

Sabit Kanatlı İnsansız Hava Aracı İçin İstatistiksel Özniteliklerle Arıza Teşhis Sistemi

Buse ÜLKER^{1*}, Tolga YÜKSEL¹⁺

¹Bilecik Şeyhedevali Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü

*İlgili yazar: eembuseulker@gmail.com

*Konuşmacı: eembuseulker@gmail.com

+tolga.yuksel@bilecik.edu.tr

Özetçe- Teknolojik gelişmeler sayesinde birçok sektörde olduğu gibi risk faktörünün fazla olduğu havacılık sektöründe de insan rolü giderek azalmıştır. Bu nedenle insan faktörünü en aza indiren insansız hava araçlarına (İHA) olan talep ve geliştirme çalışmaları tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de büyük bir önem ve hız kazanmıştır. İHA'ların seyrüseferi bazı uygulamalarda uzaktan kontrol edilirken çoğunlukla yerleşik otopilot kontrolcülerinden kontrol edilir. Bu sistemler uçak üzerinde bulunan sensörlerden aldıkları veriler doğrultusunda kontrol yüzeylerini aktive etmektedir. Tüm elektronik sistemlerde olduğu gibi bu araçlarda da meydana gelebilecek bir arıza ciddi sonuçlara neden olabilmektedir. Araçlarda oluşabilecek arızalar uçağın temel hareketlerinin yapılmasını sağlayan kontrol yüzeylerinde etkinlik kaybı ve hatta kontrol yüzeyinin tamamen kaybına neden olmaktadır. Bu nedenle arızaların önceden veya anında tespit edilerek devamında sistemin sorunsuz kontrol edilmesi büyük bir araştırma ve geliştirme konusu olmuştur. Bu çalışmada sabit kanatlı insansız hava araçlarında oluşabilecek aktuatörlerde etkinlik kaybı arızalarının teşhisine odaklanılmıştır. Araç üzerindeki sensörlerden alınan sayısal veriler çeşitli istatistiksel öznitelikler açısından incelenerek arıza teşhisi gerçekleştirilmiştir.

Anahtar kelimeler – insansız hava aracı, arıza teşhisi, istatistiksel veri analizi

Abstract –Thanks to technological developments, the human role has decreased in the aviation sector, where the risk factor is high, as in many sectors. For this reason, the demand and development efforts for unmanned aerial vehicles (UAVs) that minimize the human factor have gained great importance and speed in our country as well as all over the world. The navigation of drones is controlled remotely in some applications, while mostly controlled by built-in autopilot controllers. These systems activate the control surfaces in line with the data they receive from the sensors on the aircraft. As with all electronic systems, a fault in these vehicles can have serious consequences. Faults in vehicles cause loss of effectiveness and even complete loss of the control surface on the control surfaces that allow the basic movements of the aircraft to be performed. Therefore, detecting faults in advance or instantly and controlling the system without problems has been a major research and development issue. In this study, the loss of effectiveness in actuators that may occur in fixed-wing unmanned aerial vehicles is focused on the diagnosis of faults. Numerical data from sensors on the vehicle were examined for various statistical attributes and a diagnostic was carried out.

Keywords – unmanned aerial vehicle, fault detection, statistical data analysis

I. GİRİŞ

Havacılık teknolojisinin gelişmesi ile birlikte bu alandaki insan gücü ve etkisinin yerini kontrol sistemleri almıştır. Kontrol teorisindeki yenilikler hava araçlarındaki sistemlerde insan müdahalesine gerek kalmadan sistem çıkışları istenilen değerlerde tutularak sistem işleyişi sorunsuz sağlar. Özellikle uçaklardaki kontrol yüzeylerinin denetiminde, yükseklik ve hız kontrolünde insan faktörü azaltılarak insana bağlı riskler ortadan kaldırılmaya çalışılmaktadır. Uçağın havada sorunsuz şekilde ilerleyebilmesi için bu sistemlerin kontrol edilmesi gerekmektedir. Uçak hareketini sağlayan bu sistemlerin kontrolünde kontrol yüzeylerinden ve sensörlerden alınan veriler her zaman bir yol gösterici olmaktadır. Bu verileri doğru ve eksiksiz bir şekilde almak ve bu verilerdeki değişiklikleri zamanında tespit ederek oluşabilecek arızalara karşı önlemleri almak, bu alanda yapılan çalışmaların birinci önceliği olmuştur.

Moghadam çalışmasında, sensör arızaları ve aktuatörde arızaya bağlı yüzey kaybı durumlarının teşhis ve kontrolünün yapıldığı arıza toleranslı kontrol (FTC) için bir yaklaşım önermiş ve çeşitli arıza senaryoları deneyerek stabilize bir davranış sergileme ve referans girişi takip etme konusunda önerdiği FTC yönteminin başarılı olduğunu doğrulamıştır[1]. Kullanılan yöntemde her aktuatör ya da sensör için referans değeri ve geri besleme değerleri arasındaki farkın bir eşik değeri belirlenerek elde edilen verinin bu eşik değeri geçmesi durumunda “arıza var” olarak tanımlanarak bu şekilde bir arıza teşhis sistemi oluşturulmuştur.

Patan çalışmasında, sensör arızalarının sistem üzerindeki etkisinin görmek için iki farklı senaryoyu gerçekleştirmiştir[2]. Kullandığı yöntemde rezidü sinyallerini giriş verisi olarak almış ve ilgili eşik değerleri ile karşılaştırmıştır. Eşik değeri ve rezidü sinyali arasındaki farkı arıza boyutu olarak tanımlamış ve bu değeri ilgili sensör için düzeltme parametresi olarak kullanmıştır. Tüm sensör verileri

için bu işlemi yapmıştır. Kullandığı yöntem ile alınan verileri arızalı veriler yerine kontrolcülere geri beslemiş ve bu şekilde bir kontrol sağlamıştır.

Güven, hava araçlarında arıza tespiti ve kontrolü yaptığı çalışmada; uçuş sistemlerinin kabiliyetini artırarak durum uzay modeli ve Simulink model tabanlı yaklaşımla arıza teşhis ve tanımlanmasına çözüm sunmuştur[3]. Model tabanlı arıza teşhis ve tanımlama teknikleri, gürültü, sistem belirsizlikleri veya bozulmalara göre arıza tespitinin hassaslığını artırılması amaçlanmıştır. Kalman filtresi kullanılarak sensörlerdeki arızalar tespit edilmiştir. Simulink çalışmada ise rezidüleri bakılarak arıza tespit işlemi doğru olarak gerçekleştirilmiştir. Hava aracının durum uzay modelindeki durumlar tahmin edilerek arızalı durumu gösteren sistem cevapları incelenerek arıza tespiti yapılmıştır. Önerilen tasarımda MATLAB Simulink çoklu senaryo testleri ile denenerek sensör arızaları daha erken tespit edilmiştir.

Mahmoudi çalışmasında, çok değişkenli istatistiksel tekniklerin temel alındığı temel bileşenler analizi, bağımsız bileşenler analizi ve destek vektör makineleri gibi veri sınıflandırma yöntemlerini kullanarak sensör arıza tespiti yapmıştır[4].

Kıyak çalışmasında, bilinmeyen giriş gözleyici kullanarak uçuş kontrol sisteminde rastgele bir zamanda meydana gelen sensör ya da aktuatör arızalarının tespiti, ayırımı ve sistemin yeniden yapılandırılmasını benzetimler kullanarak gerçekleştirmiştir[5]. Sistemin yeniden yapılandırılması aşamasında yedeğinin devreye sokulması yöntemini kullanmıştır.

Demircan çalışmasında, insansız hava araçlarında irtifa dümeni, yön dümeni ve kanatçık gibi kontrol yüzeylerinin kilitlemesi, sisteme rastgele giriş değerlerinin verilmesi ve benzeri farklı hata senaryoları için doğrusal olmayan sistemler için Genişletilmiş Kalman Filtresi ve Koksuz Kalman Filtresi yöntemlerinin uygulanmasını göstermiştir[6].

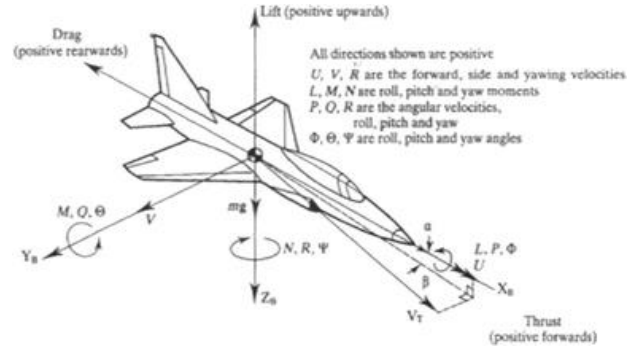
Serçekman çalışmasında, uçuş kontrol sistemlerinin yeteneğini geliştirerek ve düşük karmaşıklıkta sayısal gereksinimler elde ederek model tabanlı arıza algılama ve tanımlama çözümlerine düzeltici bir yaklaşım sunmuştur[7]. Model tabanlı arıza algılama yaklaşımı için lineer gözlemci olarak Kalman filtre tasarımı kullanmıştır. Ve bu şekilde arıza algılamasını başarıyla gerçekleştirmiştir.

Yukarıdaki çalışmalardan da anlaşıldığı üzere, uçak endüstrisinde daha iyi performans isteği nedeniyle araç kontrol sistemleri giderek daha da karmaşık hale gelmektedir. Geri beslemeli kontrol sistemleri aktuatör sensör veya diğer elemanlarda oluşan bazı arızalar nedeniyle istenilen başarıyı sağlayamaz. Dolayısıyla daha iyi performans için kontrol sistemlerinde arıza tespit ve teşhisine ihtiyaç duyulmaktadır. Bahsedilen nedenlere bir çözüm üretmek amacı ile yapılan bu çalışmada sabit kanatlı İHA için istatistiksel öznitelikler ile arıza tespitinin başarılı olduğu gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada, hava araçları için hayati önem taşıyan, hava aracının yönlendirilmesini ve hareketini sağlayan temel kontrol yüzeylerinde oluşabilecek aktuatör arızaları üzerinde çalışılmıştır. İkinci bölümde kullanılan hava aracı modeli anlatılmıştır. Üçüncü bölümde arıza tespitinin yapıldığı istatistiksel öznitelik yöntemleri ve yapılan arıza teşhis çalışması detaylı bir şekilde anlatılıp elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır.

II. SABİT KANATLI İHA MODELİ

Bu çalışmada model olarak MATLAB Simulink'te bulunan orta seviye dahili otopilottan oluşan yüksek doğruluklu sabit kanatlı insansız hava aracı modeli kullanılmıştır. Model 1000'e yakın alt bloktan oluşan karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu model sabit kanatlı bir insansız hava aracının tüm dinamiklerini, çevresel etkileri ve kontrolcü tiplerini incelenbildiği bir modeldir. Modelde, sabit kanatlı İHA'nın seyri için 'airspeed control', 'height control' ve 'roll control' olmak üzere üç tip yüzey kontrolcüsü tanımlanmıştır. Yapılan çalışmada her üç kontrolcü girişi için de veriler kayıt edilmiştir. Modelde her bir kontrol işareti için ayrı ayrı PD kontrolcüler kullanılmaktadır. 'Height' metre cinsinden yükseklik, 'airspeed' m/sn cinsinden İHA'nın rüzgara göre hızı, 'roll' radyan cinsinden gövde ileri eksenine boyunca yuvarlanma açısıdır. Modeldeki sabit kanatlı İHA'nın durum uzayı; metre cinsinden kuzey yönündeki konum, metre cinsinden doğu yönündeki konum, metre cinsinden yükseklik, m/sn cinsinden rüzgara göre hız, rad/sn cinsinden hız ile kuzey yönü arasındaki açı, m/sn cinsinden hız ile kuzeydoğu arasındaki açı, rad/sn cinsinden gövde x eksenine boyunca açılma hızı, rad/sn cinsinden gövde x eksenine boyunca açılma hızı elemanlarından oluşmaktadır. Şekil 1'de sabit kanatlı İHA'ya etki eden bileşenler modellenmiştir.



Şekil 1: İHA üzerindeki aerodinamik kuvvetler, momentler ve hız bileşenleri

İHA'nın koordinat düzlemi ağırlık merkezine oturtulmuş ve $[x_b, y_b, z_b]$ şeklindedir. X_b İHA'nın tercih edilen ileri yönüdür, Z_b mükemmel yatay uçuş sırasında uçak gövdesine dik olan koordinattır. İHA'nın açısal hızı gövde eksenlerine göre $[r, p, q]$ ile temsil edilmektedir.

Sabit kanatlı İHA'larda kinematik modelini tanımlamak için (1), (2) ve (3) de verilen denklemler kullanılır. Yer düzlemine göre İHA konumu, yön açısı, uçuş yolu açısı ve yuvarlanma açısı $[x_e, y_e, h]$ şeklinde, radyan cinsinden $[\chi, \gamma, \phi]$ şeklindedir. Model İHA'nın sıfır yan kayma ile koordineli bir dönüş koşulu altında uçuşunu varsayar. Otomatik pilot hava hızını, yüksekliğini ve yön açısını kontrol eder.

$$\begin{aligned} \dot{x}_e &= V_g \cos \chi \cos \gamma \\ \dot{y}_e &= V_g \sin \chi \cos \gamma \\ \dot{h} &= V_g \sin \gamma \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \dot{\chi} &= \frac{g \cos(\chi - \psi)}{V_g} \tan \phi \\ V_g \sin(\gamma^c) &= \min(\max(k_h(h^c - h) - V_g), V_g) \\ \dot{\gamma} &= k_\gamma(\gamma^c - \gamma) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_a &= k_{va}(V_a^c - V_a) \\ \frac{g \cos(\chi - \psi)}{V_g} \tan(\phi^c) &= k_\chi(\chi^c - \chi) \\ \ddot{\phi} &= k_{p\phi}(\phi^c - \phi) + k_{D\phi}(-\dot{\phi}) \end{aligned} \quad (3)$$

V_a ve V_g hava ve yer hızlarını gösterir. Rüzgar hızı kuzey, doğu ve aşağı yönler için $[V_{wb}, V_{we}, V_{wd}]$ şeklindedir. G yer çekimini ifade etmektedir. K_h uçuş yolu açısı limitlerinin kontrolcü kazancını, k_γ uçuş yolu açısı kontrolcü kazancını, k_{va} hava hızı kontrolcü kazancını, k_γ roll açısı kontrolcü kazancını, k_ϕ yükseklik kontrolcü kazancını ifade etmektedir.

III. ÖNERİLEN ARIZA TEŞHİS SİSTEMİ VE BENZETİM SONUÇLARI

Önerilen arıza teşhis sistemi için bir sabit kanatlı İHA MATLAB simulink modeli kullanılmıştır. Kullanılan İHA'nın (1-3)'de verilen kontrolcü parametreleri Tablo (1)'de gösterilmektedir.

	k_h	k_γ	k_{va}
parametreler	[-1.5708,1.5708]	39	0.3900
	k_γ	k_ϕ	
parametreler	[3.4030e+03,116,6700]	3.9000	

Tablo 1: kontrolcü parametreleri

Modelde müdahale edilebilir kontrol yüzeyleri olan elevator, aileron, rudder ve throttle için her bir kontrol yüzeyinde 110. sn'den sonra %30'luk, %50'lik ve %70'lik kısmi yüzey arızaları oluşturulmuştur. Burada görülen ve aktuatörde oluşan arızaların etkilerini görmek için gerçek İHA'larda da bulunan sensör çıkış verileri kayıt edilmiştir.

Kullanılan MATLAB modelinde 15 adet sensör çıkışının olduğu sensör bloğu bulunmaktadır. Yapılan çalışmada bu sensör çıkışlarından İHA'nın durumunu doğrudan etkileyen çıkışlar kullanılmıştır. Bunlar; euler açıları, İHA açısız hızlarını gösteren pqr, İHA'nın üç boyutlu pozisyonu (X), ivmesi (A) ve hızıdır (V).

Bu çalışmada elde edilen verilerin temel öznitelikleri kullanılmıştır. Öznitelik, gözlemlenebilir bir olgunun ölçülebilir, anlaşılabilir, bağımsız ve ayırt edici olan bir özelliğidir. İstatistiksel öznitelik ise elde edilen verilerin yorumlanmasını esas alan bir sınıflandırma biçimidir. Bu çalışmada kullanılan istatistiksel öznitelikler kısaca aşağıda açıklanmıştır.

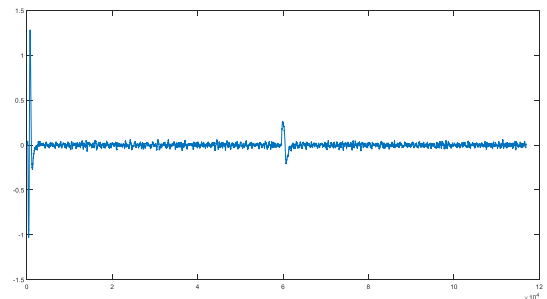
Bir veri dağılımının normal değerlerde olup olmadığını anlamak için çarpıklık ve yığılma parametreleri ile incelenebilir. Çarpıklık bir veri dağılımının simetrik olmama durumunu inceler. Yığılma ise bir veri dağılımının ortasında çok fazla veya çok az örneğin bulunması durumunu inceler. Eğer veri dağılımı ortalamasının solunda yoğunlaşıyorsa bu durum pozitif çarpıklık olarak adlandırılır. Tam tersi durumda ortalamasının sağında yoğunlaşma mevcut ise bu negatif çarpıklıktır. Varyans ise veri setinin dağılımındaki her bir elemanın veri dağılımı ortalamasından ne kadar farklı olduğunu göstermektedir. Bu çalışmada kullanılan bir başka istatistiksel öznitelik olan entropi ise elde edilen veri setinin genel durumunu ifade eder[8].

Kontrol yüzeylerinde oluşturulan etkinlik kaybı arıza senaryoları sonucunda sensör çıkışlarından alınan veri setleri istatistiksel parametreler yönünden incelendiğinde her arızada farklı sensör çıkışlarının farklı istatistiksel parametreler yönünden etkilendiği görülmüştür. Her bir sinyalin istatistiksel parametrelerinde oluşan bu farklılıklar nedeniyle sınıflandırma aşamasına gerek kalmadan arıza teşhisini otomatikleştirmiştir. Tüm kontrol yüzeyleri için yapılan incelemeler tablo haline getirilmiştir. Tablo 2'de elevator aktuatörüne ait arızadan etkilenen sensör çıkışlarının tablosu görülmektedir.

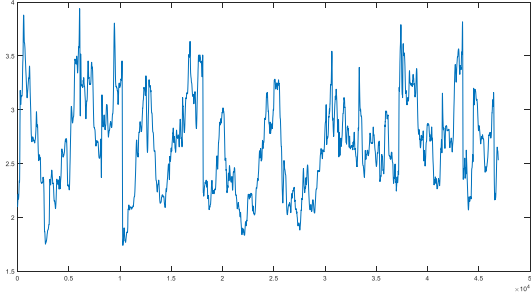
Önerilen arıza tespit sisteminin nasıl çalıştığını göstermek için elevator aktuatörüne ait y yönündeki açısız hız seçilmiştir. Bu aktuatöre ait veriler yükseklik kontrolcüsü etkin iken alınmıştır. Veriler incelenirken tüm veri setini incelemek yerine bir başlangıç noktası belirlenerek 2000'li veriler halinde tanımlanan kayan pencere yöntemi ile incelenmiştir. İlgili sensör çıkışından elde edilen veri boyutu 150 sn. örneklem süresi için 116035'dir. Benzetim için tanımlanan arıza anı olan 110. sn 86416. veriye denk düşmektedir. Pencere yöntemi için başlangıç noktası olarak, kontrolcülere uygulanan adım yanıt sinyalinin geçici durum etkilerinin ortadan kalktığı, 70000. veri olarak seçilmiştir. Bu başlangıç noktasından itibaren 2000'er veriler şeklinde istatistiksel parametreler ile inceleme yapılmıştır. Şekil 2'de ilgili çıkış için ham veri ve istatistiksel parametrelerin değişimleri, Şekil 3'de ise ilgili çıkış için %70'lik yüzey kaybı durumu için ham veri ve istatistiksel parametrelerin değişimleri görülmektedir. Grafikleri detaylı bir şekilde inceleyecek olursak; Şekil 2-a ve Şekil 3-a'daki ham verilerde arıza anı açıkça görülmektedir. Şekil 2-b'da bulunan yığılma parametresi için tepe değeri olan 4 değerinin, Şekil 3-b'da %70 arızalı durumda 5.5 değerine çıktığı daha sonra normal seyrine döndüğü belirtilen eşik değeri çizgisi yardımı ile de açıkça görülmektedir. Diğer parametreler de bu şekilde tek tek incelendiğinde sağlıklı veriler ile %70'lik kayıp durumundaki veriler karşılaştırıldığında hepsinin zirve yaptığı açıkça görülmektedir. Bu anlık zirveler sonrasında değerlerin azalarak normal seyrine geldiği anlaşıldığından ilk zirve değerinin geldiği an arıza anı olarak kabul edilmiştir. Bu durumda %70'lik bir arızanın elevator aktuatöründe bir etkinlik kaybına neden olup uçağın y yönünde açısız hızının azalmasına neden olduğu görülmüştür.

Kontrol tipi	Değişken ismi	yığılma	çarpıklık	varyans	entropi	Entropi2	enerji
H	Euler1	X	X	X	X	X	X
	Euler2	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Euler3	X	X	X	X	X	X
E	Pqr1	X	X	X	X	X	X
	Pqr2	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Pqr3	X	X	X	X	X	X
İ	X1	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	X2	✓	X	X	X	X	X
	X3	✓	✓	✓	X	✓	✓
G	V1	✓	X	✓	X	X	X
	V2	X	X	X	X	X	X
	V3	X	✓	✓	✓	✓	✓
H	A1	X	X	✓	✓	✓	✓
	A2	X	X	X	X	X	X
	A3	✓	✓	X	X	X	X

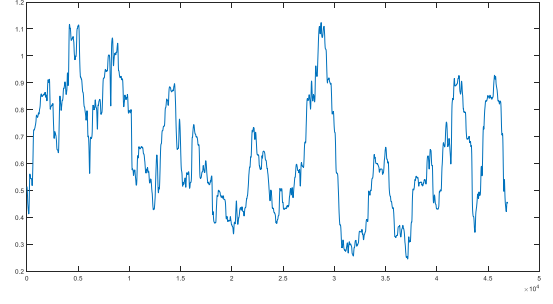
Tablo 2: elevator aktuatörüne ait %70'lik etkinlik kaybı sonucu etkilenen sensör çıkışları



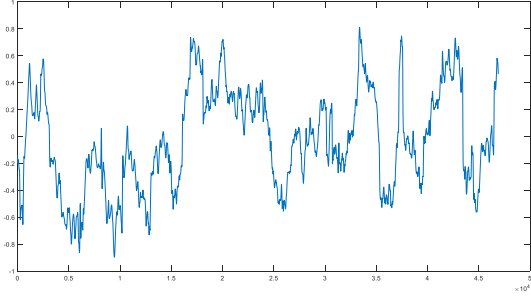
Şekil 2-a: elevator PQR_y arızasız ham verisi



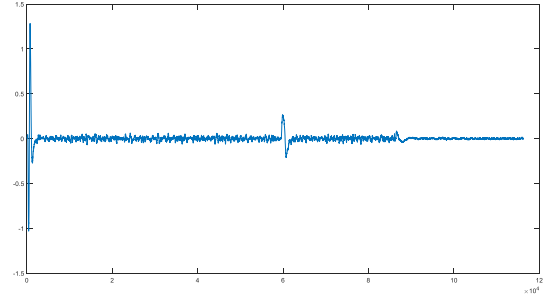
Şekil 2-b: elevator PQR_Y arızasız yığılma



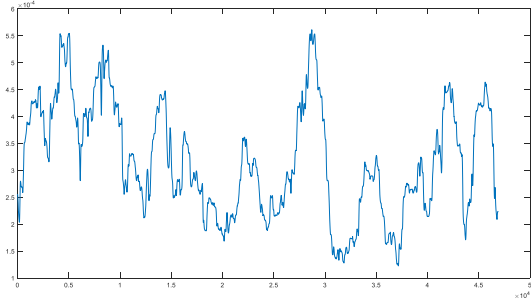
Şekil 2-g: elevator PQR_Y arızasız enerji
Şekil 2: Arızasız durum elevator öznitelikleri



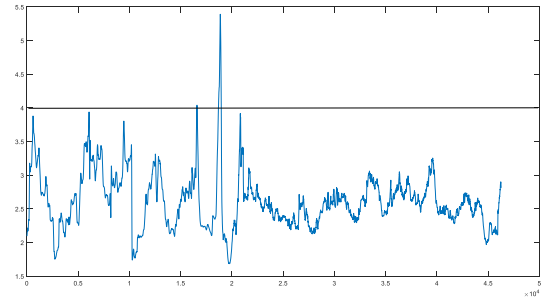
Şekil 2-c: elevator PQR_Y arızasız çarpıklık



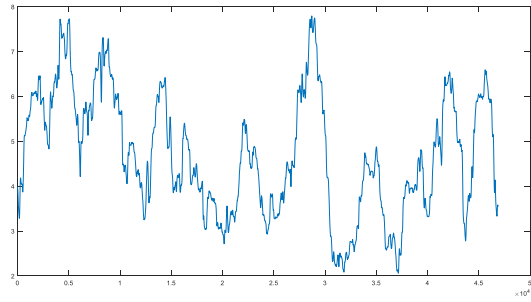
Şekil 3-a: elevator PQR_Y %70 arızalı ham veri



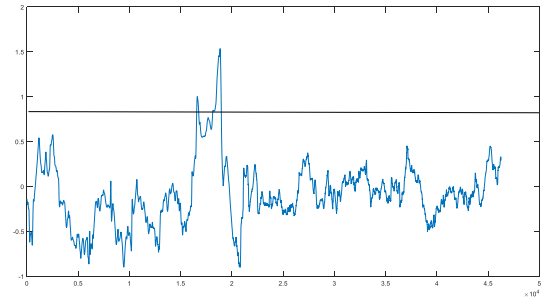
Şekil 2-d: elevator PQR_Y arızasız varyans



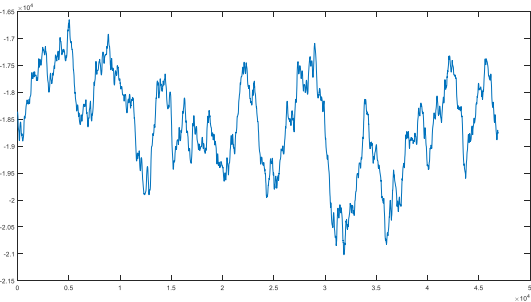
Şekil 3-b: elevator PQR_Y %70 arızalı yığılma



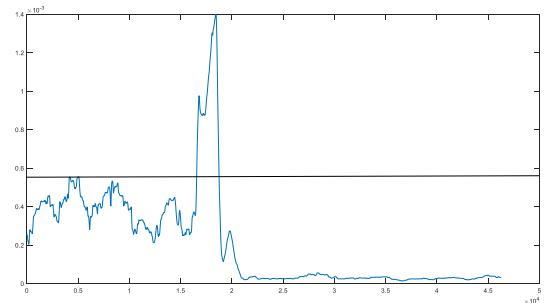
Şekil 2-e: elevator PQR_Y arızasız entropi



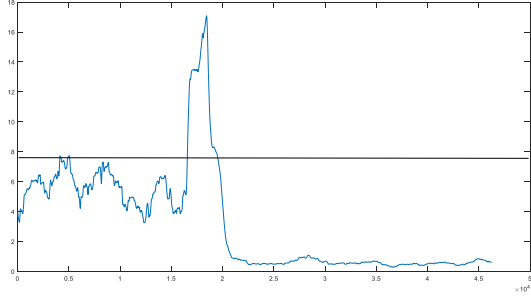
Şekil 3-c: elevator PQR_Y %70 arızalı çarpıklık



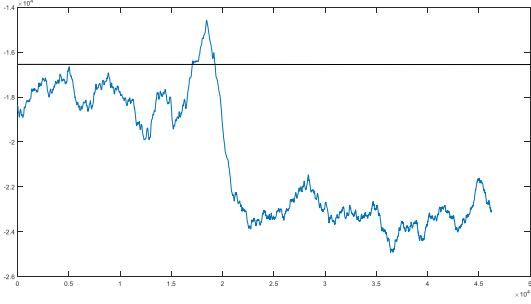
Şekil 2-f: elevator PQR_Y arızasız entropi2



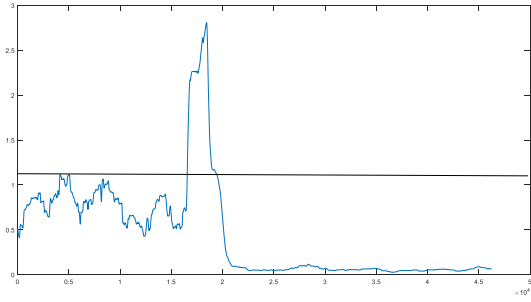
Şekil 3-d: elevator PQR_Y %70 arızalı varyans



Şekil 3-e: elevator PQR_Y %70 arızalı entropi



Şekil 3-f: elevator PQR_Y %70 arızalı entropi2



Şekil 3-g: elevator PQR_Y %70 arızalı enerji
Şekil 3: %70 arızalı durumda elevator öznitelikleri

IV. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada sabit kanatlı bir insansız hava aracında oluşabilecek ve temel kontrol yüzeylerinin etkilendiği aktuatör arızalarının teşhisi üzerine çalışılmıştır. Önerilen yöntemde uçak üzerindeki sensörlerden alınan veriler istatistiksel öznitelik parametreleri açısından incelenerek arıza teşhisi yapılmıştır. Teşhis için kullanılan veri setleri modelde bulunan hava aracı temel kontrol yüzeylerinde oluşan %30'luk, %50'lik ve %70'lik kısmi yüzey kayıp senaryolarından elde edilen verilerdir ve bu veriler üç farklı kontrolcü içinde ayrı ayrı ve 110. saniyeden sonra oluşacak şekilde elde edilmiştir. Kayıt altına alınan veriler istatistiksel öznitelikler olan yığılma, çarpıklık, varyans, entropi ve enerji yöntemleri ile incelemiştir. Alınan sağlıklı veriler ile arızalı veriler karşılaştırılarak bir eşik değeri belirlenmiş ve bu eşik değerini geçen sensörlerde ve onların etkilediği temel kontrol yüzeylerinde oluşan arıza teşhisi yapılmıştır. Gelecek çalışmalarda flap kontrol yüzeyini kontrol eden aktuatör için arıza teşhis çalışmalarının yapılması hedeflenmektedir.

REFERANS

- [1] Moghadam, M. (2016). *Fault Tolerant Control Of A Quadrotor Uav* (Doktora tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [2] Patan, G. (2020). *Sensor fault tolerant control of aquadrotor UAV* (Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi).

- [3] Güven, A. (2021). *Sensor fault detection, isolation and accommodation applied to b-747 aircraft lateral Dynamics* (Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi).
- [4] Mahmoudi, B. (2016). *Uçuş kontrol sistemlerinde sensör hatalarının tespiti ve teşhisi* (Doktora tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi).
- [5] Kıyak, E. (2015). *Bilinmeyen giriş gözleyicileri kullanılarak uçuş kontrol sistemindeki algılayıcı ve eyleyici arızalarının tespiti, ayrımı ve sistemin yeniden yapılandırılması* (Doktora tezi, Anadolu Üniversitesi).
- [6] Demircan, M. (2019). *İnsansız hava aracı sistemlerinde hata tespit yaklaşımları* (Yüksek lisans tezi, TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [7] Serçekman, Ö. (2018). *A Model based approach for aircraft sensor fault detection* (Yüksek lisans tezi, Ortaoğu Teknik Üniversitesi).
- [8] Esener, İ. I. (2017). *Meme kanseri için şüpheli bölgelerin mamografi imgeleri üzerinde belirlenmesi ve meme kanser türünün sınıflandırılması*.