

DÖRT ROTORLU İNSANSIZ HAVA ARACI İÇİN DENGELEYİCİ OTOPİLOT TASARIMI

Övünç Elbir¹, Coşku Kasnakoğlu¹

¹Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Ankara
{oelbir, kasnakoglu}@etu.edu.tr

Özetçe

Günümüzde tehlikeli alanlarda arama ve kurtarma, haritalama, gözlem, ürün taşıma ve teslimi veya hedef tespiti ve takibi gibi çeşitli kullanım alanlarına sahip olan İHA'lar malzeme bilimi ve üretim alanlarındaki gün geçtikçe artan gelişmeler sayesinde daha farklı alanlarda ve daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Döner kanat İHA'lar dikey kalkış-iniş, bulundukları yerde havada asılı kalabilme ve agresif manevra yetenekleriyle ulaşılması zor alanlardaki görevleri rahatlıkla gerçekleştirebilmektedir. Bu görevler esnasında İHA'nın uzaktan kumanda ile pilot tarafından kontrol edilmesi yerine otopilot destekli uçuş moduyla yer istasyonu başındaki pilot tarafından veya tam otonom uçuş ile pilot olmadan kontrol edilmesi pilot hatalarının önüne geçmekle kalmayıp pilotun İHA'nın görev yerinden bağımsız olarak İHA'yı kontrol etmesine imkan tanımakta; aynı zamanda herhangi bir pilota ihtiyaç duymadan ön tanımlı görevlerin yerine getirilmesini mümkün kılmaktadır. Bu çalışmada bir dört rotorlu hava aracı için özgün bir otopilot sistemi geliştirilmiş, sistemin tasarımı, bileşenleri ve işleyişi üzerinde durulmuştur.

1. Giriş

İnsansız Hava Araçlarının (İHA) kullanım alanları, batarya ömürlerinin artışı ve elektronik uçuş elemanlarının (sensörler, mikroişlemci vs.) ucuzlaması ile gün geçtikçe artmaktadır[1]. Günümüzde hedef tespit ve takibi, gözetleme, tehlikeli alanlarda arama ve kurtarma, zirai ilaçlama, trafik takibi ve haritalama gibi askeri veya sivil birçok farklı alanda kullanım bulmaktadırlar[2-3].

İnsansız hava araçları uzaktan kontrol ile kumanda edilebildikleri gibi, üzerlerine yerleştirilen otomatik pilot donanımları sayesinde otonom uçuşlar da gerçekleştirebilmektedirler. Sadece bazı kontrol yüzeylerinin otopilot tarafından kontrol edildiği ve halen kullanıcı kontrolleri gerektiren yarı otonom sistemlerin yanında insan faktörünü tamamen ortadan kaldırıp, kalkış, iniş, belirlenen rotada seyrüsefer gibi görevleri tam otonom olarak başarıyla gerçekleştirebilen otomatik pilot sistemleri, insansız hava araçlarında vazgeçilmez hale gelmişlerdir [4-5].

Piyasada farklı algılayıcı ve işlemcilerle donatılmış birçok ticari otomatik pilot sistemi bulunmaktadır. Geliştirmeye tamamen kapalı modeller yanında, yazılımı ve donanımı değişikliklere izin veren açık kaynaklı ve düşük maliyetli

otomatik pilot sistemleri de bulunmakta ve bu sistemlerin araştırma çevrelerince kullanımı büyük bir hızla artmaktadır [6]. Ticari otomatik pilot sistemlerinin büyük bölümünde PID tabanlı kontrolcü algoritmaları kullanılsa da, değişen gereksinimler nedeniyle bulanık mantık (Fuzzy Logic), sinir ağları (Neural Network), LQG (Linear Quadratic Gaussian) tabanlı kontrolcü algoritmaları da sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır [7-8].

Dört Rotorlu İnsansız Hava Araçları uçuş rotasında karşılaşılabilecek birçok problemin, agresif manevra, havada asılı kalma, olduğu yerden kalkıp bulunduğu yere iniş yapabilme gibi yetenekleri ile kolaylıkla üstesinden gelebilir. Agresif manevra yeteneği erişilmesi zor alanlara erişimin sağlanmasını sağlasa da kontrolün zorlaşmasına sebep olmaktadır. Bunlara ek olarak, dört pervane daha fazla yükün taşınabilmesine imkan sağlamasına karşın güç tüketimini artırmaktadır[9].

2. Uygulama ve Yöntem

Dört rotorlu İHA modeli Şekil 1'de görülmektedir.

M_L, M_R, M_F, M_B momentleri pervanelerin dönüşünden

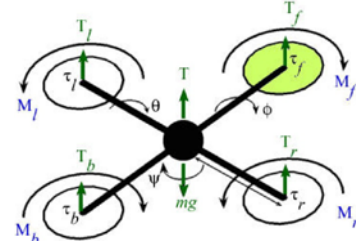
oluşan momentlerdir ve yaw kontrolü için kullanılır. Karşılıklı pervaneler aynı dönüş yönüne ve hatveye sahip oldukları için aynı tarafa doğru moment uygularlar. Motorların dönüşüyle

oluşan, T_L, T_R kuvvetleri ile yalpa kontrolü ve son olarak

T_F, T_B kuvvetleri ile yunuslama kontrolü sağlanır.

$$T = T_L + T_R + T_F + T_B \quad (1)$$

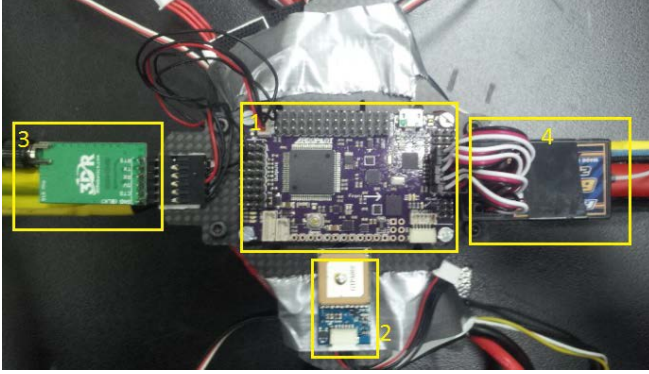
olduğu şekilden açıkça görülebilmektedir.



Şekil 1: Dört Rotor İHA temel kontrol

2.1. Ardupilot

Ardupilot projesi, İnsansız Hava ve Yer Araçları için düşük bütçeli otonom kontrol çözümleri sunan açık kaynak bir projedir. Ardupilot kartı (Şekil 2-1) üzerinde işlemci olarak ATmega 2560, ataletsel ölçüm birimi olarak MPU-6000 bulundurulur. Harici olarak takılabilecek GPS ünitesi (Şekil 2-2), RC modülü (Şekil 2-4) ve 915 MHz telemetri kiti (Şekil 2-3) ile operasyon anında yer istasyonu ile iletişim kurabilir ve konum kontrollü hareket gerçekleştirebilir.



Şekil 2: Ardupilot ve parçaları

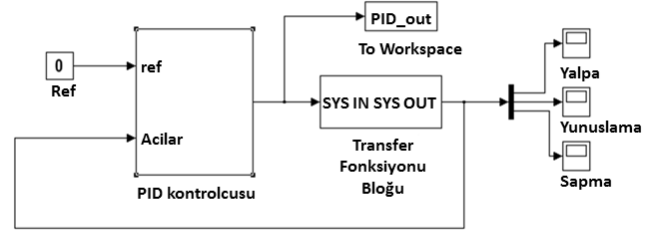
Hem donanım hem de yazılım olarak tamamen açık kaynak olan bu projede, “Ardupilot” isimli yazılım ile döner kanatlar için tam otonom uçuş çözümü ile sunulan bu sistemin “Mission Planner” isimli bir yer istasyonu da bulunmaktadır. Bu çalışmada Ardupilot isimli kart üzerinde koşacak olan yazılım ve yer istasyonu baştan tasarlanmış sadece donanımlar olduğu gibi kullanılmıştır.

2.2 Sistem Tanılama ile Modelin Elde Edilmesi ve Kontrolcü Katsayılarının Yenilenmesi

Tasarlanacak olan otopilot sisteminin Ardupilot kartı üzerinde gerçekleştirileceği ve test edileceği gözönünde bulundurulduğu zaman, ilk önce piyasaya sunulan ürünün(açık kaynak olan Ardupilot yazılımı) test edilmesi mantıklı bir başlangıç olacaktır. Bu sayede markete sunulan ürünle, tasarlanan otopilot arasında kıyas yapılabilecektir. Ardupilot yazılımı ve Mission Planner isimli yer istasyonu uygulamasıyla beraber herhangi bir döner kanat İHA uçurulabilir. Tek yapılması gereken PID katsayılarının ayarlanmasıdır. Deneyisel olarak bu katsayıların ayarlanması genellikle zor ve yorucu bir süreçtir. Bu sebepten dolayı Matlab programının sistem tanılama aracı kullanılarak dört rotor İHA için bir model bulunmuştur.

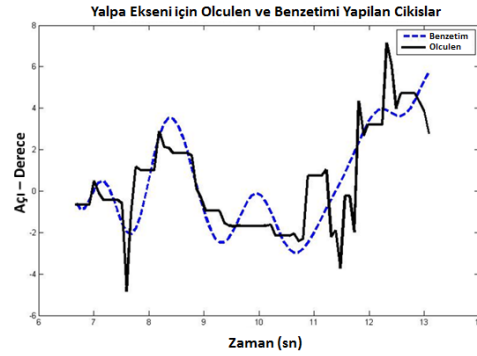
Sistem tanılama aracı, ölçülmüş giriş çıkış değerlerinden, dinamik sistemlerin matematiksel modellerinin elde edilmesini sağlar. Ölçüm değerlerini alabilmek için ilk önce dört rotorlu yerden kaldırabilecek PID değerleri deneyisel olarak bulunmuş ve sonrasında uçuş yapılmıştır. Yapılan uçuşta dört motor PWM değerleri ve dört rotorlu İHA’nın duruşsal değerleri (yalpa, yunuslama ve sapma) kayıt altına alınmıştır. Bu ölçümler ikiye bölünmüş olup; ilk kısmı transfer fonksiyonu adaylarını bulmak için, ikinci kısmı da ilk kısımda bulunduğu transfer fonksiyonu adaylarını doğrulamak için kullanılmıştır. Doğrulama sonucunda ortaya çıkan en yüksek oranlı aday sistemin o açıyla ilgili modeli olarak kabul

edilmiştir. MATLAB Simulink ortamında hazırlanan model Şekil 3’te görülebilir. Bu model Ardupilot yazılımından birebir uyarmamıştır. Transfer fonksiyonları blokları bulunmaya çalışılan bloktur.

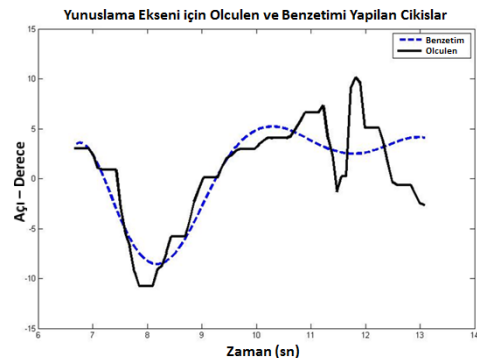


Şekil 3: Orjinal koda göre hazırlanan Simulink modeli

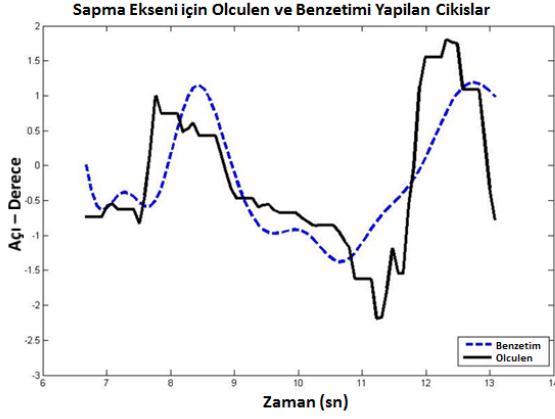
Sistem tanılamadan tahmin edilen sisteme, uçuş esnasında ölçülen giriş değerleri olan PWM değerleri uygulanmıştır. Bu değerler altında sistemin çıktıları ile uçuş esnasındaki duruş verileri kıyaslanmıştır. 3 eksen için ayrı ayrı tahmin edilen sistemler en az %70 benzerlik göstermektedir. Şekil 4, Şekil 5 ve Şekil 6’da sırasıyla yalpa, yunuslama ve sapma eksenleri için ölçülen ve benzetimi yapılan model çıktıları görülebilir.



Şekil 4: Yalpa eksenini için ölçülen ve benzetimi yapılan model çıktıları

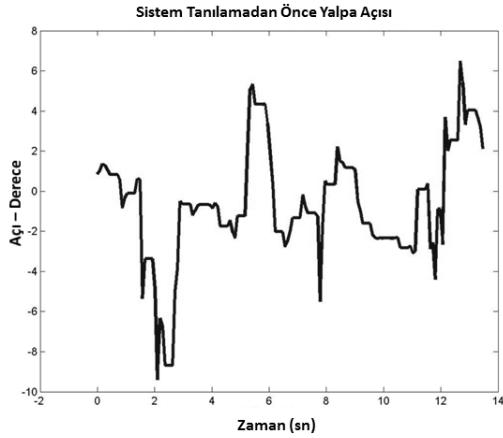


Şekil 5: Yunuslama eksenini için ölçülen ve benzetimi yapılan model çıktıları

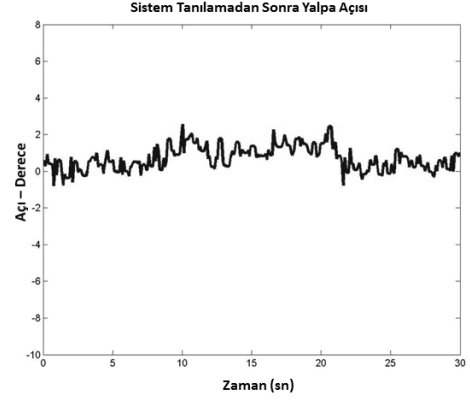


Şekil 6: Sapma eksenini için ölçülen ve benzetimi yapılan model çıkışları

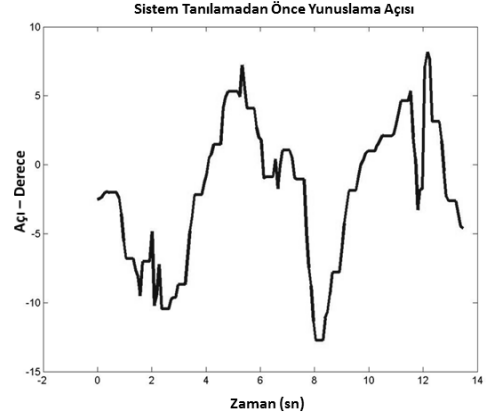
Elde edilen sistem modelleriyle kontrolcü katsayılarını yeniden hesaplamak için Matlab denkleymci dizayn aracı kullanılmıştır. Bu araç verilen kapalı çevrim sistemi lineerleştirilerek istenen değerler arasında sistemi kontrol edecek PID katsayılarını bulmaktadır. Bu işlem sonucunda yalpa ve yunuslama dengeleme için $K_p = 4.00$, $K_i = 0.1418$, yalpa ve yunuslama açısal hız kontrolü için $K_p = 0.1$, $K_i = 0.0$, sapma dengeleme için $K_p = 4.50$, $K_i = 0.0$ ve son olarak sapma açısal hız kontrolü için $K_p = 0.13$, $K_i = 0.015$ bulunmuştur. Bu değerlerle uçuş testi tekrarlanmıştır. Sistem tanılamadan önce ve sonra kayıt altına alınan veriler Şekil 7 -



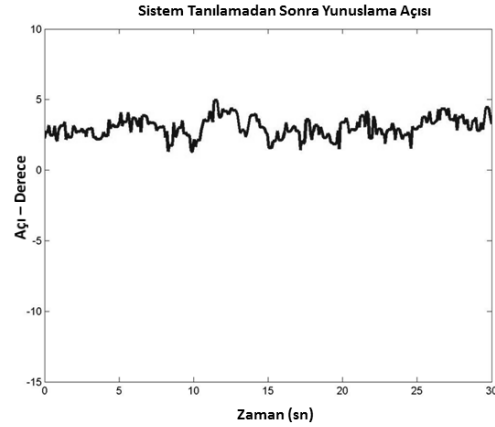
Şekil 7: Sistem tanılamadan önce yalpa açısı



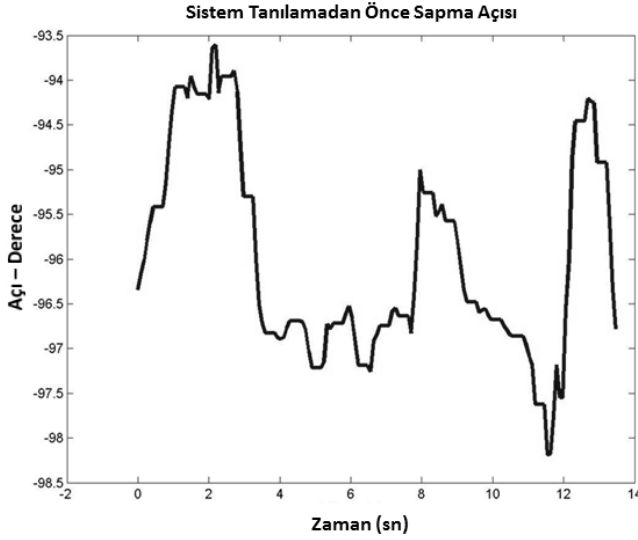
Şekil 8: Sistem tanılamadan sonra yalpa açısı



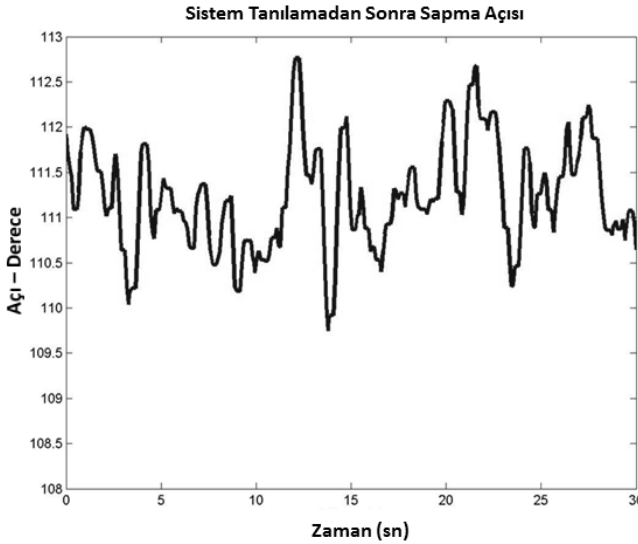
Şekil 9: Sistem tanılamadan önce yunuslama açısı



Şekil 10: Sistem tanılamadan sonra yunuslama açısı



Şekil 11: Sistem tanılamadan önce sapma açısı



Şekil 12: Sistem tanılamadan sonra sapma açısı

Sistem tanılama kullanarak kurulan dört rotor İHA sisteminin modeli çıkarılmış ve bu model kullanılarak MATLAB programında PID katsayıları ayarlanmıştır. Bu işlem sayesinde deneme yanılma yoluyla bulunması çok zor olan en uygun PID katsayıları bulunmuştur. Bu katsayılarla uçuş yapan dört rotor İHA sistemi için daha iyi katsayıların bulunmasından söz etmek çok da mümkün değildir. Bu sebeple piyasaya sunulan ürünün dengeleme kontrolü konusunda sınırları zorlanmıştır denebilir.

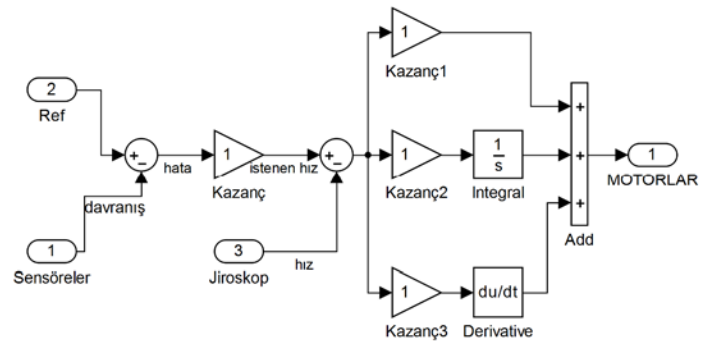
2.3 Dört Rotor İHA Özgün Dengeleme Modu Tasarımı

Ardupilot kontrolcü kartı üzerinde çalışan ve piyasaya sunulan Arducopter yazılımının test ve analiz işlemi bittikten sonra özgün otopilot tasarımının ilk aşaması olan dengeleme modu

kontrolcü tasarımına başlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda yeni bir dengeleme kontrolör tasarlanmıştır.

Şekil 14'te tasarlanan özgün otopilot sisteminin genel blok şeması verilmiştir. Bu blok şema sadece dengeleme modu için değil yakını gelecekte tamamlanması planlanan tam otopilot için de geçerlidir. Blokların işlevlerini açıklayacak olursak;

- Giriş Verileri İşlem Bloğu: Bu blokta kumandadan gelen veriler, ölçümlenen duruşsal veriler, GPS ve yükseklik bilgisi çeşitli eşleştirmelerle manalı hale getirilir.
- Kontrolcüler: Her eksen, yükseklik kontrolü ve noktalar arası otonom uçuş için gerekli olan kontrolcüler bu blokta yer almaktadır.
- Haberleşme Bloğu: APM kartıyla geliştirilen yer istasyonu arasındaki haberleşmeden sorumludur. Duruşsal verileri, konum ve yükseklik verisini, kumandadan gelen veya otonom uçuş modunda otomatik olarak oluşturulan referans verilerini ve zaman bilgisini yer istasyonuna yollar. Yer istasyonundan gelen katsayı güncelleme taleplerini alıp kontrolcüye iletir. Veri havaya çıktığı anda veri kayıpları başladığı için yer istasyonundan gelen talepleri değerlendirip bozuk veri varsa bunu gözardı eder.
- Yer İstasyonu: Uçuş esnasında katsayı güncellemeye, kayıt almaya, uçuş verilerini gözlemlemeye ve haritadan konum takip etmeye imkan veren uygulama aynı zamanda APM kartından gelen paketleri denetleyip bozuk paketleri gözardı eder.
- Çıkış Verileri İşlem Bloğu: Bu blok kontrolcülerden çıkan verileri motorlar için anlamlı hale getiren eşleme işlemlerinden sorumludur.

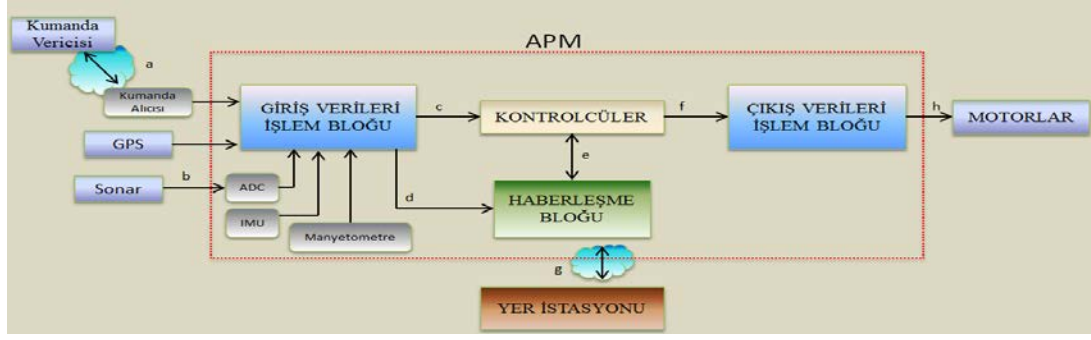


Şekil 13: Tasarlanan Dengeleyici Kontrolör

Tasarlanan kontrolcü Şekil 13'te verilmiştir. Konum kontrolünün istenen bir hız takibi ile yapıldığı blok şemadan da açıkça görülebilir. Tasarlanan kontrolcünün kazanç değerleri Tablo 1'deki gibidir.

Tablo 1: Tasarlanan Kontrolcünün Kazanç Değerleri

	Dengeleme	Hız	Hız	Hız	Max
	k_p	k_p	k_i	k_D	İntegral
Yalpa	4.5	0.52	0.04	0.06	50
Yunuslama	4.5	0.7	0.03	0.035	50
Sapma	10	1	0.04	-	50



Şekil 14: Genel Sistem Blok Şeması

Yalpa ve yunuslama kontrolcüsünün katsayılarının aynı olmamasının sebebi; dört rotorlu İHA'nın kontrolcü tasarımı ve test işlemleri sırasında hasar görmesi ve bu hasarın tamiri sonrasında yalpa pervanelerinin arasında bulunan mesafe ile yunuslama pervanelerinin arasında bulunan mesafeden farklı olmasıdır.

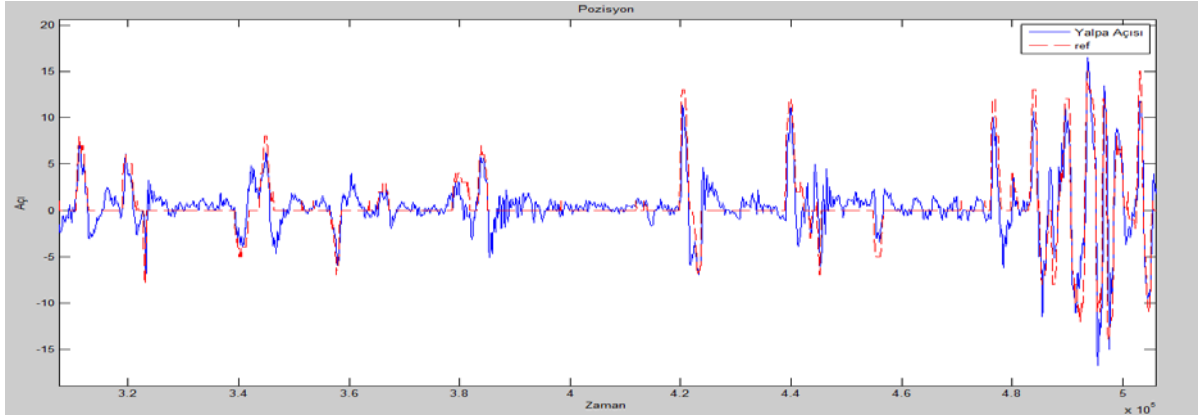
3. Tartışma, Sonuçlar ve Gelecek Çalışmalar

Yapılan test uçuşlarından elde edilen dört rotor İHA duruş verileri Şekil 15 - Şekil 17 arasında verilmiştir. Verilerin görülebilmesi adına belli bir zaman aralığına yatay yakınlaştırma yapılmıştır.

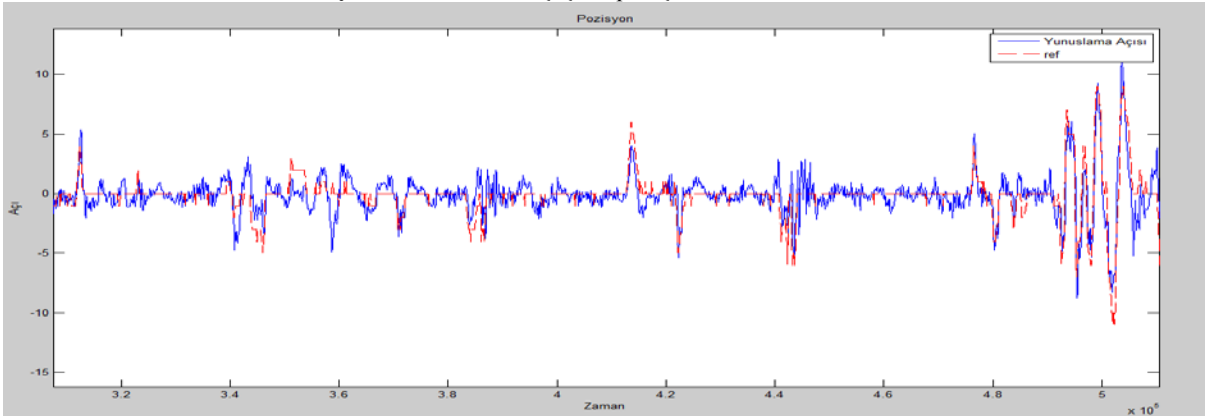
Tablo 2: Sistem Tanılama ve Kontrolcü Yeniden Tasarımı Öncesi ve Sonrası Ortalama Karesel Hatalar

Sistem Tanılamadan Önce			Sistem Tanılamadan Sonra		
Yalp	Yunuslama	Sapma	Yalp	Yunuslama	Sapma
a			a		
8.522	29.4115	1.305	1.915	9.6355	0.931

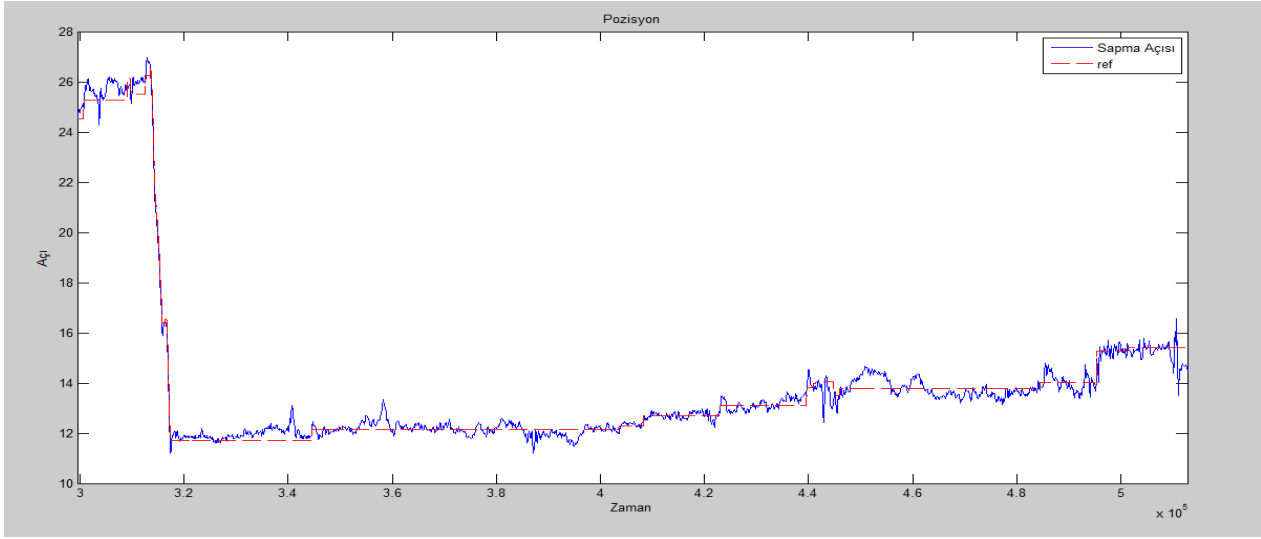
Tablo 2'den de görülebileceği gibi yapılan işlemler sonucunda dört rotor İHA daha başarılı bir şekilde uçuşunu gerçekleştirmiştir.



Şekil 15: Kontrollü Uçuş Yalpa Açısı-Referans Verileri



Şekil 16: Kontrollü Uçuş Yunuslama Açısı-Referans Verileri



Şekil 17: Kontrollü Uçuş Sapma Açısı-Referans Verileri

Özgün yazılım ile yapılan test uçuşlarında duruşsal verilere ait ortalama karesel hataları *Tablo 3*'te verilmiştir.

Tablo 3: Özgün Otopilota ait Ortalama Karesel Hatalar,

Yalpa	Yunuslama	Sapma
3.1296	1.8187	0.3362

Tablo 2 ve *Tablo 3* karşılaştırıldığında tasarlanan özgün otopilotun referans değerleri uç noktalarda zorlandığı halde, ArduCopter yazılımına yalpa ekseninde yakın, yunuslama ve sapma eksenlerinde daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Burada gözden kaçırılmaması gereken nokta ArduCopter yazılımı sistem tanılamadan önce ve sonra sıfır derece açı referansı altında test edilmesine karşın, özgün yazılım test edilirken referansın sürekli olarak değiştirilmiştir.

Çalışmanın geldiği bu noktadan sonra belirli koordinatlar arası tam otonom olarak istenen irtifada uçuş görevleri yapabilecek yeteneğe sahip bir otopilot tasarlanması planlanmaktadır.

4. Teşekkür

Bu çalışmayı 113E581 numaralı proje kapsamında destekleyen TÜBİTAK'a ve kaynaklarını kullandığımız TOBB ETÜ'ye teşekkür ederiz.

5. Kaynakça

[1] Haiyang Chao, Yongcan Cao, YangQuan Chen, Autopilots for Small Fixed-Wing Unmanned Air Vehicles: A Survey, International Conference on

Mechatronics and Automation (ICMA), 3144-3149, Ağustos 2007.

[2] Jodeh, N., Blue, P., Waldron, A., Development of Small Unmanned Aerial Vehicle Research Platform: Modeling and Simulating with Flight Test Validation, AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference, Washington DC, U.S.A, 2006.

[3] Erdos, D., Watkins, S.E., UAV Autopilot Integration and Testing, IEEE Region 5 Conference, Kansas City, U.S.A., Nisan 2008.

[4] Stojcsics, D., Molnar, A., Fixed-wing small-size UAV navigation methods with HIL simulation for AEROBOT autopilot, IEEE 9th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics (SISY), 241-245, Eylül 2011.

[5] J.M. Sullivan, Evolution or revolution? The rise of UAVs, IEEE Technology and Society Magazine, 25(3), 43-49, Eylül 2006.

[6] Ta-ming Shih, Ho-chung Chang, FPGA based hardware in the loop test platform of small size UAV, IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation (CIRA), 551-556, Aralık 2009.

[7] M. Kumon, Y. Udo, H. Michihira, M. Nagata, I. Mizumoto, Z. Iwai, Autopilot system for Kiteplane, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 11(5), 615-624, Ekim 2006.

[8] Santoso, F., Liu, M., Egan, G.K., Linear quadratic optimal control synthesis for a uav, 12th Australian International Aerospace Congress (AIAC 12), Melbourne, Australia, Mart 2007.

[9] Erginer, Bora, and Erdinc Altug. "Modeling and PD control of a quadrotor VTOL vehicle." In Intelligent Vehicles Symposium, 2007 IEEE, pp. 894-899. IEEE, 2007.