerinden optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Motor devrinin kontrolünde elektronik hız kontrol kartı kullanılmış ve darbe genişlik modülasyon (DGM) metodu ile 1100-2000 frekans aralığında kontrol edilmiştir. Motor ve pervane çiftinin itme kuvveti, tork değeri ve devir sayısı ölçümleri deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Bu deneysel verilerin regresyon analizleri motor devrine bağlı olarak gerçekleştirilmiştir. Regresyon analizleri doğrusal, karesel, kübik ve sabit katsayılı metodlar ile gerçekleştirilmiştir. Regresyon ile elde edilen denklemler Matlab/Simulink'te oluşturulan quadrotor modeline uygulanmış ve quadrotorun dairesel yörünge takibindeki hatalar kıyaslanmıştır. Momentum teoreminden elde edilen itme kuvveti ve tork değerlerinin 2 metrelik yörünge takibinde yüksek hata miktarına sahip olduğu gözlenmiştir. İtme kuvvetinin belirlenmesinde karesel regresyon yönteminin kullanılması ve tork değerinin belirlenmesinde kübik regresyon yönteminin kullanılması, yörünge takibindeki hata miktarını en aza indirdiği gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: İHA, quadrotor, PID kontrol, uçuş dinamiği.

Optimization of Quadrotor's Thrust and Torque Coefficients and Simulation with Matlab/Simulink

ABSTRACT

In this study, the thrust forces and torque values were experimentally measured which determine the quadrotor dynamics majorly and optimization was performed on the the quadrotor simulation model. The electronic speed controller, which regulates the speed of the rotors, is controlled in the frequencies range from 1100 to 2000 by pulse width modulation (PWM) method. Thrust force, torque value and rotor speed measurements were experimentally performed on motor and propeller pair. The regression analyzes of these parameters were performed according to the rotor speed. Regression analyzes were performed with linear, quadratic, cubic and constant coefficient methods. The obtained regression equations were applied to Matlab/Simulink quadrotor model and the errors in the quadrotor trajectory tracking were compared. It has been observed that the thrust and torque values obtained from momentum theorem have high deviation in 2-meter trajectory tracking. It has been observed that using the quadratic regression method to determine thrust force and using the cubic regression method to determine torque value minimize the amount of error in trajectory tracking.

Keywords: UAV, quadrotor, PID control, flight dynamics.

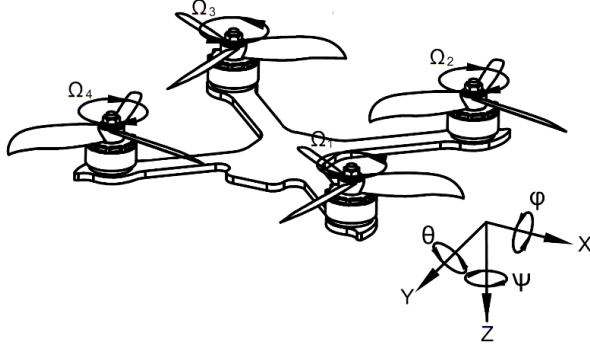
1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son yıllarda hassas sensörlerin ve uçuş algoritmalarının geliştirilmesi ile insansız hava araçlarının kontrolü oldukça kolaylaşmış ve bu araçlara olan ilgi oldukça artmıştır. Özellikle quadrotorlar geniş kullanım alanı bulmuş, hatta hobi amaçlı olarak bile kullanılmaya başlanmıştır. Quadrotorlar itme kuvveti sağlayan dört motor yardımıyla 6 serbestlik dereceli hareket sağlayan İHA'lardır (Şekil 1). Quadrotorların en önemli sorunlarından biri istikrarlı bir sistem olmayışıdır. Bu İHA'lar bulunduğu çevresel koşulların sürekli değişken olması, güç kaynaklarının değişken voltaj ve gerilim sunması, matematiksel algoritmalarının hâlâ geliştiriliyor olması gibi sebeplerden dolayı kararlı değildir.

Quadrotorların kontrolü için PID kontrol [1], adaptif kontrol [2], robust kontrol [3], bulanık mantık [4] ve yapay sinir ağları [5] gibi algoritmalar sıklıkla kullanılmaktadır. Sürekli olarak geliştirilen bu kontrol algoritmaları birçok araştırmacı tarafından ilgi çeken bir araştırma konusu olmuştur. Bouabdallah (2007) quadrotorun kontrol sistemi üzerine çalışmıştır. PID kontrol, optimal kontrol, backstepping kontrol, sliding-mode kontrol gibi farklı teknikleri quadrotor üzerinde test etmiş, backstepping tekniğinin diğer tekniklere kıyasla daha başarılı olduğunu gözlemlemiştir [6]. Tomashevich ve Belyavskiy (2016) parametrik sinyal adaptif kontrolü üzerine çalışmışlardır. Simülasyon sonuçlarına göre parametrik sinyal adaptif kontrol algoritmasının, adaptif olmayan PD yasası ve geri besleme doğrusallaştırma kontrolüne göre daha iyi olduğu görülmektedir [7]. Ayrıca birçok araştırmacı kontrol sistemlerinin doğruluğunu araştırmak için

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : omerbayraktar@gazi.edu.tr

simülasyon programı yardımıyla yörünge takibi gerçekleştirmekte ve yörüngeden sapma hatalarını araştırmaktadır [8,9].



Şekil 1. Quadrotorun hareket yönleri (Movement directions of quadrotor)

Kontrol algoritmalarının dışında farklı tipte quadrotor tasarımları da araştırmacılar tarafından araştırılma konusu olmuştur [10,11,12]. Nandakumar vd. üst üste gelen pervane tasarımlı quadrotor ile İHA'nın taşıma kapasitesini arttırmıştır [13]. Badr (2016) vd. X tipi quadrotorun kollarına dik olarak eğilebilen motorlara sahip quadrotor tasarlamışlardır. Bu tasarım ile quadrotorun, yunuslama ve yuvarlanma hareketi yapmadan X ve/veya Y yönlerinde hareket edebilmesini sağlamışlardır [14].

Quadrotor üzerine gerçekleştirilen bu gibi çalışmalar ve diğer çalışmaların ortak noktası momentum teoremi yardımıyla elde edilen itme kuvveti ve tork değerlerinin bu teorem ile elde edilmesidir. Eşitlik 1'de pervane ve motordan elde edilen itme kuvveti denklemi verilmiş, formüle ait detaylar [15]'te belirtilmiştir. Eşitlik 2'de ise pervane ve motordan elde edilen tork kuvvetine ait denklem verilmiştir.

$$F = \rho A (\Omega R)^2 C_T \quad (1)$$

$$T = \rho A (\Omega R)^2 C_Q \quad (2)$$

Burada ρ hava yoğunluğu, A pervanenin yüzey alanı, Ω pervanenin açısal hızı, R pervane yarıçapı, C_T itme kuvveti katsayısını ve C_Q tork kuvveti katsayısını temsil etmektedir.

Denklemdaki C_T ve C_Q katsayıları araştırmacılarca deneysel olarak bulunmaktadır. Denklemdaki hava yoğunluğu, pervanenin yüzey alanı, pervane yarıçapı, tork kuvveti katsayısı ve itme kuvveti katsayısı simülasyon süresi boyunca sabit olarak kabul edildiğinden, bu değişkenler itme kuvveti denkleminde b gibi yeni bir katsayı, tork kuvveti denkleminde k gibi bir katsayı olarak kabul edilmektedir.

$$F = b\Omega^2 \quad (3)$$

$$T = k\Omega^2 \quad (4)$$

Quadrotorların, hava gibi değişken ve düşük sürtünmeli bir ortam içerisinde sabit bir noktada durma, yörünge takibi gibi zor görevleri yerine getirebilmesi için pervanelerden elde edilen itme kuvvetinin ve tork kuvvetinin doğru hesaplanması oldukça önemlidir. Bu çalışmada araştırmacılarca kullanılan sabit katsayı

ikincil dereceden itme ve tork kuvveti denklemlerinin yeterliliği araştırılmıştır. Deneysel olarak elde edilen itme kuvveti, tork değeri ve motor devri üzerinden regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Regresyon analizleri lineer, sabit katsayılı, karesel ve kübik olmak üzere 4 farklı yöntemle ve motor devrine bağlı olarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen regresyon denklemleri ve araştırmacılar tarafından yaygın olarak kullanılan mevcut formülün kıyaslamaları gerçekleştirilmiştir.

2. MATEMATİKSEL MODEL (MATHEMATICAL MODEL)

Quadrotorun tam bir dinamik modelini oluşturmak için Newton-Euler denklemleri kullanılmıştır. Ayrıca dinamik hesaplamalarda aşağıdaki varsayımlar kabul edilmiştir.

1. Quadrotorun ağırlık merkezi geometrik olarak orta noktadır.
2. Quadrotor rijit bir cisimdir.
3. Quadrotor x ve y eksenlerinde simetrikdir.
4. Pervaneler rijittir.
5. Uçuş yüksekliği ve yerçekimi sabit kabul edilmiştir.

Denklemlerin elde edilmesinde iki ana referans sistemi vardır. Bunlar; referans koordinat sistemi (X_i, Y_i, Z_i) ve quadrotor ağırlık merkezine sabitlenmiş rijit cismin referans sistemidir (X_b, Y_b, Z_b). Quadrotorun pozisyon açıları ise yunuslama (x eksenini etrafındaki φ açısı), yuvarlanma (y eksenini etrafındaki θ açısı) ve sapma (z eksenini etrafındaki ψ açısı) olarak adlandırılır. Doğrusal hızlar ise $V = [u, v, w]$ ve açısal hızları $\omega = [p, q, r]$ ile ifade edilir. Uzayda θ gibi bir açısal konum tanımlanması yapmak mümkün değildir. Bu yüzden referans koordinat sistemine göre cismin açısal konumu ve açısal hızının ilişkilendirilmesi gereklidir. Bu amaçla Euler açıları kullanılır. Euler açıları rijit bir gövdenin yönelimini bir atalet koordinat sistemine göre tanımlamaya yarar [16]. R_n^b ; toplam rotasyon matrisini temsil etmektedir ve Eşitlik 5'te verilmiştir.

$$R_n^b = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & c\psi s\theta s\varphi - s\psi c\varphi & c\psi s\theta c\varphi + s\psi s\varphi \\ s\psi c\theta & s\psi s\theta s\varphi + c\psi c\varphi & s\psi s\theta c\varphi - c\psi s\varphi \\ -s\theta & c\theta s\varphi & c\theta c\varphi \end{bmatrix} \quad (5)$$

Burada c, s sembolleri *kosinus* ve *sinüs*'ü temsil etmektedir.

2.1 Kuvvetler ve Momentler (Forces and Moments)

Başlangıçta dinamik bir modeli oluşturabilmek için hangi kuvvetlerin cismi harekete geçirdiğinin tanımlanması gerekmektedir. Bir quadrotor'da motorlar tarafından oluşturulan kuvvetler ve torklar girdi olarak düşünülebilir ve genel olarak Newton'un ikinci hareket yasası, quadrotorun hareketini analiz etmede kullanılabilir. Quadrotorun üzerine etkiyen pervaneler ve

dönme hareketinden kaynaklı net kuvvet ve net moment aşağıdaki şekilde formüle edilir.

$$F_{net} = d/dt[mV] \text{ (kg.m/s}^2\text{)} \quad (6)$$

$$M_{net} = d/dt[I\omega] + \omega \times [I\omega] \text{ (kg.m}^2\text{/s}^2\text{, Nm)} \quad (7)$$

Burada m kütle, V hızı, ω açısal hızı ve I atalet momentini temsil etmektedir.

Yerçekiminin vektörü (F_g) quadrotoru referans koordinat sisteminde pozitif z eksenini yönünde çekmektedir. Quadrotorun gövdesi üzerindeki yerçekimi vektörü Eşitlik 8 ile ifade edilir.

$$F_g = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ mg \end{bmatrix} \quad (8)$$

Pervanelerden gelen kuvvetin, quadrotor gövdesi üzerinde her zaman Z eksenine paralel olacağı varsayılır. Bu yüzden X ve Y yönlerinde itme kuvveti gerçekleşmez. Bu varsayım, rijit gövdeli titreşimsiz bir quadrotor için geçerlidir ve Eşitlik 9 ile ifade edilebilir.

$$F_{itme} = b \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2 \end{bmatrix} = b(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2)\hat{Z}_b \quad (9)$$

Burada Ω açısal hızı, Ω 'nın indisleri ise motor numaralarını temsil etmektedir.

Yerçekiminin etkisi ve rotorlardan gelen itme kuvvetlerinin referans sistemi üzerindeki kuvvet vektörlerine ait kuvvetler toplamı aşağıdaki eşitliklerde verilmiştir.

$$\sum \vec{F}^n = F_g + R_n^b \times F_{itme} \quad (10)$$

$$\sum \vec{F}^n = \begin{bmatrix} b(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2)(\cos\psi\sin\theta\cos\varphi + \sin\psi\sin\varphi) \\ b(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2)(\sin\psi\sin\theta\cos\varphi - \cos\psi\sin\varphi) \\ mg - (b(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2))\cos\theta\cos\varphi \end{bmatrix} \quad (11)$$

Newton'un ikinci hareket yasasını uygulayacak olursak yeni denklem aşağıdaki gibi olur.

$$\begin{bmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{Y} \\ \ddot{Z} \end{bmatrix} = \frac{1}{m} \begin{bmatrix} b(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2)(\cos\psi\sin\theta\cos\varphi + \sin\psi\sin\varphi) \\ b(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2)(\sin\psi\sin\theta\cos\varphi - \cos\psi\sin\varphi) \\ mg - (b(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2))\cos\theta\cos\varphi \end{bmatrix} \quad (12)$$

Quadrotor üzerinde X, Y, Z eksenleri boyunca gerçekleşen rotasyon momentleri sırasıyla aşağıdaki eşitlikler ile elde edilir.

$$\tau_\theta = bl_x(\Omega_1^2 - \Omega_2^2 - \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \quad (13)$$

$$\tau_\varphi = bl_y(-\Omega_1^2 - \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \quad (14)$$

$$\tau_\psi = k(\Omega_1^2 - \Omega_2^2 + \Omega_3^2 - \Omega_4^2) \quad (15)$$

Burada l_x ve l_y ağırlık merkezinin X ve Y eksenlerinde motor merkezine olan dik uzaklığıdır.

Rijit cisim dönüş yasasının (rigid body rotational law) uygulanması ile açısal ivme denklemleri elde edilir.

$$\vec{M}^b = I\dot{\vec{\omega}} + \vec{\omega} \times (I\vec{\omega}) - T_j \quad (16)$$

$$\dot{\varphi} = \frac{\tau_\varphi}{I_{xx}} + \dot{\theta}\dot{\psi} \left(\frac{l_{yy} - l_{zz}}{I_{xx}} \right) - \frac{l_{rotor}}{I_{xx}} \dot{\theta}\Omega_t \quad (17)$$

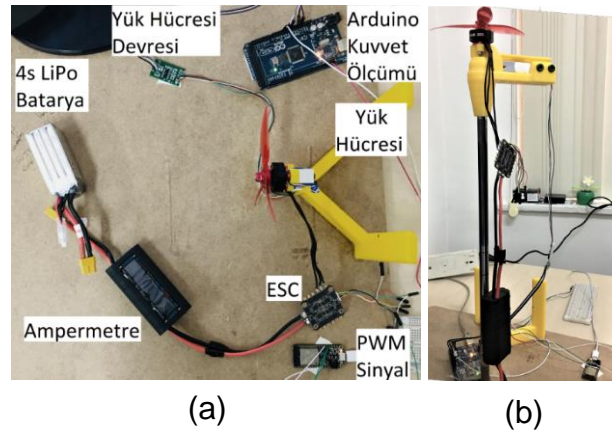
$$\dot{\theta} = \frac{\tau_\theta}{l_{yy}} + \dot{\varphi}\dot{\psi} \left(\frac{l_{zz} - l_{xx}}{l_{yy}} \right) + \frac{l_{rotor}}{l_{yy}} \dot{\varphi}\Omega_t \quad (18)$$

$$\dot{\psi} = \frac{\tau_\psi}{I_{zz}} + \dot{\varphi}\dot{\theta} \left(\frac{l_{xx} - l_{yy}}{I_{zz}} \right) \quad (19)$$

Burada I_{xx} , I_{yy} ve I_{zz} X, Y ve Z yönlerindeki quadrotorun ataletini, l_{rotor} motorun ataletini ve Ω_t toplam motor devrini temsil etmektedir.

3. MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

Quadrotor'un dinamik hesaplamalarında kullanılan ve manevra kabiliyetini ve hızını belirleyen Motor/Pervane'ye ait itme ve tork kuvvetleri deneysel olarak elde edilmiştir. Şekil 2.a'da kuvvet ölçüm düzeneği ve Şekil 2.b'de ise tork ölçümüne ait deney düzeneği gösterilmiştir.



Şekil 2. Rotor/Pervane çiftinden elde edilen (a) itme kuvveti ölçüm düzeneği, (b) tork ölçüm düzeneği ((a) Thrust force testing device, (b) torque testing device, obtained from rotor/propeller pair)

İtme kuvveti ve tork değeri ölçümleri için hazırlanan test düzeneğinde, Adafruit Huzzah32 geliştirme kartından üretilen DGM sinyalleri ile elektronik hız kontrol (ESC) kartı kontrol edilmiştir. Rotorlara farklı voltaj gerilimi gönderen ESC kartı farklı DGM sinyallerinde kontrol edilmiştir. HX711 AD yük hücresi modülü ile Arduino geliştirme kartından kuvvet ölçüm değerleri alınmıştır. Motor devrinin ölçümünde dijital lazer takometre kullanılmıştır. Deney düzeneğinde kullanılan malzemelere ait bilgiler Çizelge 1.'de verilmiştir.

Çizelge 1. Deney düzeneğinde kullanılan malzemeler ve özellikleri (Materials and properties used in the experimental setup)

Ürün	Açıklama
Rotor	EMAX RSII 2306 2400KV
Pervane	Gemfan Flash 5149
ESC	Anniversary Special Edition Racerstar REV35 35A BLheli_S 3-6S 4 In 1 ESC
Batarya	TATTU - 1300mAh 14.8V 95C 4S1P R-Line LiPo Batarya
Yük Hücresi	5kg HX711 AD modül
Yük Ölçümü	Arduino Mega 2560 Rev3
Devir Ölçümü	BENETECH GM8905
DGM Sinyal	Adafruit Huzzah32

Deney düzeneğinden elde edilen devir, itme kuvveti ve tork değerlerine ait veriler Çizelge 2’de verilmiştir.

Çizelge 2. DGM sinyaline karşılık gelen devir, itme kuvveti ve tork değerleri (Rotation speed, thrust force and torque values corresponding to PWM signal)

DGM Sinyali	Devir (rpm)	İtme Kuvveti (N)	Tork (Nm)
1100	3756	0,28	0,0025
1200	7340	0,82	0,0094
1300	10580	1,66	0,0180
1400	13570	2,78	0,0315
1500	16107	3,98	0,0445
1600	18564	5,37	0,0590
1700	20988	6,87	0,0747
1800	23535	8,81	0,0949
1900	25540	10,50	0,1139
2000	27121	11,81	0,1294

4. İTME VE TORK KUVVETİ DENKLEMLERİ (THRUST AND TORQUE FORCE EQUATIONS)

İtme ve tork kuvveti değerlerinin pervane hızına bağlı bir denklem olarak yazılabilmesi için İtme ve tork kuvveti

katsayıların belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için motor/pervane çiftinden elde edilen deneysel veriler Minitab 17.3.1 yazılımı ile regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Regresyon analizlerinden dördü tork ve dördü itme kuvveti olmak üzere toplam 8 denklem elde edilmiştir. Denklemlere ait ANOVA sonuçları Çizelge 3 ve Çizelge 4’te verilmiştir.

Sabit Katsayılı $T_r = 1,7347x10^{-10} \cdot \Omega^2$ ($R^2 = \%99,9$)
 $F_i = 1,5896x10^{-8} \cdot \Omega^2$ ($R^2 = \%99,9$)

Lineer $T_r = -3,420x10^{-2} + 5,50825x10^{-6} \cdot \Omega$ ($R^2 = \%95,1$)
 $F_i = -3,1685 + 5,061x10^{-4} \cdot \Omega$ ($R^2 = \%94,8$)

Karesel $T_r = 1,850x10^{-3} - 4,0800891x10^{-7} \cdot \Omega + 1,87468x10^{-10} \cdot \Omega^2$ ($R^2 = \%100$)
 $F_i = 2,526x10^{-1} - 5,529909x10^{-5} \cdot \Omega + 1,778857x10^{-8} \cdot \Omega^2$ ($R^2 = \%100$)

Kübik $T_r = -1,123x10^{-3} + 4,5318582x10^{-7} \cdot \Omega + 1,229257x10^{-10} \cdot \Omega^2 + 1,3866723x10^{-15} \cdot \Omega^3$ ($R^2 = \%100$)
 $F_i = 2,242x10^{-1} - 4,706694x10^{-5} \cdot \Omega + 1,717166x10^{-8} \cdot \Omega^2 + 1,325394x10^{-14} \cdot \Omega^3$ ($R^2 = \%100$)

Regresyon modelinden elde edilen denklemler ve deneysel sonuçlar arasındaki artık miktarları Şekil 3 ve Şekil 4’te gösterilmiştir. Sekiz regresyon denkleminin de yüksek R^2 değerine sahip olduğu görülmektedir. Bu nedenle denklemlerin sayısal olarak karşılaştırılabilmesi için Çizelge 5’te artık miktarları ve artık miktarlarının mutlak toplamları verilmiştir.

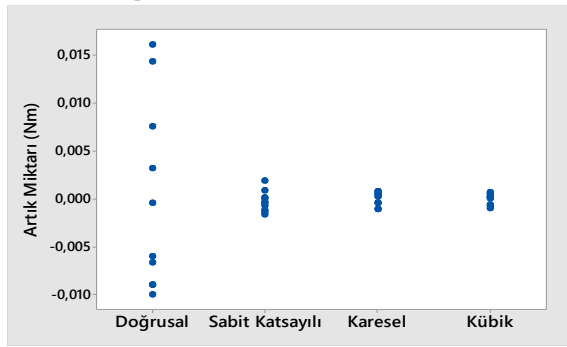
Çizelge 3. Tork değerleri için ANOVA sonuçları (ANOVA results for torque values)

Regresyon Modeli	Kaynak	DF	SS	MS	F	P
Lineer	Regresyon	1	0,0169326	0,0169326	155,54	0,000
	Artık	8	0,0008709	0,0001089		
Karesel	Regresyon	2	0,0177987	0,0088993	12880,57	0,000
	Artık	7	0,0000048	0,0000007		
Kübik	Regresyon	3	0,0178004	0,0059335	11579,03	0,000
	Artık	6	0,0000031	0,0000005		
	Toplam	9	0,0178035			

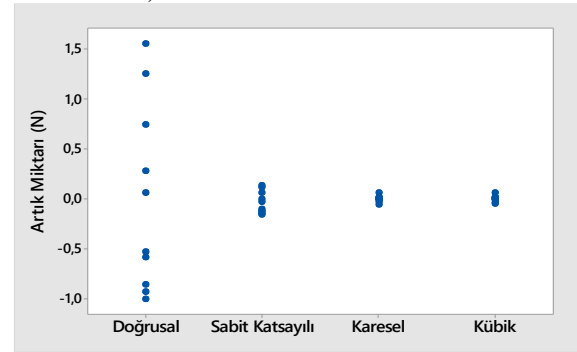
Çizelge 4. İtme kuvvetleri için ANOVA sonuçları (ANOVA results for thrust forces)

Regresyon Modeli	Kaynak	DF	SS	MS	F	P
Lineer	Regresyon	1	142,941	142,941	146,50	0,000
	Artık	8	7,806	0,976		
Karesel	Regresyon	2	150,739	75,3693	65245,42	0,000
	Artık	7	0,008	0,0012		
Kübik	Regresyon	3	150,739	50,2463	38040,31	0,000
	Artık	6	0,008	0,0013		
	Toplam	9	150,747			

Şekil 3. Tork değerlerine ait regresyon artık miktarları (Residual quantity in regression analysis for torque values)



Şekil 4. İtme kuvvetlerine ait regresyon artık miktarları (Residual quantity in regression analysis for thrust forces)



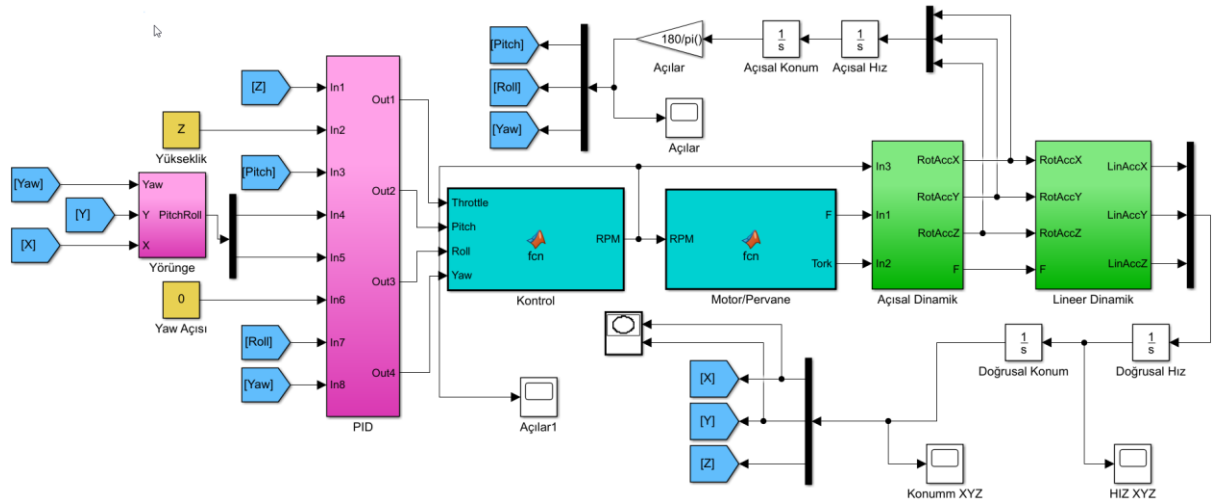
Çizelge 5. Regresyon denklemleri ve deneysel bulgular arasındaki farklar (Differences between regression equations and experimental findings)

Devir (rpm)	Deneysel Kuvvet Ölçümü (g)	İtme Kuvveti Artık Miktarları (g)				Tork Kuvveti Artık Miktarları (10 ³ .Nm)			
		Lineer	Sabit Katsayı	Karesel	Kübik	Lineer	Sabit Katsayı	Karesel	Kübik
3756	29	158,26	6,13	-1,17	0,61	16,07	0,10	-0,41	0,16
7340	84	28,29	-3,33	1,90	1,49	3,19	0,07	0,46	0,04
10580	169	-53,92	-12,45	-0,16	0,70	-6,02	-1,37	-0,47	-1,02
13570	283	-94,23	-15,50	-0,29	0,57	-8,96	-0,36	0,75	0,46
16107	406	-102,17	-14,55	0,44	0,49	-9,98	-0,47	0,62	0,68
18564	548	-86,98	-10,64	1,76	2,11	-9,00	-0,73	0,18	0,53
20988	701	-59,08	-13,05	-5,49	4,99	-6,65	-1,66	-1,11	-0,60
23535	898	6,46	0,12	0,16	0,53	-0,47	-1,12	-1,12	-0,75
25540	1071	75,98	13,62	5,98	5,95	7,52	0,84	0,28	0,26
27121	1204	127,38	11,66	-3,14	3,70	14,31	1,89	0,82	0,24
	Mutlak Toplam	792,75	101,06	20,48	21,15	82,15	8,61	6,22	4,74

5.KONTROLÖR TASARIMI ve PARAMETRELER (CONTROLLER DESIGN AND PARAMETERS)

Quadrotora ait matematiksel modelin analizini gerçekleştirebilmek için Matlab Simulink yazılımı ile model oluşturulmuştur (Şekil 5.). Bu simülasyon modelinde kullanılacak parametrelere ait bilgiler Çizelge 6’da verilmiştir. Oransal integral türevsel (PID)

denetleyici kontrol döngüsü için gerekli olan katsayılar ise Çizelge 7’de verilmiştir.



Şekil 5. Quadrotor simülasyon modeli (Quadrotor simülasyon modeli)

Çizelge 6. Deney parametreleri ve sembolleri (Test parameters and symbols)

Açıklama	Sembol	Değer
Rotor-Ağırlık merkezi uzaklığı	l_x, l_y	0,2m
Quadrotor Ağırlığı	M	0,95kg
Yerçekimi ivmesi	g	9,81m/s ²
X eksenini etrafındaki ataleti	I_{xx}	0,0132Kg.m ²
Y eksenini etrafındaki ataleti	I_{yy}	0,0132Kg.m ²
Z eksenini etrafındaki ataleti	I_{zz}	0,0235Kg.m ²
Rotor dönme ataleti	J_r	33.10 ⁻⁶ Kg.m ²

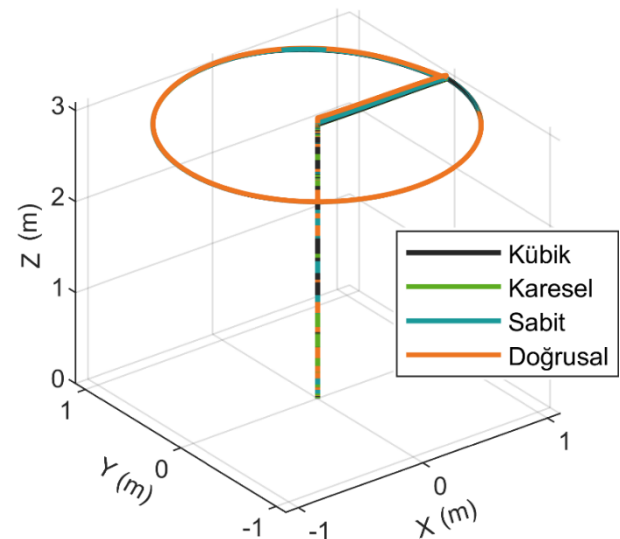
Çizelge 7. PID Katsayıları (PID Coefficients)

Açıklama	Yunuslama, Yuvarlanma	Sapma	Yükseklik (Z)	Yanal Konumlar (X,Y)
P	5	25	110	45
I	1.15	0	40	0
D	2	9.2	40	25

6. BULGULAR VE TARTIŞMA (FINDINGS AND DISCUSSION)

Deneyel olarak bulunan pervanelerin itme ve tork kuvvetlerinden, dört farklı regresyon yöntemi ile sekiz farklı regresyon denklemi elde edilmiştir. Kübik, karesel, sabit katsayılı ve doğrusal regresyon yöntemleri ile elde edilen denklemler Simulink modeline ayrı ayrı uygulanmıştır. Bu model quadrotorun zeminden 3 metre yükseldikten sonra 2 metre çapında bir daire çizerek

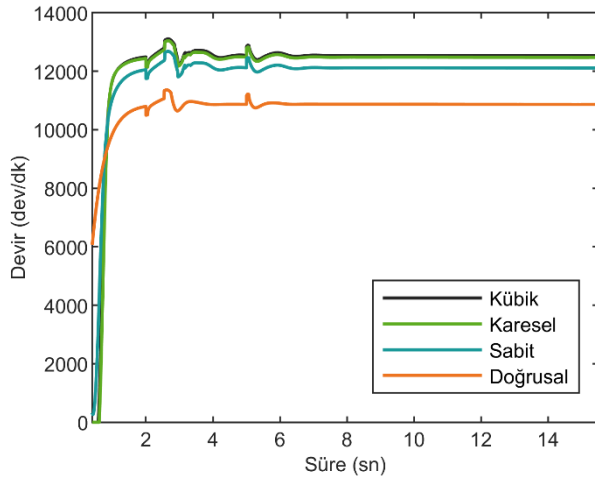
şekilde rotalandırılmıştır. Farklı regresyon yöntemlerinden elde edilen denklemlerinin Simulink modeline uygulanması sonucunda simülasyonlarda önemli bir fark gözlenmemiştir (Şekil 6).



Şekil 6. Regresyon yöntemlerine göre yörünge takibi (Trajectory tracking with respect to regression methods)

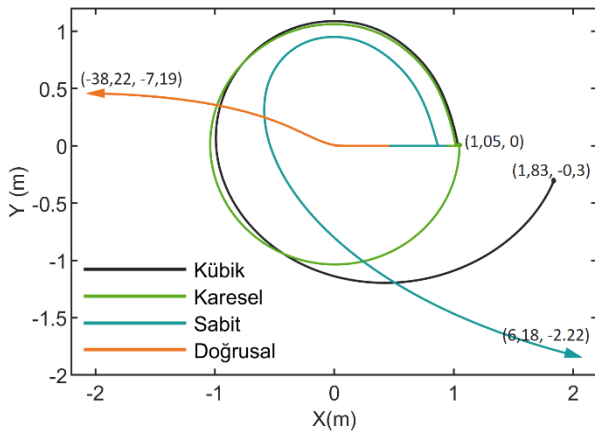
Hava gibi düşük sürtümlü bir ortamda hareket eden Quadrotor, küçük devir hatalarında bile pozisyonunun değişeceğini düşünürsek Şekil 6'daki durum gerçekleşemez. İtme ve tork kuvvetinin yaklaşık %5 hatalı olduğu doğrusal regresyon denklemi ile re-kare oranının %100 olduğu regresyon denklemlerinin aynı simülasyon sonucunu vermesi beklenemez. Şekil 7.'de bu simülasyona ait 1 numaralı motorların devirleri verilmiştir. Şekil 7 incelendiğinde regresyon yöntemine bağlı olarak kübik yöntem ile karesel yöntem sonucu arasında yaklaşık 55 devir, sabit katsayılı yöntem sonucu arasında yaklaşık 426 devir ve doğrusal yöntem arasında yaklaşık 1666 devir fark gözlenmiştir. Havada sabit bir

yükseklikte kalma durumuna göre (7-15 s aralığı) bu farklar gözlemlenmiştir.



Şekil 7. Farklı regresyon yöntemlerine göre, 1 numaralı motorlar için devir sayıları (Rotation speed for motors numbered 1, according to different regression methods)

Simülasyonun gerçeğe en yakın sonucu verebilmesi için regresyon denklemlerinde mutlak toplamın en düşük olduğu, karesel itme kuvveti denklemi ve kübik tork kuvveti denklemi kullanılarak yeni bir Simulink modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan hata oranı daha düşük olan bu modele, önceki simülasyonda elde edilen devir sayıları uygulanmış ve Şekil 8’teki grafik elde edilmiştir.



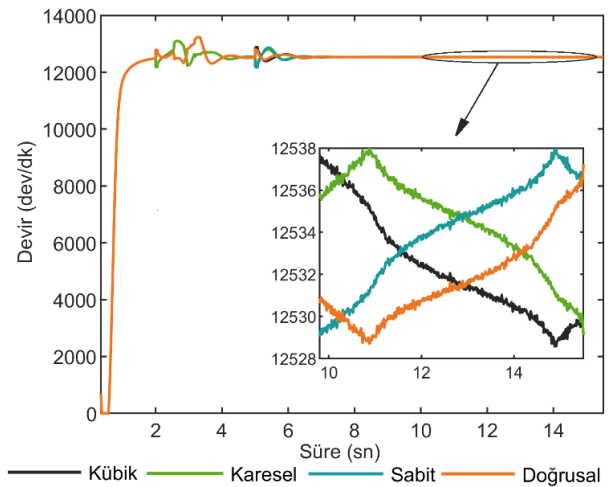
Şekil 8. Regresyon yöntemlerine göre düzeltilmiş yörünge takibi (Corrected trajectory tracking according to regression methods)

Şekil 8’den de anlaşılacağı üzere regresyon yönteminin doğru seçilmesi oldukça önemlidir. Karesel itme kuvveti denklemi ve kübik tork değeri denkleminin kullanılması ile hata oranı azaltılmıştır. Hata oranı azaltılmış bu Simulink modeli ve regresyonlardan elde edilen modeller arasında şu farklılıklar gözlemlenmiştir;

- Karesel yöntemde X ekseninde 0,05m hata ve Y ekseninde hata yoktur.

- Kübik yöntemde X ekseninde 0,83m’lik ve Y ekseninde 0,3m’lik hata bulunmaktadır.
- Sabit katsayılı yöntemde X ekseninde 5,18m’lik ve Y ekseninde 2,22m’lik hata bulunmaktadır.
- Doğrusal Yöntemde X ekseninde -39,22m’lik ve Y ekseninde -7,19m’lik hata gözlemlenmiştir.

Dönme hareketinin tam olarak gerçekleştirilebilmesi için quadrotorun 4 rotorundaki devir sayılarına ait grafik şekil 9’de verilmiştir. Şekil 9 incelendiğinde quadrotorun 2 metre çapındaki bir rotayı 0,6 m/s hızında takip edebilmesi için rotorlar arasında yaklaşık olarak 10 devir farklılık olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum istenilen itme kuvveti ve tork değerinin elde edilmesinde, devir sayısının hata payı düşük olacak şekilde hesaplanmasının önemi ortaya koymaktadır.



Şekil 9. Yörünge takibinde quadrotor rotorlarının devir sayıları (Rotation speed of quadrotor’s rotors in trajectory tracking)

7. SONUÇLAR (RESULTS)

Bu çalışmada, İHA’lar arasında son zamanlarda kullanımı giderek yaygınlaşan quadrotor motorlarının DGM sinyaline bağlı olarak devir sayıları tahmininde kullanılan momentum teoreminin yeterliliği araştırılmıştır. Bu kapsamda devir sayılarının tahmininde dört farklı regresyon yöntemi kullanılmış ve itme ve tork kuvvetlerine ait 8 denklem elde edilmiştir. Bu denklemler quadrotor modeline uygulanarak, quadrotorun rota takibindeki hataları araştırılmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlara göre;

- Regresyon analizinde hataların mutlak toplamının en düşük olma durumuna göre değerlendirildiğinde, en düşük hatalı yörünge takibi gerçekleşmektedir.
- Karesel regresyon denklemi rota takibinde sadece X ekseninde 0,05m hata ile en doğru sonucu verirken, doğrusal regresyon denklemi X ekseninde -39,22m’lik ve Y ekseninde -7,19m’lik hata ile en yüksek hatayı vermiştir.

- Literatürde quadrotorların motor devirlerinin tahmininde kullanılan sabit katsayılı regresyon denkleminde göre X ekseninde 5,18m'lik ve Y ekseninde 2,22m'lik hata bulunmaktadır.
- En doğru sonucu vermesi beklenen Kübik regresyon denkleminde göre X ekseninde 0,83m'lik ve Y ekseninde 0,3m'lik hata bulunmaktadır.
- GPS gibi lokasyon kontrolü olmayan İHA'lar için, itme ve tork kuvveti tahminindeki küçük hatalar rotasyon takibinde büyük hatalara dönüşmektedir.
- Regresyon analiz sonuçlarına göre kübik, karesel ve sabit katsayılı denklemler, yüksek R^2 değerlerine sahip olmasına rağmen hava gibi düşük sürtünmeli ortamlarda büyük hatalara dönüşebilmektedir.

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.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Chen X., Zhang. M., and Yang Y.-D., "Study of an Intelligent PID Attitude Controller for UAV", *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 6: 76-83, (2003).
- [2] Lee D., Kim H. J., and Sastry S., "Feedback linearization vs. adaptive sliding mode control for a quadrotor helicopter", *International Journal of Control Automation and Systems*, 7(3): 419-428, (2009).
- [3] Nicol C., Macnab C. J. B., and Ramirez-Serrano A., "Robust neural network control of a quadrotor helicopter", *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, Niagara Falls, 1233-1237, (2008).
- [4] Santos M., López V., and Morata F., "Intelligent fuzzy controller of a quadrotor", *IEEE International Conference on Intelligent Systems and Knowledge Engineering*, Dalian, 141-146, (2010).
- [5] Madani T. and Benallegue A., "Adaptive control via backstepping technique and neural networks of a quadrotor helicopter", *IFAC Proceedings Volumes*, 41(1): 6513-6518, (2008).
- [6] Bouabdallah S. "Design and control of quadrotors with application to autonomous flying", *Ph.D Thesis*, École Polytechnique and Federale De Lausanne, Siegwart, Roland, (2007).
- [7] Tomashevich S. and Belyavskiy A., "Passification Based Simple Adaptive Control Of Quadrotor", *IFAC-PapersOnLine*, 49(13): 281-286, (2016).
- [8] Shao X., Liu J., and Wang H., "Robust back-stepping output feedback trajectory tracking for quadrotors via extended state observer and sigmoid tracking differentiator", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 104: 631-647, (2018).
- [9] Cabecinhas D, Cunha R., and Silvestre C. "A trajectory tracking control law for a quadrotor with slung load", *Automatica*, 106: 384-389, (2019).
- [10] Ryll M., Bulthoff H. H., and Giordano P. R., "A Novel Overactuated Quadrotor UAV: Modeling, Control and Experimental Validation", *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 23(2): 540-556, (2015).
- [11] T. P. Shenoy, K. Praveen Shenoy, L. Khan, S. Aziz, S. Afran, and K. Kumar, "Design and development of a novel triphibian quadcopter," *International Journal of Engineering & Technology*, 7(2.21): 1-4, (2018).
- [12] Oosedo A., Konno A., Matsumoto T., Go K., Masuko K., and Uchiyama M., "Design and attitude control of a quadrotor tail-sitter vertical takeoff and unmanned aerial vehicle", *Advanced Robotics*, 26(3-4): 307-326, (2012).
- [13] Nandakumar G., Srinivasan A., and Thondiyath A., "Theoretical and Experimental Investigations on the Effect of Overlap and Offset on the Design of a Novel Quadrotor Configuration, VOOPS", *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 92(3-4): 615-628, (2018).
- [14] Badr S., Mehrez O., and Kabeel A. E., "A novel modification for a quadrotor design", *International Conference on Unmanned Aircraft Systems*, Dallas, 702-710, (2016).
- [15] Leishman, J. G., "Principles of helicopter aerodynamics", Cambridge Aerospace Series, *Cambridge University Press*, (2016).
- [16] Ercan Y., "İleri dinamik", ISBN: 978-605-030-981-2, (2014).