

Genetik Algoritma Tabanlı Kesirli ve Tam Dereceli PID Kontrol Edicilerin Bir Uçak Modeli Üzerinde Karşılaştırılması

Comparison of Fractional and Integer Order PID Controllers on Aircraft Model using Genetic Algorithm

Gökhan Altıntaş¹, Yücel Aydın²

¹Elektrik Mühendisliği Bölümü
İstanbul Teknik Üniversitesi
altintasgo@itu.edu.tr

²Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Bölümü
İstanbul Teknik Üniversitesi
aydinyu@itu.edu.tr

Özet

Bu çalışma bir uçağın yunuslama açısını kontrol edecek özişler pilot (oto pilot) için kesir dereceli PID ve tam dereceli geleneksel PID kontrol edici (kontrolör) tasarımını içermektedir. İlk olarak uçağın irtifa dümeni ile yunuslama açısı arasındaki modeli çıkartılmıştır. Elde edilen modele kontrol edici tasarlamak için doğadan esinlenen algoritmalarından olan genetik algoritmadan yararlanılmıştır. Seçilen uygunluk fonksiyonunu minimum yapacak şekilde kontrol edici parametreleri belirlenmiştir. Belirlenen parametrelerle sistemin davranışı incelenmiş olup buna ek olarak kontrol edici parametrelerinin değişimiyle sistemin davranışındaki değişimler de belirlenmiştir. Tasarlanan kontrol edicilerin farklı çalışma noktalarındaki davranışları incelenerek tam dereceli ve kesir dereceli PID kontrol ediciler karşılaştırılmıştır.

Abstract

In this study, a model related between pitch angle and elevator deflection angle of an aircraft is derived. Based on this model integer order and fractional order PID controller is designed. Genetic algorithm is used as optimization method to determine the controller parameters. Fitness function is evaluated during the optimization process to find controller coefficients to minimize. Controllers are tested in steady and variable reference input condition and their performance index are compared. Also fractional parameters variation effects are analyzed.

1. Giriş

Kontrol sistemleri gelişen teknolojiyle birlikte her ihtiyaca karşılık verebilecek duruma gelmiş olup günlük hayatta birçok alanda kullanılmaktadırlar. Kontrol sistemleri olarak günümüzde endüstriyel kullanımda ve araştırma amaçlı olarak en çok incelenen kontrol ediciler oransal-integral-türev operatörlerden oluşan PID kontrol edicilerdir. PID kontrol

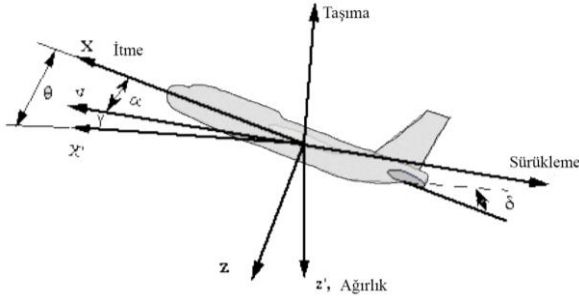
ediciler tasarımcı tarafından sistemin istenen davranışı göstermesi amacıyla tasarlanırlar ancak PID kontrol ediciler barındırdığı üç terimle sistemin istenen davranışı göstermesini her zaman sağlayamayabilirler [1]. Üç parametreden oluşan bu PID kontrol ediciler tam dereceli PID (TDPID) kontrol ediciler olarak adlandırılırlar. Kesir dereceli PID (KDPID) kontrol ediciler TDPID kontrol edicilere ek olarak ekstrasdan iki parametre daha içererek tasarımcıya beş parametre ayarlama imkanı vermektedirler. Kesirli ifadelerin matematiksel çözümlemeleri bu yapının temelini oluşturur. Bu temel ise 1695'te L'Hospital'in yazdığı mektuba kadar dayanmaktadır [2]. 1971 yılında Caputo 1988 yılında ise Oustaloup kesir dereceli türev ve integral operatörlerini kontrol sistemlerine dahil etmiştir [3]. Yakın geçmişte Podlubny KDPID kontrol edicileri ve kesir dereceli sistemleri incelemiştir [4]. Bundan sonra KDPID kontrol edicileri içeren birçok çalışma yapılmıştır [5-6]. TDPID kontrol ediciler K_p , K_i ve K_d olmak üzere üç terimden oluşurken KDPID kontrol edicilerde sırasıyla integral operatörünün derecesi ve türev operatörünün derecesi olmak üzere λ ve μ terimleri de bulunmaktadır. Bu da optimizasyon sürecinde uygunluk fonksiyonunun beş değişkene bağlı olmasını sağlayarak daha esnek tasarımlara imkan vermektedir [7].

Bu çalışmada TDPID ve KDPID kontrol edicilerden kısaca bahsedilerek bu kontrol edicilerin uygulanacağı uçak modeli elde edilmiştir. Elde edilen modelin istenen davranışı sağlayabilmesi amacıyla kontrol edici parametreleri genetik algoritma kullanılarak bulunmuştur. Kontrol edici parametrelerini bulmak için uygunluk fonksiyonu olarak integral mutlak hata ve integral karesel hata seçilmiştir. Uygunluk fonksiyonunu minimum yapan TDPID ve KDPID kontrol edici parametreleri bulunmuştur. Kontrol edici parametrelerinin değişimiyle sistemin davranışındaki değişim gözlenerek tasarlanan kontrol edicilerin farklı çalışma noktalarındaki davranışları incelenmiştir.

2. Uçağın Matematiksel Modeli

Bu çalışmada uçağın özişler pilot (oto pilot) tarafından kontrol edildiği durum göz önüne alınarak uçağın irtifa sapma açısı

giriş işareti, yunuslama açısı çıkış işareti olmak üzere ilgili transfer fonksiyonu bulunmuştur. Uçağın hareketini belirten matematiksel ifadeler karmaşık ve diferansiyel eşitliklerden oluşmaktadır. Bazı kabuller altında bu ifadeler basitleştirilebilir. Şekil 1’de uçağın hareketine etkileyen kuvvetler gösterilmiştir [8].



Şekil 1: Uçağa etkileyen kuvvetler.

Çizelge 1: Hareket açılarının adlandırılması

Sembol	Adı
α	Hücum açısı
γ	Rota açısı
δ	İrtifa sapma açısı
θ	Yunuslama açısı

Çizelge 1’de ise bu açıların isimlerine yer verilmiştir. Uçağın uzunlamasına dinamik denklemleri aşağıda verilmiştir [8].

$$\dot{\alpha} = \mu\Omega\sigma[-(C_L + C_D)\alpha + \frac{1}{(\mu - C_L)}q - (C_W \sin \gamma)\theta + C_L] \quad (1)$$

$$\dot{q} = \frac{\mu\Omega}{2I_{yy}}[[C_M - \eta(C_L + C_D)]\alpha + [C_M + \sigma C_M(1 - \mu C_L)]q + (\eta C_W \sin \gamma)\delta] \quad (2)$$

$$\dot{\theta} = \Omega q \quad (3)$$

Bu denklemlerde C_T , C_D , C_L , C_W , C_M itme, sürüklenme, taşıma, ağırlık ve moment sabitleridir. μ havanın yoğunluğuna bağlı, Ω ise uçuş denge hızına bağlı sabitlerdir [9].

Denklemlerde x ve y koordinat düzlemlerindeki karşılıklı kuvvetlerin birbirine eşit olduğu ve yunuslama açısındaki değişimin uçağın hızını değiştirmedığı kabul edilmiştir. Diferansiyel denklem takımlarında sayısal büyüklükler yerine koyulursa elde edilen yeni denklem takımları aşağıdaki gibi olur.

$$\dot{\alpha} = -0.313\alpha + 56.7q + 0.232\delta \quad (4)$$

$$\dot{q} = -0.0139\alpha - 0.426q + 0.0203\delta \quad (5)$$

$$\dot{\theta} = 56.7q \quad (6)$$

Bu diferansiyel denklem takımlarının laplace dönüşümü alınırsa irtifa dümeni ile yunuslama açısı arasındaki şu transfer fonksiyonu elde edilir.

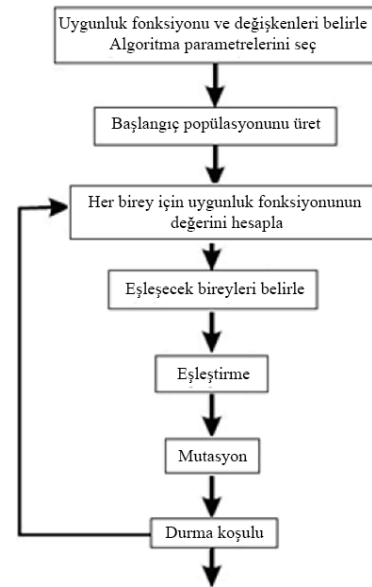
$$P(s) = \frac{\Theta(s)}{\Delta(s)} = \frac{1.151s + 0.1774}{s^3 + 0.739s^2 + 0.921s} \quad (7)$$

Bulunan transfer fonksiyonunda giriş işareti açı olarak radyan cinsinden verilecektir. Emniyetli uçuş için bu açının -45 derece ile +45 derece arasında kalması istenir [10]. Buna göre ilk olarak giriş işareti 17 dereceye karşı düşen 0.3 radyan olarak alınacaktır.

3. Kontrol Edici Tasarımları

3.1. Genetik Algoritma

Kontrol edici tasarımlarında sisteme uygulanan referans işareti ile çıkış işareti arasındaki fark, hata işareti, kontrol ediciün giriş işareti olur. Kontrol edici bu hata işaretinin büyüklüğüne göre bir çıkış üreterek bunu sisteme uygular. Bu hata işaretini minimum yaparak çıkış işaretinin referans işareti takip etmesi dolayısıyla da istenen davranışı göstermesi istenir. Hata işaretine bağlı olarak belirlenen uygunluk fonksiyonlarını minimum yaparak kontrol edici parametreleri bulunur. Bunun için genetik algoritma kullanılacaktır. Genetik algoritma doğadan esinlenen bir algoritma olup doğal seçim ilkelerine dayanmaktadır [11]. Algoritmayı özetleyen akış diyagramı Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2: Genetik algoritma akış diyagramı.

Çizelge 2’de kullanılan genetik algoritma parametreleri verilmiştir.

Çizelge 2: Genetik algoritma parametreleri

Parametre	Büyüklük
Popülasyon	50
Durdurma Kısıtı	10^{-6}
Zaman Limiti	-
Nesil Sayısı	50

3.2. Uygunluk Fonksiyonları

Kontrol edici tasarımlarında temel olarak kullanılan birçok uygunluk fonksiyonları bulunmaktadır. Bunların başlıcaları aşağıdaki eşitliklerde verilmiştir.

$$ISE = \int e(t)^2 dt \quad (8)$$

$$IAE = \int |e(t)| dt \quad (9)$$

$$ITSE = \int t [e(t)]^2 dt \quad (10)$$

$$ITAE = \int t |e(t)| dt \quad (11)$$

Sadece bu uygunluk fonksiyonları kullanılabileceği gibi bu temel fonksiyonların bir araya getirilerek tasarımcı tarafından oluşturulabilecek fonksiyonlar da kullanılabilir. Bu çalışmada uygunluk fonksiyonu olarak ISE ve IAE kullanılmıştır.

3.3. Kesir ve Tam Dereceli PID Kontrol edici Tasarımları

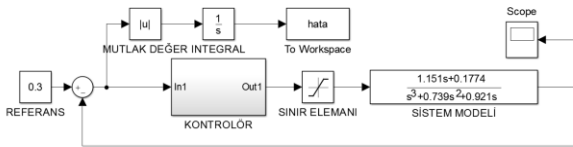
Aşağıdaki eşitliklerde sırasıyla TDPID ve KDPID kontrol edicilerin matematiksel ifadelerine yer verilmiştir.

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (12)$$

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s^\lambda} + K_d s^\mu \quad (13)$$

KDPID kontrol ediciün benzetiminde 5.derece CRONE açılımından yararlanılmaktadır.

Sistemin modellenmesi ve benzetim uygulamaları MATLAB/Simulink ortamında yapılmıştır. Şekil 3'te kurulan benzetim ortamına yer verilmiştir.



Şekil 3: Benzetim modeli.

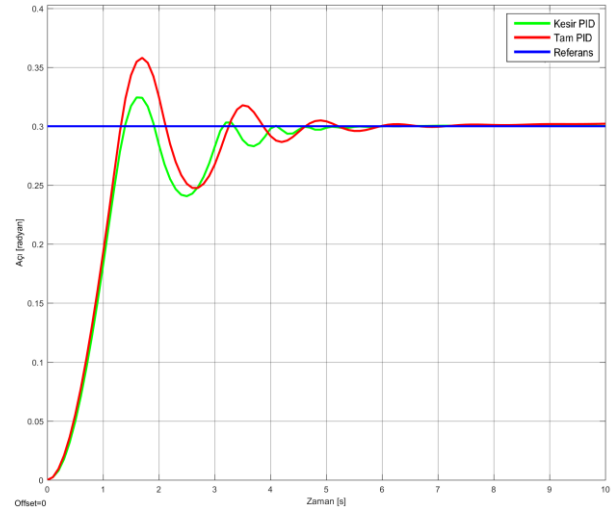
Genetik algorithmada TDPID kontrol edici için kullanılan alt ve üst sınırlar K_p , K_i ve K_d için $[0 \ 0 \ 0] - [100 \ 100 \ 100]$ şeklindedir. KDPID kontrol edici içinse bu sınırlar sırasıyla K_p , K_i , μ , K_d ve λ olmak üzere $[0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] - [100 \ 100 \ 1 \ 100 \ 1]$ şeklindedir. μ ve λ değerlerinin 1 ile sınırlandırılmasının sebebi Crone açılımı yapıldığında bu sayıların 1'den büyük olması durumunda kontrol ediciün sıfır sayısı kutup sayısından yüksek olmaktadır. Bu da sistemin nedensel olmamasına yol açmaktadır.

3.3.1. Uygunluk Fonksiyonun IAE Olması Durumunda

TDPID ve KDPID kontrol ediciler için 17 derecelik giriş için sistemin cevabı ise aşağıdaki Şekil 4'teki gibidir. Uygunluk fonksiyonu değerleri ise sırasıyla 0.3268, 0.3746'tır. Kontrol edicilerin parametreleri ve sistem cevabının karakteristiklerine ise Çizelge 3'te yer verilmiştir.

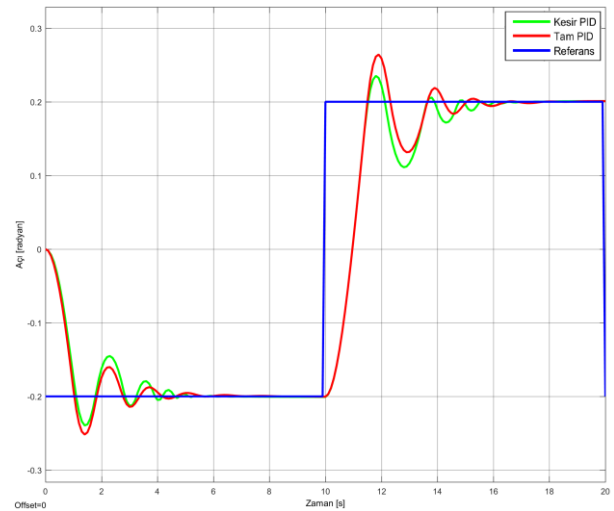
Çizelge 3: Kontrol edici parametreleri ve sistem karakteristikleri

	K_p	K_i	λ	K_d	μ	Aşım [%]	Yerleşme & Yükselme Zamanı [s]-[ms]
TD PID	6.91	3.18	-	1.07	-	19.8	8.7- 847
KD PID	43.45	2.28	0.84	83.5	0.13	8.1	7.1 - 876



Şekil 4: KDPID ve TDPID ile kapalı çevrim sistem cevapları.

Sistem cevabından ve uygunluk fonksiyonu değerinden de anlaşılacağı üzere KDPID kontrol edici daha iyi bir cevap vermiştir. Tasarlanan bu kontrol edicilerle kapalı çevrim sistemin -11 derece ve +11 derecelik değişken giriş işaretine yanıtları ise Şekil 5'teki gibidir.



Şekil 5: Değişken referans işaretine kapalı çevrim sistem cevapları.

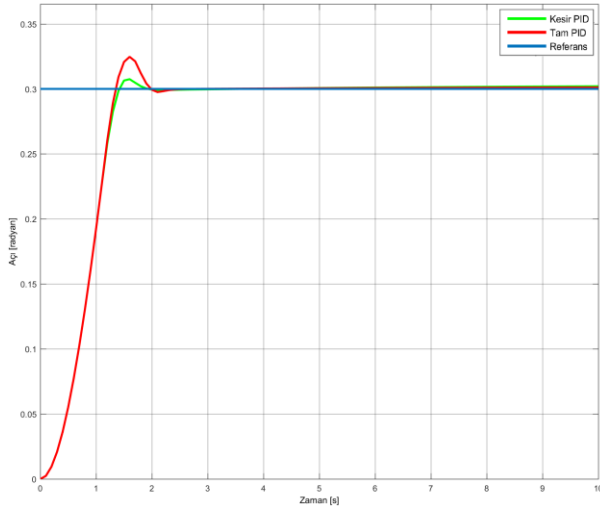
Tasarlanan kontrol edicilerin değişken giriş işareti olması durumunda referans işareti takip ettikleri görülmüştür.

3.3.2. Uygunluk Fonksiyonun ISE Olması Durumunda

Uygunluk fonksiyonu ISE olarak ayarlanarak KDPID ve TDPID kontrol ediciler aynı optimizasyon algoritmasıyla tasarlanmıştır. Bulunan kontrol edici parametreleri ve sistem cevabı karakteristikleri aşağıdaki Çizelge 4'teki gibi bulunmuştur. Sistemin 17 derecelik referans işaretine cevabı ise Şekil 6'daki gibidir. Uygunluk fonksiyonu değerleri ise KDPID için 0.0580 iken TDPID için bu değer 0.0581'dir.

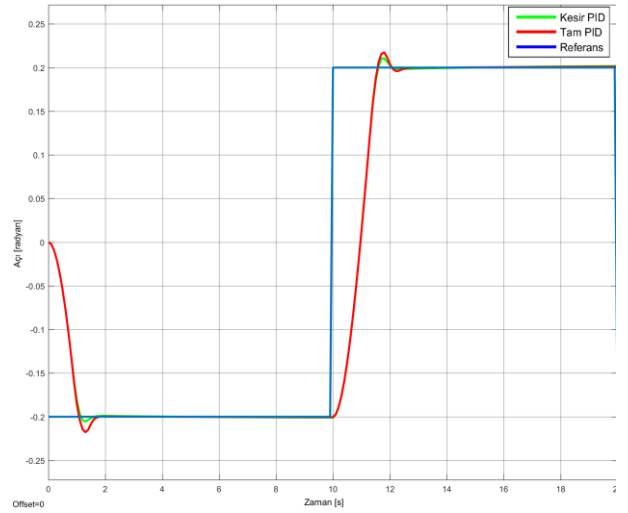
Çizelge 4: Kontrol edici parametreleri ve sistem karakteristikleri

	Kp	Ki	λ	Kd	μ	Aşım [%]	Yerleşme & Yükselme Zamanı [s]-[ms]
TD PID	84.11	0.43	-	14.95	-	2.5	4.6 - 880
KD PID	62.02	2.16	0.94	68.4	0.14	1.5	4.1 - 887



Şekil 6: KDPID ve TDPID ile kapalı çevrim sistem cevapları.

Uygunluk fonksiyonu olarak ISE kullanıldığında bulunan kontrol edici parametreleri ile sistemin cevabının daha iyi olduğu söylenebilir. Sistemin -11 derece ile +11 derece sınırları arasındaki değişken işarete yanıtı ise Şekil 7'deki gibidir.

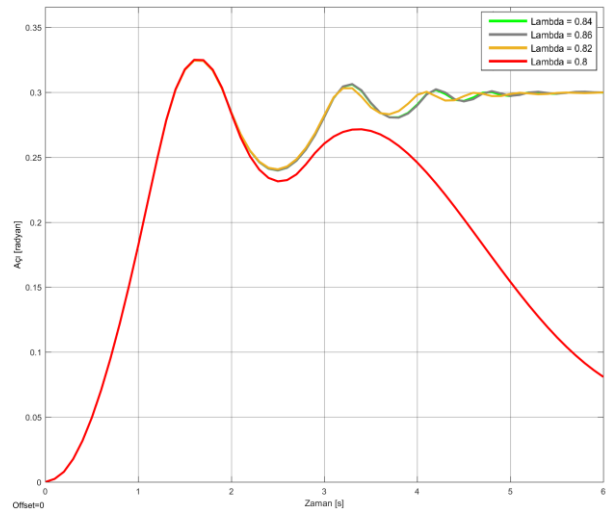


Şekil 7: Değişken referans işaretleri ile kapalı çevrim sistem cevapları.

Değişken referansa kapalı çevrim sistem yanıtının 17 derecelik çalışma noktasındaki yanıtıyla aynı olduğu görülmektedir.

3.3.3. KDPID Kontrol Edici Parametrelerinin Değişiminin Etkisi

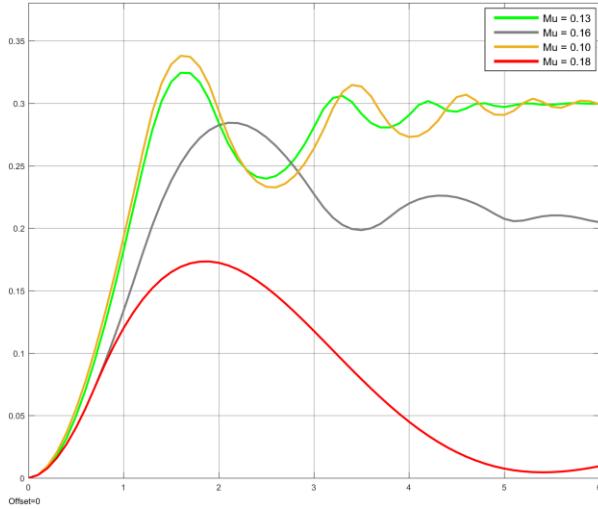
Bu kısımda KDPID kontrol edicinin parametrelerinin değişimiyle sistem cevabında meydana gelen değişimler incelenmiştir. Özellikle kesir derece parametrelerinin değişiminin meydana getireceği etkilere bakılmıştır. IAE uygunluk fonksiyonu ile tasarlanan kontrol edici parametreleri olarak bulunmuştu. Bu parametrelerden Kp, Ki, Kd sabit tutularak kesir dereceleri belirten λ ve μ ifadeleri değiştirilmiştir. İlk önce μ sabit tutularak λ operatörü değiştirilmiştir. λ operatörünün değişimiyle kapalı çevrim sistem yanıtının değişimine Şekil 8'de yer verilmiştir.



Şekil 8: λ operatörünün değişimiyle sistem yanıtının değişimi.

λ operatörünün yükselmesiyle sistem yanıtında aşım, yerleşme zamanı gibi karakteristiklerin değiştiği ancak λ operatörünün değerinin azalması halinde ise sistem cevabının yükselme durumundan sonra referans işareti takip edemeyerek kararsızlığa gittiği görülmektedir.

Sonraki durumda ise λ sabit tutularak μ operatörünün değişimi incelenmiştir. μ operatörünün değişimiyle kapalı çevrim sistem yanıtının değişimine Şekil 9'da görüldüğü gibidir.



Şekil 9: μ operatörünün değişimiyle sistem yanıtının değişimi.

μ değerinin azaltılmasıyla sistem yanıtında meydana gelen değişiklikler aşım, yerleşme zamanı, yükselme zamanı gibi karakteristiklerdedir. μ değerinin artmasıyla birlikte sistem kararsızlığa gitmektedir.

İki durum arasındaki dikkat çekici bir husus ise λ operatörünün değişimiyle sistemin kararsızlığa gittiği durumda dahi sistemin yükselme zamanının hemen hemen aynı kaldığı ancak μ operatörü değiştiğinde sistemin yükselme zamanı da değişmektedir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada bir uçağın irtifa sapma açısıyla yunuslama açısı arasındaki matematiksel model elde edilerek modellenen sistem üzerine kesir dereceli ve tam dereceli PID kontrol ediciler tasarlanmıştır. Bir çalışma noktası referans girişi olarak alınarak tasarlanan kontrol edicilerin çalışma karakteristikleri farklı değişken çalışma noktalarında da gözlenmiştir. Kesir derecelerini oluşturan operatörlerin değişimiyle sistem yanıtındaki değişim incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda uçak modeli üzerinde kesir dereceli PID kontrol edicilerin tam dereceli PID kontrol edicilere göre daha iyi sonuç verdiği görülmüştür..

5. Kaynaklar

- [1] Sierociuk, D., Macias, M., "Comparison of variable fractional order PID controller for different types of variable order derivatives," *Carpathian Control Conference (ICCC)*, 2013 14th International, Rytro, 2013, pp. 334-339.
- [2] Caponetto, R., Fortuna, L., Porto, D., Parameter Tuning of A Non-Integer Order PID Controller, *15th*

International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems, 2002, Notre Dame, Indiana

- [3] I. Podlubny, Fractional-Order Systems and PID Controllers, *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 44, no. 1, pp. 208–214, 1999
- [4] Vinagre, B. M., Podlubny, I., Hernandez, A., Feliu, V., 2000. Some Approximations of Fractional Order Operators Used in Control Theory and Applications. *Fractional Calculus and Applied Analysis*, Vol. 3, no. 3, pp. 231-248.
- [5] Monje, C. A., Vinagre, B. M., Chen, Y. Q., Feliu, V., Lanusse, P., Sabatier, J., 2005. Optimal Tunings for Fractional $PI^{\lambda}D^{\mu}$, *Fractional Derivatives and Their Applications*. Le Mehauté, A., Tenreiro Machado, J. A., Trigeassou, J. C., Sabatier J. (eds.) Ubooks, Augsburg Vol. 3, pp. 675-686.
- [6] A. Ltifi, M. Ghariani and R. Neji, "Performance comparison on three parameter determination method of fractional PID controllers," *Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)*, 2013 14th International Conference on, Sousse, 2013, pp. 453-460.
- [7] D. V. Dev and S. U. Kumari, "Modified method of tuning for fractional PID controllers," *Power Signals Control and Computations (EPSCICON)*, 2014 International Conference on, Thrissur, 2014, pp. 1-6.
- [8] Changmao, Q., Naiming, Q., Zhiguo, S. "Fractional PID controller design of hypersonic flight vehicle," *2010 International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering*, Changchun, 2010, pp. 466-469.
- [9] R. Lungu, M. Iancu, S. Ispas and M. Lungu, "Adaptive control of the aircraft pitch angular motion by using the dynamic inversion principle," *Applied and Theoretical Electricity (ICATE)*, 2012 International Conference on, Craiova, 2012, pp. 1-5.
- [10] Torabi, D., Karsaz, A., Mashadi, S. " Design of Modern and Predictive Controllers for Aircraft Control System" *Latest Trends in Circuits, Systems, Signal Processing and Automatic Control*, Salerno, 2014, pp. 344-348.
- [11] Altintas, G., Kesir Dereceli PID Kontrolör Tasarımı, 2016, İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisans Tezi