

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İNSANSIZ HAVA ARAÇLARINDA YEDEKLİ
ÇALIŞMA**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Hüseyin Fatih Lokumcu**

Programı : Savunma Teknolojileri

TEMMUZ 2008

İNSANSIZ HAVA ARAÇLARINDA YEDEKLİ ÇALIŞMA

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Hüseyin Fatih Lokumcu
(514051005)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 5 Mayıs 2008
Tezin Savunulduğu Tarih : 9 Haziran 2008

Tez Danışmanı : **Yrd.Doç.Dr. Osman Kaan Erol**
Diğer Jüri Üyeleri: **Prof.Dr. A. Emre Harmancı**
Prof.Dr. İbrahim Eksin

TEMMUZ 2008

ÖNSÖZ

Bu çalışma gelecekteki insansız hava aracı teknolojilerinin uğrayacağı değişim öngörülerek, seri üretimi sağlayacak bir yöntemin geliştirilmesi için bir başlangıç noktası oluşturmayı amaçlamaktadır. Tez çalışmam boyunca yardımlarını esirgemeyen hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Osman Kaan Erol'a, insansız hava aracı geliştirmenin sadece yıllar süren ön tasarım süreçleri değil, ordumuz tarafından işlemsel olarak kullanılan ürünleri geliştirmek olduğunu bana ve ilgili herkese gösteren Baykar Makina A.Ş şirketinin yönetim kurulu başkanı Sayın Özdemir Bayraktar'a ve değerli çalışanlarına teşekkür ederim.

Mayıs 2008

Hüseyin Fatih Lokumcu

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
KISALTMALAR.....	iii
TABLO LİSTESİ.....	iv
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
ÖZET.....	vi
SUMMARY.....	vii
1. MEVCUT YEDEKLİ SİSTEMLER.....	1
1.1. Sistem Düzeyinde Yedeklilik.....	1
1.2. Bileşen Düzeyinde Yedeklilik.....	2
1.3. İkili Sistemler.....	3
1.4. Çoklu Sistemler.....	3
2. İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI İÇİN BAĞDAŞIK YEDEKLİ SİSTEM.....	4
2.1 Oylama-Anahtarlama Algoritması.....	5
3. GÜVENİLİRLİK VE YEDEKLİ ÇALIŞMA İLE İLGİLİ KAVRAMLAR...8	
3.1. Bozulma Hızı ve Bozulma Yoğunluğu.....	8
3.2. Güvenilirlik.....	11
3.3. Güvenilirlik ile Bozulma Hızı Arasındaki İlişki.....	12
3.4. Beklenen Bozulma Süresi.....	13
3.5. Bileşen Güvenilirlikleri.....	14
3.5.1. Elektronik Bileşenler.....	14
3.5.2. Mekanik Bileşenler.....	16
3.5.3. Yazılım Bileşenleri.....	18
4. İNSANSIZ HAVA ARACI İÇİN GÜVENİLİRLİK ANALİZİ21	
4.1 Yedeksiz Sistem.....	21
4.1.1. Elektronik Bileşenler.....	21
4.1.2. Mekanik Bileşenler.....	23
4.1.3. Yazılım Bileşeni.....	24
4.1.4. Bütün Sistem.....	25
4.2. İkili Bağdaşık Sistem.....	25
4.2.1. Elektronik Bileşenler.....	26
4.2.2. Mekanik Bileşenler.....	27
4.2.3. Bütün Sistem.....	28
4.3. Üçlü Sistem.....	29
4.3.1. Elektronik Bileşenler.....	29
4.4. Kavramsal Duyargalar İle Yedeklilik.....	30

5. SONUÇ VE TARTIŞMA.....	34
KAYNAKLAR.....	36
ÖZGEÇMİŞ.....	37

KISALTMALAR

BBS : Beklenen Bozulma Süresi

TABLO LİSTESİ

		<u>Sayfa No</u>
Tablo 3.1	10 adet mekanik bileşen için bozulma zamanları bilgisi	8
Tablo 3.2	10 adet mekanik bileşen için bozulma zamanları bilgisinden bozulma yoğunluğu ve bozulma oranının hesaplanması.....	9
Tablo 4.1	Örnek İnsansız Hava Aracının Elektronik Bileşenlerinin Bozulma Hızı ve Beklenen Bozulma Süresi Değerleri.....	21
Tablo 4.2	Örnek İnsansız Hava Aracının Mekanik Bileşenlerinin Bozulma Hızı ve Beklenen Bozulma Süresi Değerleri.....	23
Tablo 4.3	Örnek İnsansız Hava Aracının Yazılım Hatalarının Ortaya Çıkma Zamanları.....	24
Tablo 4.4	İkili Bileşenli Mekanik Sistemin Bozulma Hızı ve Beklenen Bozulma Süresi Değerleri.....	28
Tablo 4.5	Kavramsal Devimsel basınç duyargasına katkıda bulunan duyargaların bozulma durumları için kabul/red kararları.....	32

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1 : Sistem Düzeyinde Yedeklilik	1
Şekil 1.2 : Bileşen Düzeyinde Yedeklilik	2
Şekil 1.3 : İkili Yedekli Sistem	3
Şekil 1.4 : Üçlü Yedekli Sistem	4
Şekil 2.1 : Bağdaşık Yedekli Sistem Mimarisi	7
Şekil 2.2 : Oylama-Anahtarlama Algoritması	8
Şekil 3.1 : Tablo 3.2'deki verilere ilişkin bozulma yoğunluk işlevi.....	10
Şekil 3.2 : Tablo 3.2'deki verilere ilişkin bozulma hızı işlevi.....	11
Şekil 3.3 : Elektronik Bileşenlere ilişkin bozulma hızı işlevi.....	15
Şekil 3.4 : Elektronik bileşenlere ilişkin bozulma olasılık yoğunluk işlevi...	15
Şekil 3.5 : Elektronik Bileşenler için Güvenilirlik İşlevi.....	16
Şekil 3.6 : Mekanik Bileşenlere ilişkin bozulma hızı işlevi.....	17
Şekil 3.7 : Mekanik Bileşenlere ilişkin bozulma olasılık yoğunluk işlevi.....	17
Şekil 3.8 : Mekanik Bileşenlere ilişkin Güvenilirlik işlevi.....	18
Şekil 3.9 : Yazılım Bileşenlerine ilişkin bozulma hızı işlevi.....	19
Şekil 3.10 : Yazılım Bileşenlerine ilişkin bozulma olasılık yoğunluk işlevi...	20
Şekil 3.11 : Yazılım Bileşenlerine ilişkin Güvenilirlik İşlevi.....	20
Şekil 4.1 : X eksenindeki ivme için geribesleme noktaları.....	31
Şekil 5.1 : Bağdaşık yedekli sistemin gelişimi.....	34

İNSANSIZ HAVA ARAÇLARINDA YEDEKLİ ÇALIŞMA

ÖZET

Günümüzde Harp sanayinin temelini bilgi teknolojilerinin ürünleri olan akıllı sistemler oluşturmaya başlamış bulunmaktadır. İnsansız Hava Araçları ise bu sistemlerin en yüksek düzeyde teknoloji ve mühendislik içeren bölümünü oluşturmaktadır. Teknolojinin gelişme seviyesinden, gelecekte insansız hava araçlarının seri üretiminin yapılmasının mümkün olabileceği düşünülmektedir. Günümüzde kullanılan hava aracı üretim standartları çok büyük miktarlarda seri üretime imkan vermemektedir. Seri üretim için, yüksek güvenilirlik düzeyine sahip bileşenler ve üretim süreçleri yerine standart güvenilirlik düzeyine sahip bileşenler kullanılmalı ve üretim süreçleri uygulanmalıdır. Bunun için bir yöntem geliştirilmesi gerektiği değerlendirilmiştir. İnsansız Hava Araçlarında yedekli çalışma başlığı altında yapılan bu çalışma, insansız hava araçlarının güvenilirlik analizi hakkında bilinen yöntemlerin incelenmesinden ve geliştirilen yeni yedeklilik yönteminin analizinden oluşmaktadır. İnsansız hava aracı sisteminin elektronik, mekanik ve yazılım bileşenleri için ayrı güvenilirlik modelleri kullanılarak örnek bir hava aracının güvenilirliği değerlendirilmiş ve çözüm olarak öne sürülen bağdaşık sistemin güvenilirliği ile karşılaştırılmıştır. İnsanlı hava araçlarında ortalama kırım süresi yüz milyon saatler mertebesinde gerçekleşirken insansız hava araçlarında bu süre en fazla elli bin saat mertebelerine ulaşmış durumdadır. Bu değerler arasındaki en önemli fark, insansız hava araçlarına özgü mekanik ve yazılım bileşenleri olarak değerlendirilmiş ve bunların geliştirilmesi için fikirler geliştirilmiştir. Sonuç bölümünde, geliştirilen yöntemin iyileştirilmesi için öneriler verilmiş, yöntemin gelecekteki gelişimi ve doğadaki uçan canlılarla benzerlik ve farkları değerlendirilmiştir.

REDUNDANCY IN UNMANNED AERIAL VEHICLES

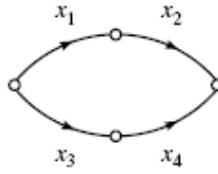
SUMMARY

At the present time, intelligent systems which are products of information technologies, have begun to dominate the modern warfare. Unmanned Aerial Vehicles are part of this which makes the cutting edge technology and engineering. Technology's level makes us predict that the unmanned aerial vehicles will be mass produced. Today's aviation manufacturing standards makes it impossible to produce them in mass production for large quantities. Mass Production needs components and production processes which more standard than processes and components which are of high reliability. It is evaluated that there is a need of a new method of doing this. This work titled "Redundancy in Unmanned Aerial Vehicles" consists of the known ways of reliability analysis for unmanned aerial vehicles and the analysis of the new method. Unmanned Aerial Vehicle's electronic, mechanical and software components are evaluated separately with appropriate models and and an exemplary unmanned aerial vehicle's reliability analysis is compared with the analysis of the homogen system which is offered as a solution. While the manned aerial vehicles have a mishap rate by the rank of several hundred million hours, this rate is at most fifty thousand hours for unmanned vehicles. It is concluded that the main reason for this difference is the mechanical and software components peculiar to unmanned aerial vehicles and ideas for improving these have been offered. In the conclusion section, offerings about improving the new method of redundancy hav been put forward and its progress in the future and similarity and difference between the flying creatures in the nature have been evaluated.

1. MEVCUT YEDEKLİ SİSTEMLER

1.1. Sistem Düzeyinde Yedeklilik

Sistem düzeyinde yedeklilik, sistemin bütünü bölünemez bir varlık olarak tasarlanıp bu sistemin yedeğinin kullanılmasıdır.[1]



Şekil 1.1: Sistem Düzeyinde Yedeklilik

Şekil 1.1'de x_1, x_2 çifti bir sistemi, x_3, x_4 çifti bu sistemin yedeğini ifade etmektedir. Sistem düzeyinde yedekli sistemlerde bozulan bir bileşenin görevini diğer sistemin bir bileşeni üstlenemez; sistem kendi içinde seri bağlı bileşenlerden oluşmaktadır ve bu bileşenlerden birinin bozulması, sistemin bozulması anlamına gelir. Hesaplamayı kolaylaştırmak için, bütün bileşenlerin eşit bozulma ihtimali olduğunu varsayarsak, birinci sistemin bozulma ihtimali,

$$P_1 = 1 - ((1 - p)(1 - p)) = 2p - p^2 \quad (1.1)$$

Sistemin bozulma ihtimali, iki sistemin birden bozulma ihtimali olduğu için

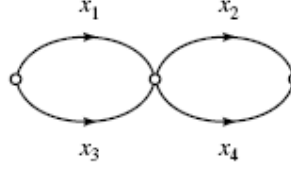
$$P_s = P_1 P_2 = p^4 - 4p^3 + 4p^2 \quad (1.2)$$

olarak hesaplanır.

1.2. Bileşen Düzeyinde Yedeklilik

Bileşen düzeyinde yedeklilikte, sistemin bütün bileşenleri birbirinin yerini alabilir.

Şekil 1.2'de bileşen düzeyinde yedekliliğin kavramsal yapısı görülmektedir.



Şekil 1.2: Bileşen Düzeyinde Yedeklilik

Bölüm 1.1'deki bileşenlerle özdeş bileşenlerin kullanılması durumunda, sistemin bozulma ihtimali bileşen çiftlerinden herhangi birinin bozulma ihtimali kadardır. Bir bileşen çiftinin bozulma ihtimali ise çifti oluşturan iki bileşenin de bozulma ihtimalidir. Buna göre;

$$P_s = 1 - (1 - p^2)^2 = 2p^2 - p^4 \quad (1.3)$$

Bileşen düzeyinde yedeklilik ile sistem düzeyinde yedekliliğin bozulma ihtimalleri karşılaştırıldığında,

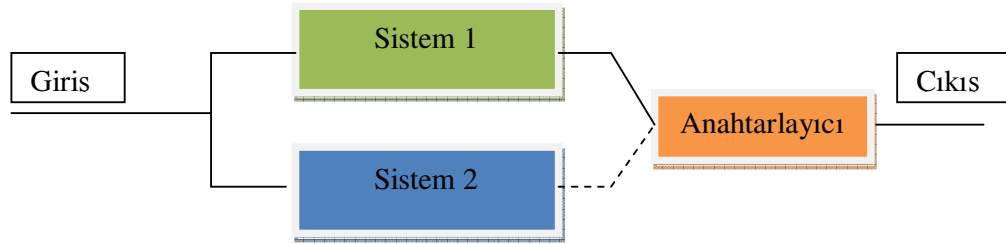
$$\frac{P_s}{P_b} = \frac{p^4 - 4p^3 + 4p^2}{2p^2 - p^4} = \frac{(2-p)^2}{2-p^2} = 1 + \frac{2(1-p)^2}{2-p^2} \quad (1.4)$$

Denklem 3.4 ' teki ifade her zaman 1'den büyük çıkacağından sistem düzeyinde yedekliliğin bozulma ihtimalinin her zaman daha fazla olacağı söylenebilir.

1.3. İkili Sistemler

Yaygın olarak kullanılan yedekli çalışma yöntemlerinden biri, ikili sistemlerdir. Bu sistemlerde bütün bileşenlerin birer yedeği bulunur ve bozulma durumunda yedek bileşen, bozulan bileşenin yerini alır. Bu sistemlerde, bozulma durumunda yedek bileşenin devreye girmesi için bir anahtarlama devresinin bulunması zorunludur. Bu anahtarlama devresinin, bozulma durumunu tespit etmesi ve yedek bileşeni devreye

sokması gerekmektedir. Ancak bu devrenin kendisinin de bir güvenilirlik işlevi bulunmaktadır ve bu güvenilirlik işlevinin ihmal edilebilmesi için beklenen bozulma süresinin diğer bileşenlere göre çok yüksek olması gerekmektedir. Bu gereklilik, anahtarlama devresinin maliyetinin diğer bileşenlere göre çok yüksek olmasına sebep olmaktadır. Bu maliyet karşılanırsa bile, sistemin güvenilirliğinin yedeği olmayan en az bir bileşene bağımlı olması gerçeği değişmemekte ve sistemde gerçek bir yedeklilik sağlanamamış olmaktadır. **Şekil 1.3**'te anahtarlama devreli bir ikili sistemin kavramsal yapısı görülmektedir.

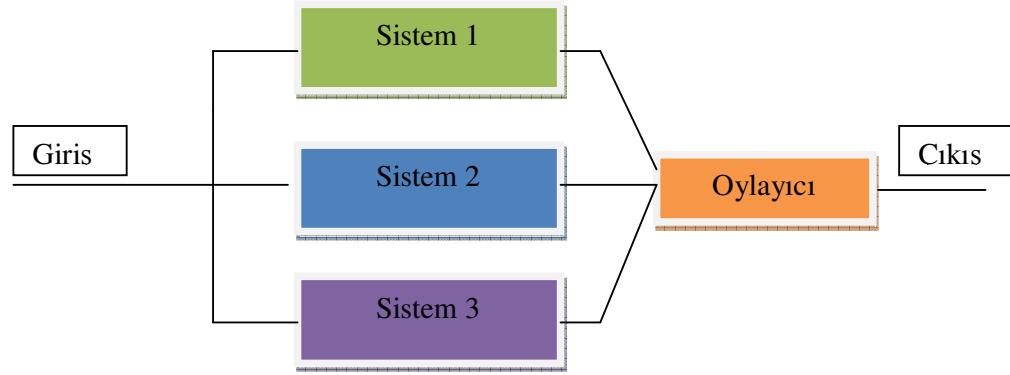


Şekil 1.3: İkili Yedekli Sistem

Bu sistemin güvenilirlik analizi için bölüm 4'teki ilgili bölümler incelenebilir. Her bir sistemin bozulma hızı λ_s , anahtarlayıcının bozulma hızı λ_a ile gösterilirse, bütün sistemin bozulma hızı $\frac{2\lambda_s}{3} + \lambda_a$ olmaktadır.

1.4. Çoklu Sistemler

Çoklu sistemlerde, sistemlerden birinin bozulduğunu anlamak için diğer sistemlerle karşılaştırma imkanı da bulunmaktadır. Sistemlerin her birinin çıkış değerleri arasında bir oylama yapılırsa bir sistemin bozulması tespit edilebilmektedir. Bu işlemi yapmak için yedek sistemlerin yanında, ayrıca bir oylama devresi gereklidir. İkili sistemlerdeki anahtarlama devresinin maliyet ve güvenilirlik sorunları, oylama devresi için de geçerlidir. Çoklu sistemlerdeki yedekliliğin sistem güvenilirliğini artırması için oylama devresinin bozulma ihtimali ihmal edilebilir derecede düşük olmalıdır ve bu zorunluluk, oylama devresinin maliyetini artırmaktadır. Yine ikili sistemlerde olduğu gibi, sistem oylama devresine yedeksiz bir biçimde bağımlı olmakta ve gerçek bir yedeklilik sağlanamamaktadır. **Şekil 1.4**'te oylama devreli bir üçlü sistemin kavramsal yapısı görülmektedir.



Şekil 1.4: Üçlü Yedekli Sistem

Bu sistemin güvenilirlik analizi için de bölüm 4'teki ilgili bölümler incelenebilir. Her bir sistemin bozulma hızı λ_s , anahtarlayıcının bozulma hızı λ_a ile gösterilirse, bütün

sistemin bozulma hızı $\frac{6\lambda_s}{11} + \lambda_a$ olmaktadır.

2. İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI İÇİN BAĞDAŞIK YEDEKLİ SİSTEM

Mevcut sistemler bölümünde incelenen bütün sistemlerin ortak özelliği bu sistemlerin bağdaşık(homojen) olmamasıdır. İkili veya daha fazla sayıdaki yedekli sistemlerde, mutlaka bu sistemlerin yönetimi için anahtarlama veya oylama sistemi gereklidir. Bu sistemin ise bozulma ihtimalinin ihmal edilebilir düzeyde olması maliyetleri artırmakta ve üretim sayısını da sınırlamaktadır.

İnsansız hava araçları, pilota ihtiyaç duymadıklarından yakın gelecekte klasik sistemlerden farklı olarak çok sayıda üretilebilecektir. Çok sayıda üretim, maliyetlerin düşmesini gerektirmekte ve yüksek güvenli değil, standart güvenli bileşenlerin kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. “İnsansız Hava Araçları için Bağdaşık Yedekli Sistem” adını verdiğimiz sistem, standart güvenli bileşenleri kullanarak ve herhangi bir anahtarlama veya oylama sistemi kullanmadan yedeklilik sağlayan bir sistemdir. Bu sistemde anahtarlama veya oylama sistemi, hava aracının

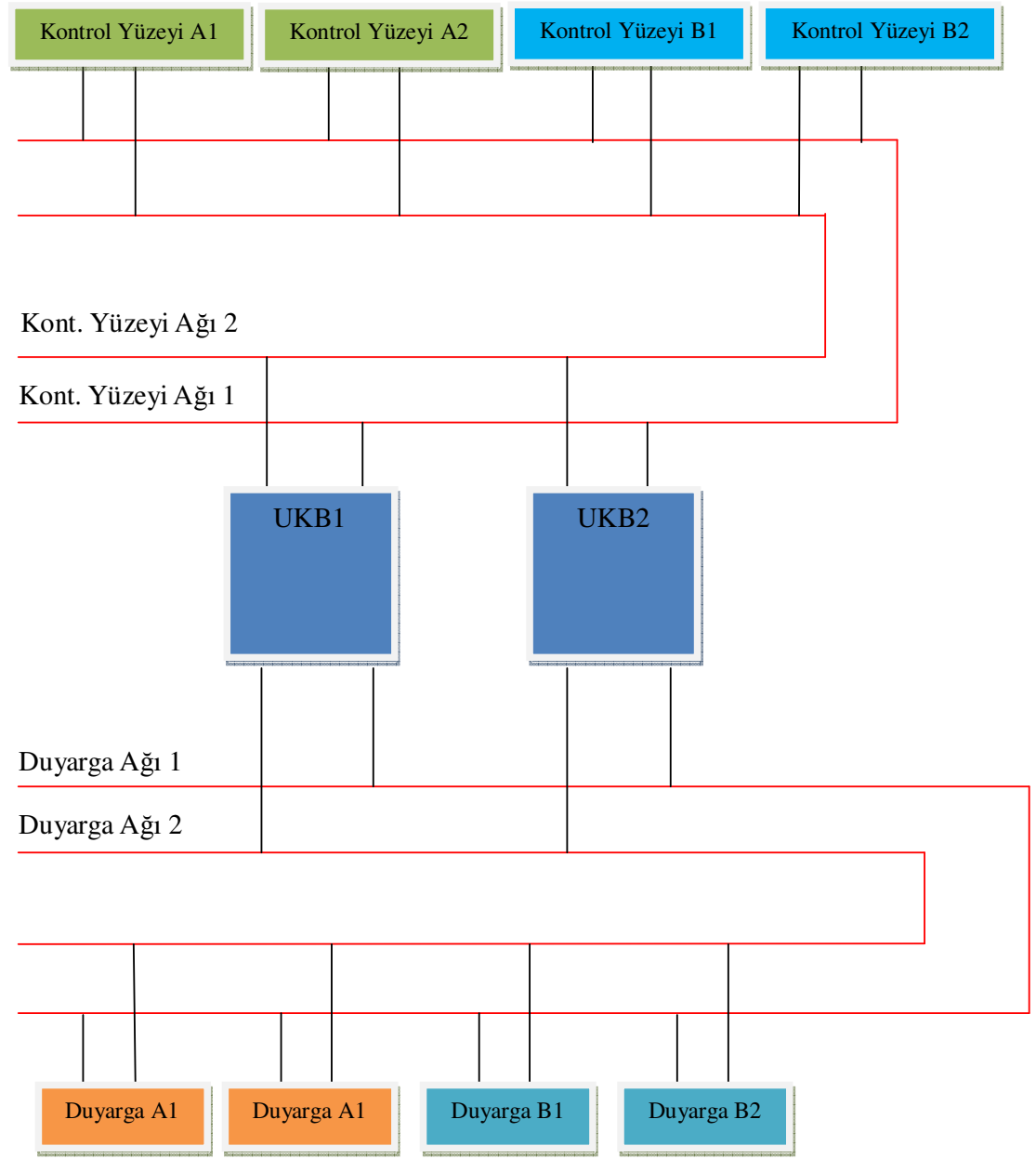
kontrol yüzeylerinde bulunmakta ve uçuş güvenliğini tek bir oylayıcı-anahtarlayıcıya bırakmamaktadır. Başka bir deyişle bu sistemde anahtarlayıcı-oylayıcıların da yedeği vardır ve bu, düşük maliyetli bileşenlerle anahtarlama-oylama işleminin yapılmasını sağlamaktadır. Ayrıca diğer sistemlerde olduğu gibi yüksek güvenliqli bağlama elemanları olmayıp, bağlama elemanlarının da yedekleri mevcuttur.

Kavramsal bir İHA için bağdaşık yedekli sistemin mimarisi **şekil 2.1**' deki gibidir. Görüldüğü gibi sistemde yedeği olmayan hiçbir bileşen bulunmamaktadır. Uçuş kontrol bilgisayarı yedek sayısına göre, oylama veya anahtarlama işlemini kontrol yüzeylerinin komut alıcı sisteminde bulunan düşük maliyetli bir yazılımla sağlar. Aynı şekilde bozulan duyarga(lar)ın tespitini Uçuş kontrol bilgisayarındaki yazılım sağlamaktadır. Bağlama bileşenleri olarak yedekli duyarga ve kontrol yüzeyi ağırları tasarlanmıştır. Aynı zamanda bu mimari bağlama, oylama ve anahtarlama sistemlerinde Hiçbir değişiklik yapmadan istenen sayıdaki yedek bileşenin sisteme eklenip çıkarılmasını sağlamaktadır. Anahtarlama – oylama işleminden sorumlu olan yazılımlar otomatik olarak sistemde bulunan yedek sayısını belirleyip o sayıya uygun algoritmayı çalıştıracak şekilde geliştirilebilir. Herhangi bir bileşenin bozulmasının bileşenin bağlı bulunduğu ağı bozma ihtimalini en aza indirmek için bütün bağlamaların fotoelektronik elemanlarla yapılması uygun olacaktır. Düşük maliyetli bileşenlerle, istenen düzeyde güvenilirliği sağlamak için, kontrol yüzeyleri hariç, yedekli bileşen sayısı istenildiği kadar artırılabilir. Kontrol yüzeylerinde de yedek sayısı her bir yüzey için örneğin 10 adet olacak şekilde artırılabilir. **Şekil 2.1**'de görülen bağdaşık yedekli sistem mimarisinde, aynı renkte olan bileşenler birbirinin yedeğidir. Oylama-Anahtarlama işlemi ise bölüm 1'de tanıtılan sistemlerdeki gibi bağımsız değil, her bir kontrol yüzeyinin alıcı devresinde yer almaktadır.

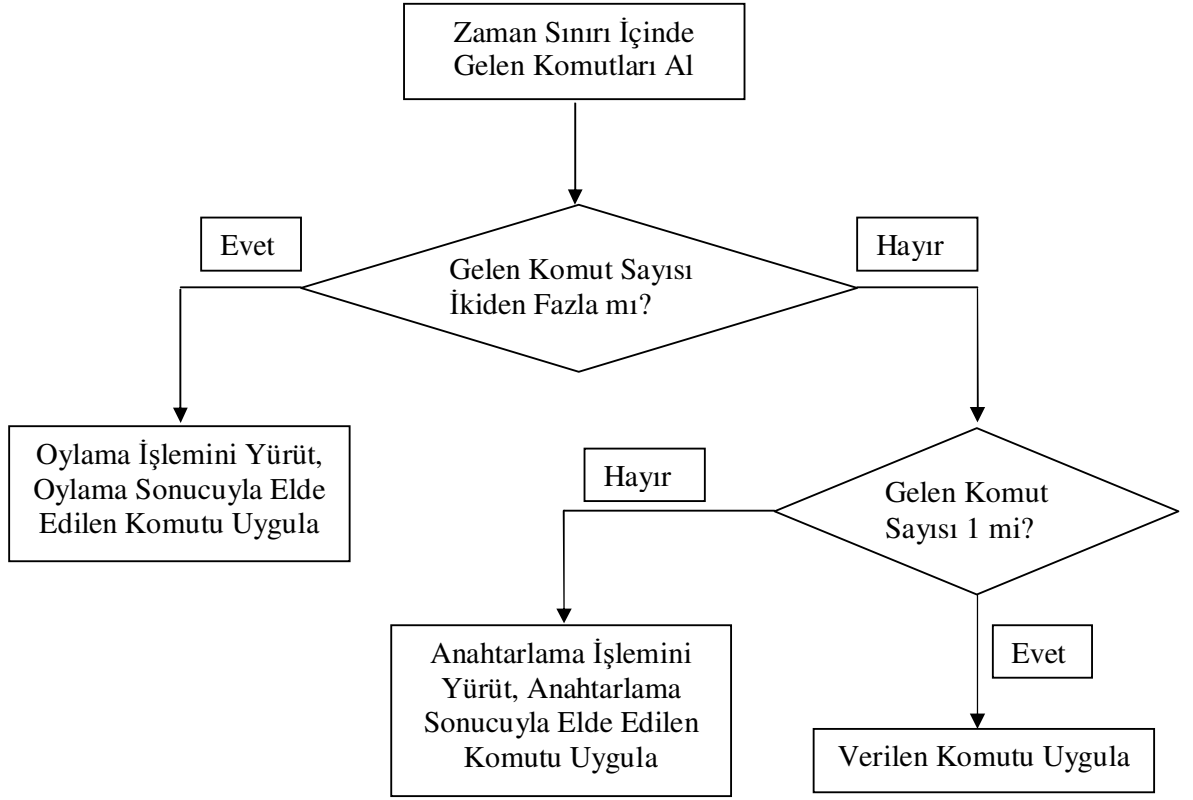
2.1. Oylama-Anahtarlama Algoritması

Oylama-Anahtarlama Algoritması her bir kontrol yüzeyinde bağımsız olarak çalışacak olan algoritmadır. Kontrol yüzeyinin alıcı devresinde çalıştığı için mümkün olduğunca basit olması gerektiği düşünölmüştür. Algoritma, sisteme yerleştirilmiş uçuş kontrol bilgisayarların sayısına uyum sağlayarak, tek sayıda uçuş kontrol bilgisayarı için oylama, çift sayıda uçuş kontrol bilgisayarı için anahtarlama işlemini yürütür. Zaman eşlemesi, basitliği sağlamak amacıyla, belirlenen sınır dahilinde

eşanlı olarak gönderilen komutları aynı zamanda kabul ederek yapılmaktadır. Alınan komut sayısı tek ise oylama, çift ise anahtarlama işlemi yürütülür. Eğer alınan komut sayısı çift ise ve komutlar birbiriyle belirli sınırlar içinde uyumlu değilse, doğru olduğu varsayılan uçuş kontrol bilgisayarının komutu yürütülür. Uçuş kontrol bilgisayarlarından birisi veya daha fazlası bozulur ve komut gönderemezse, algoritma hafızasız olduğundan, bir sonraki komut yürütme zamanında bu duruma uyum sağlayacaktır. **Şekil 2.2'** de algoritmanın akış şeması görülmektedir. Eğer 2 tane uçuş kontrol bilgisayarından komut alınıyorsa ve bu komutlar birbiriyle uyumlu değilse, önceden belirlenmiş olan bilgisayarın komutu yürütülecektir. Bozulma durumu, iki bilgisayarın birinin komut göndermemesi olarak varsayıldığından uçuş kontrol bilgisayarının bozulması ve buna rağmen geçerli zamanda komut göndermesi ihmal edilebilir bir ihtimal olarak değerlendirilmektedir. Bir sonraki bölümdeki güvenilirlik analizinde bu varsayım geçerli kabul edilmiştir.



Şekil 2.1: Bağdaşık Yedekli Sistem Mimarisi



Şekil 2.2: Oylama-Anahtarlama Algoritması

3. GÜVENİLİRLİK VE YEDEKLİ ÇALIŞMA İLE İLGİLİ KAVRAMLAR

3.1. Bozulma Hızı Ve Bozulma Yoğunluğu

Bir sistemin güvenilirliğini hesaplayabilmenin ilk adımı, sistemin bileşenlerinin güvenilirliğinin bilinmesidir. Bu bileşenler için güvenilirlik modelleri istatistik bilgilerinden çıkarılmaktadır. **Tablo 3.1**'de bir 10 adet mekanik bileşenin bozulma zamanları görülmektedir.

Tablo 3.1: 10 adet mekanik bileşen için bozulma zamanları bilgisi

Bozulma	Çalışma Zamanı, saat
1	84
2	231
3	340

4	451
5	605
6	902
7	1200
8	1396
9	1920
10	2523

Tablodaki 10 bozulmanın sonunda, mekanik bileşenlerin tamamı kullanılamaz hale gelmiştir. Herhangi bir t anında çalışır durumda olan ürünler $n(t)$ işleviyle ifade edilmektedir. $t_i < t \leq t_i + \Delta t_i$ aralığında bozulma yoğunluk fonksiyonu bu aralıktaki bozulmaların başlangıçtaki ürün sayısına oranıyla ifade edilir:

$$f(t) = \frac{[n(t_i) - n(t_i + \Delta t_i)] / N}{\Delta t_i} \quad (3.1)$$

Bozulma oranı ise, başlangıçtaki ürün sayısı değil, kalan ürün sayısının aynı aralıktaki bozulmalar oranıyla ifade edilir:

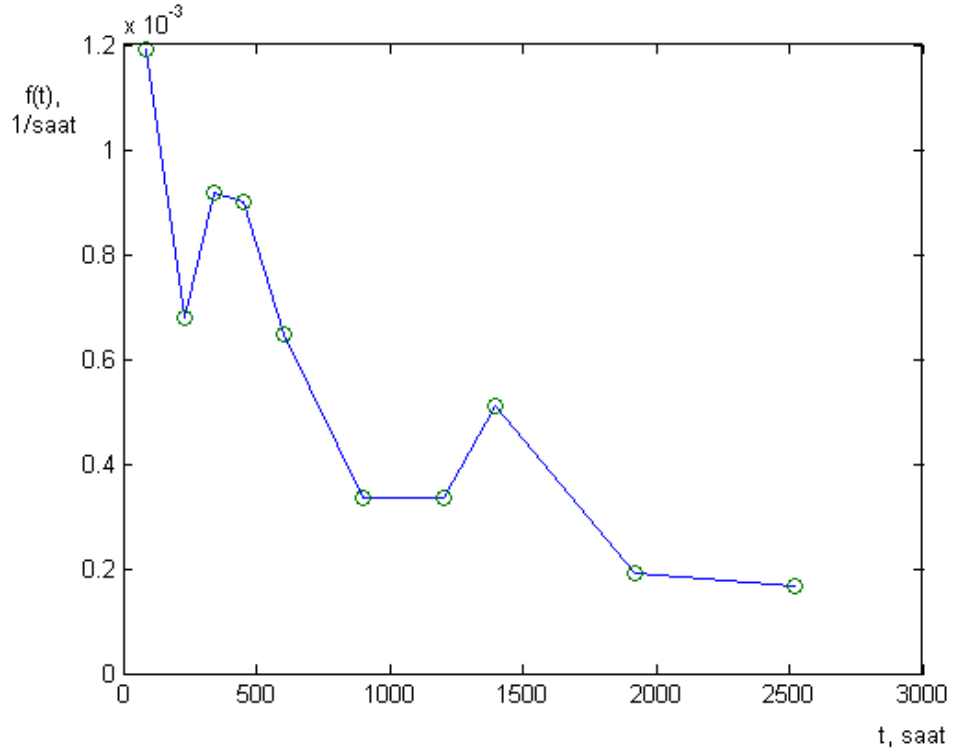
$$b(t) = \frac{[n(t_i) - n(t_i + \Delta t_i)] / n(t_i)}{\Delta t_i} \quad (3.2)$$

Bu tanımlara göre bozulma yoğunluk işlevi ve bozulma oranlarının **Tablo 3.1**'deki değerlere göre hesabı **Tablo 3.2**'de görülmektedir. Yeteri kadar fazla sayıda ürüne ilişkin veriler toplanarak bu işlevler sürekli işlevler haline getirilebilir. Süreklilik özelliği gösteren bozulma yoğunluk işlevi tanımından da anlaşılacağı gibi bir olasılık yoğunluk işlevidir ve bozulma olasılığı yoğunluk işlevi olarak ifade edilebilir. Bozulma oranı işlevi ise bu durumda bozulma hızı olarak ifade edilmektedir.

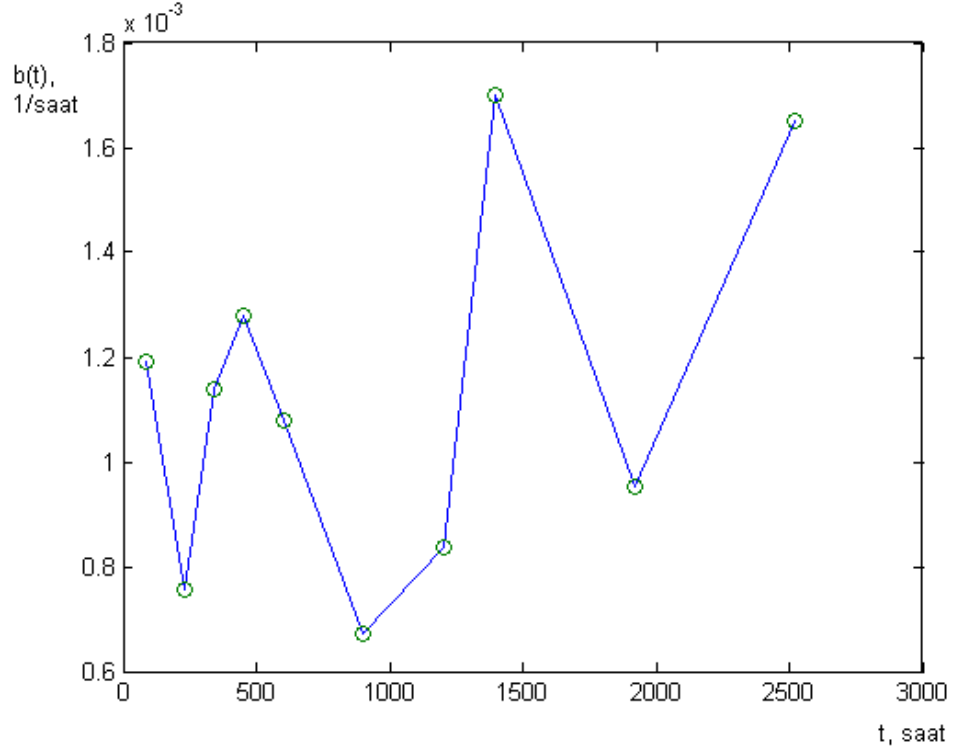
Tablo 3.2: 10 adet mekanik bileşen için bozulma zamanları bilgisinden bozulma yoğunluğu ve bozulma oranının hesaplanması

Zaman Aralığı, saat	Bozulma Yoğunluğu, 1/saat	Bozulma Hızı, 1/saat
0-84	$\frac{1}{10 \times 84} = 0.00119$	$\frac{1}{10 \times 84} = 0.00119$
84-231	$\frac{1}{10 \times 147} = 0.00068$	$\frac{1}{9 \times 147} = 0.000755$

231-340	$\frac{1}{10 \times 109} = 0.000917$	$\frac{1}{8 \times 109} = 0.00114$
340-451	$\frac{1}{10 \times 111} = 0.0009$	$\frac{1}{7 \times 111} = 0.00128$
451-605	$\frac{1}{10 \times 154} = 0.000649$	$\frac{1}{6 \times 154} = 0.00108$
605-902	$\frac{1}{10 \times 297} = 0.000336$	$\frac{1}{5 \times 297} = 0.000673$
902-1200	$\frac{1}{10 \times 298} = 0.000335$	$\frac{1}{4 \times 298} = 0.000838$
1200-1396	$\frac{1}{10 \times 196} = 0.00051$	$\frac{1}{3 \times 196} = 0.0017$
1396-1920	$\frac{1}{10 \times 524} = 0.00019$	$\frac{1}{2 \times 524} = 0.000954$
1920-2523	$\frac{1}{10 \times 603} = 0.000165$	$\frac{1}{1 \times 603} = 0.00165$



Şekil 3.1: Tablo 3.2’deki verilere ilişkin bozulma yoğunluk işlevi



Şekil 3.2: Tablo 3.2’deki verilere ilişkin bozulma hızı işlevi

3.2. Güvenilirlik

Mühendislik anlamında güvenilirlik, bir sistemin belirli bir zamanda ve tanımlı koşullar altında görevini başarıyla yerine getirmesi ihtimali olarak tanımlanabilir. Görevin eksik yapılması veya hiç yapılmaması durumları ise bozulma olarak tanımlanır.[2]

Bölüm 3.1’de tanımlanan bozulma olasılığı yoğunluk işlevinin olasılık dağılım işlevi belirli bir süre içindeki bozulma olasılığını verir:

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt \quad (3.3)$$

Güvenilirlik bozulmama olasılığı olduğundan güvenilirlik ile bozulma olasılığı arasındaki ilişki,

$$G(t) = 1 - F(t) \quad (3.4)$$

olarak ifade edilebilir. Olasılık yoğunluk işlevi, zaman sonsuza giderken 1 değerine yaklaşacağından, güvenilirlik işlevi 0 değerine yaklaşacaktır. Güvenilirlik işlevi,

bozulma olasılık dağılım işlevinin tümleyeni olduğundan, güvenilirlik işlevi bozulma yoğunluk işlevi cinsinden

$$G(t) = \int_t^{\infty} f(t)dt \quad (3.5)$$

olarak ifade edilir.

3.3. Güvenilirlik İle Bozulma Hızı Arasındaki İlişki

Bölüm 3.1'deki N adet bileşenin t anında henüz bozulmamış olanlarının sayısı rastsal değişken N(t) ile ifade edilirse, bileşenlerin bozulma ihtimallerinin birbirinden bağımsız olduğu varsayılarak N(t)'nin bir binom dağılımı olduğu düşünülebilir.[7]

$$P(N(t) = B[n; N, G(t)]) = \frac{N!}{n!(N-n)!} [G(t)]^n [1-G(t)]^{N-n}, n = 0, 1, \dots, N \quad (3.6)$$

Binom dağılımına sahip bir rastsal değişkenin beklenen değeri NG(t) ile verildiğinden,

$$n(t) = NG(t), G(t) = \frac{n(t)}{N} \quad (3.7)$$

Dolayısıyla, güvenilirlik, t anındaki ortalama bozulmamış bileşenlerin toplam bileşen sayısına oranıdır. Denklem 2.1 ve 2.2 'den,

$$b(t) = f(t) \frac{N}{n(t)} = \frac{f(t)}{G(t)} \quad (3.8)$$

$$b(t) = -\frac{dn(t)}{dt} \frac{1}{N} \frac{N}{n(t)} = -\frac{d}{dt} \ln(t) \quad (3.9)$$

$$\ln n(t) = -\int_0^t z(\tau) d\tau \quad (3.10)$$

$$n(t) = c \exp \left[- \int_0^t z(\tau) d\tau \right] \quad (3.11)$$

Başlangıçta N adet bileşen olduğunu yani $n(0) = N$ olduğunu değerlendirerek,

$$n(t) = N \exp \left[- \int_0^t z(\tau) d\tau \right] \quad (3.12)$$

Denklem 2.7 'den bozulma hızı ile güvenilirlik arasındaki ilişki:

$$G(t) = \exp \left[- \int_0^t b(\tau) d\tau \right] \quad (3.13)$$

olarak elde edilir.

3.4. Beklenen Bozulma Süresi

Beklenen bozulma süresi, bozulma olasılık yoğunluk işlevinin beklenen değeridir. Bir olasılık yoğunluk işlevinin beklenen değeri,

$$E(t) = \int_0^{\infty} t f(t) dt \quad (3.14)$$

ile verilir. Buradan,

$$BBS = \int_0^{\infty} t f(t) dt \quad (3.15)$$

Güvenilirlik ile bozulma yoğunluk işlevi arasındaki ilişki kullanılarak, güvenilirlik işlevi ile beklenen bozulma süresi arasındaki ilişki aşağıdaki gibi elde edilir.

$$BBS = \int_0^{\infty} G(t) dt \quad (3.16)$$

3.5. Bileşen Güvenilirlikleri

Bu bölümde, bu çalışmanın ilerleyen bölümlerinde kullanılan bileşen güvenilirlik modelleri yer almaktadır. Her bir bileşenin yapısı farklı olduğuna göre güvenilirlik davranışları da farklı olacaktır. Ancak mekanik, elektronik ve yazılım bileşenleri için ortak modeller kullanılarak iyi bir yaklaşıklık sağlanabilir.

3.5.1. Elektronik Bileşenler

Elektronik bileşenlerde genel kabul gören bozulma hızı işlevi sabit değerli bir işlevdir.

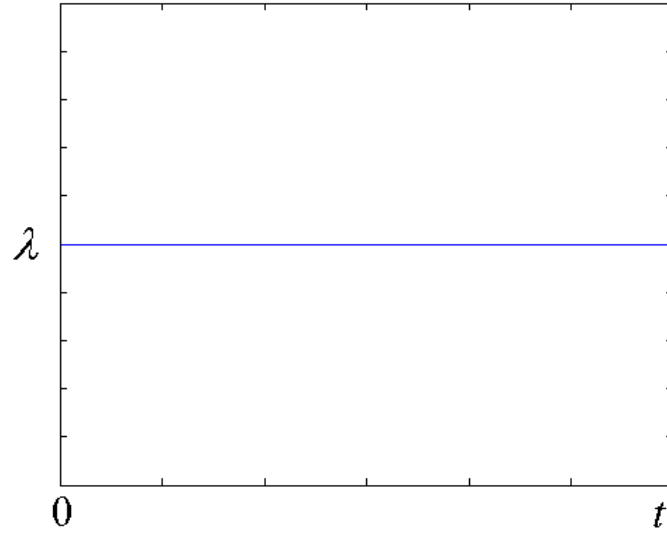
$$b(t) = \lambda \quad (3.17)$$

Bu bozulma hızı işlevinden elde edilen bozulma yoğunluk işlevi ve güvenilirlik işlevleri aşağıdaki gibidir:

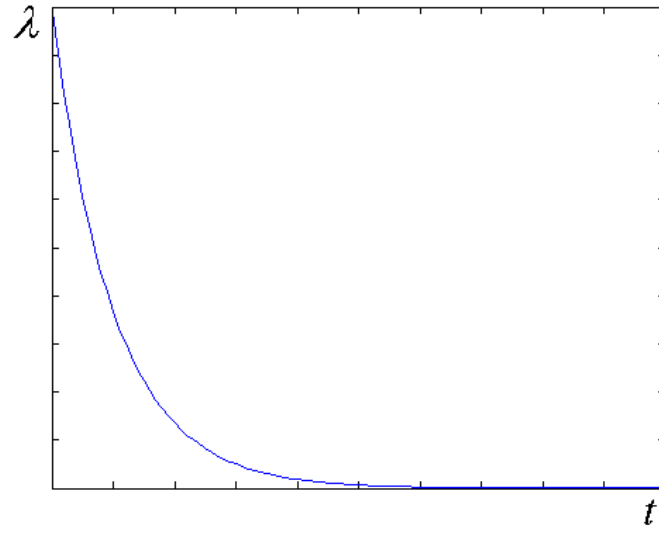
$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (3.18)$$

$$G(t) = e^{-\lambda t} \quad (3.19)$$

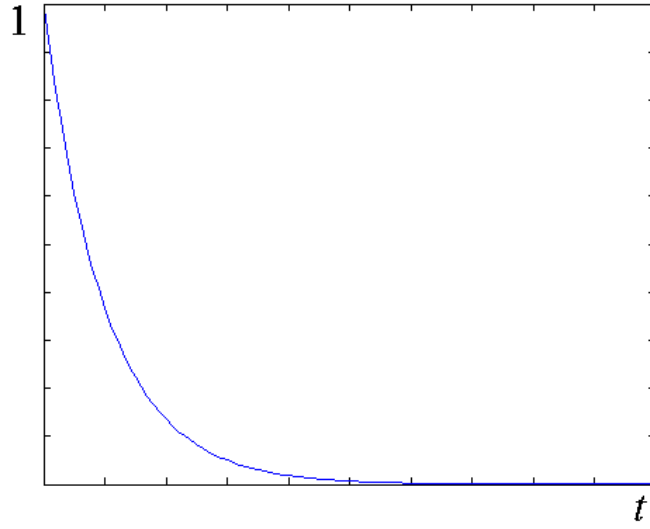
Şekil 3.3, **Şekil 3.4** ve **Şekil 3.5**'te bu işlevlerin grafikleri görülmektedir. Görüldüğü gibi sabit bozulma hızına sahip elektronik bileşenlerin güvenilirlikleri, zamanla üstel olarak azalmaktadır. Elektronik bileşenler için güvenilirlik işlevinden görüldüğü gibi, elektronik bileşen, kullanılmaya başlamadan önce tam güvenilirliğe, sonsuz zaman içinde sıfır güvenilirliğe sahiptir.



Şekil 3.3: Elektronik Bileşenlere ilişkin bozulma hızı işlevi



Şekil 3.4: Elektronik bileşenlere ilişkin bozulma olasılık yoğunluk işlevi



Şekil 3.5: Elektronik Bileşenler için Güvenilirlik İşlevi.

Beklenen bozulma süresi denklem 3.16' dan,

$$BBS = \int_0^{\infty} G(t)dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \left. \frac{e^{-\lambda t}}{-\lambda} \right|_0^{\infty} = \frac{1}{\lambda} \quad (3.20)$$

olarak elde edilir.

3.5.2. Mekanik Bileşenler

Mekanik bileşenler, elektronik bileşenlerden farklı olarak zamanla bozulma hızlarını artırma eğilimindedirler. Dolayısıyla bu bileşenlerin bozulma hız işlevleri zamana bağımlı olmalıdır. Akla ilk gelen ve yaygın olarak kullanılan mekanik bileşen bozulma hızı işlevi, zamanla doğrusal olarak bozulma hızının arttığı işlevdir.

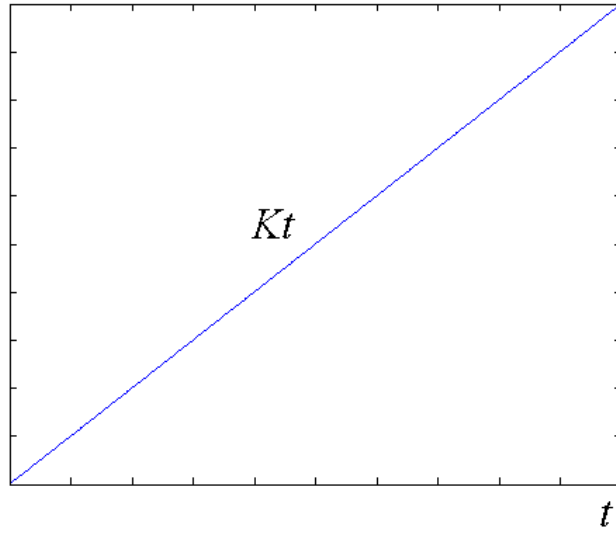
$$b(t) = Kt \quad (3.21)$$

Bu bozulma hızı işlevinden elde edilen bozulma yoğunluk işlevi ve güvenilirlik işlevleri aşağıdaki gibidir:

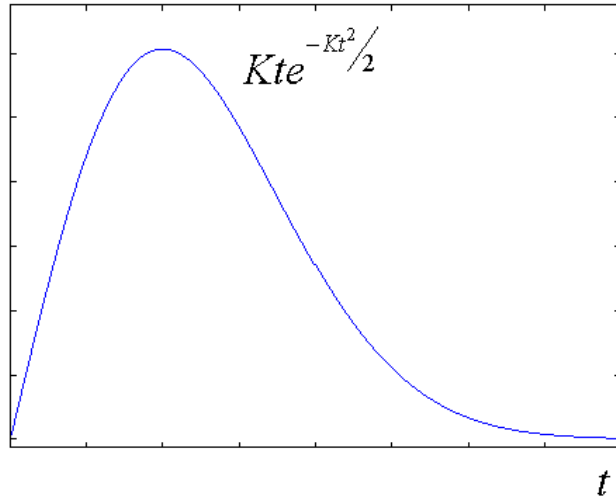
$$f(t) = Kte^{-Kt^2/2} \quad (3.22)$$

$$G(t) = e^{-Kt^2/2} \quad (3.23)$$

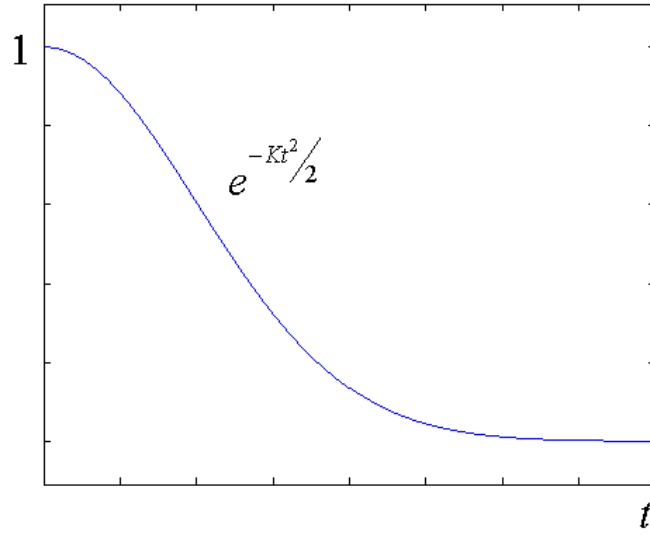
Şekil 3.6, Şekil 3.7 ve Şekil 3.8’de bu işlevlerin grafikleri görülmektedir.



Şekil 3.6: Mekanik Bileşenlere ilişkin bozulma hızı işlevi



Şekil 3.7: Mekanik Bileşenlere ilişkin bozulma olasılık yoğunluk işlevi



Şekil 3.8: Mekanik Bileşenlere İlişkin Güvenilirlik İşlevi

Beklenen bozulma süresi denklem 3.16'dan,

$$BBS = \int_0^{\infty} G(t)dt = \int_0^{\infty} e^{-Kt^2/2} = \sqrt{\frac{\pi}{2K}} \quad (3.24)$$

olarak elde edilir.

3.5.3. Yazılım Bileşenleri

Yazılım bileşenlerinin elektronik ve mekanik bileşenlerden temel bir farkı, zamanla fiziksel değişime uğramamalarıdır. Fiziksel değişime uğramama, zamanla bozulma hızı artmaz şeklinde yorumlanamaz. Kullanım koşulları değiştiğinde, yazılımda var olan ancak o zamana kadar ortaya çıkmamış bulunan hatalar ortaya çıkabilir ve bu bozulma hızını artırabilir. Ancak tecrübeler ve test sonuçları, bozulma hızının zamanla azaldığını göstermektedir. Bozulma hızının zamanla azalması da, zaman arttıkça yazılımın güvenilirliğinin artması olarak yorumlanamaz. Güvenilirlik her zaman azalacaktır çünkü hataların ortaya çıkma ihtimali her zaman vardır. Bozulma hızının zamanla azalması, sadece güvenilirliğin elektronik ve mekanik bileşenlere göre daha yavaş azalacağı anlamına gelir. Matematiksel olarak da güvenilirlik işlevinin olasılık dağılım işlevinin tümleyeni olduğu düşünülürse, birikimli olarak azalan bir işlev olduğu anlaşılabilir.[5]

Bu bilgilerle, yazılım için bozulma hızının zamanla azaldığı Weibull modeli seçilmiştir. Bu modelde bozulma hızı işlevi aşağıdaki gibi verilir:

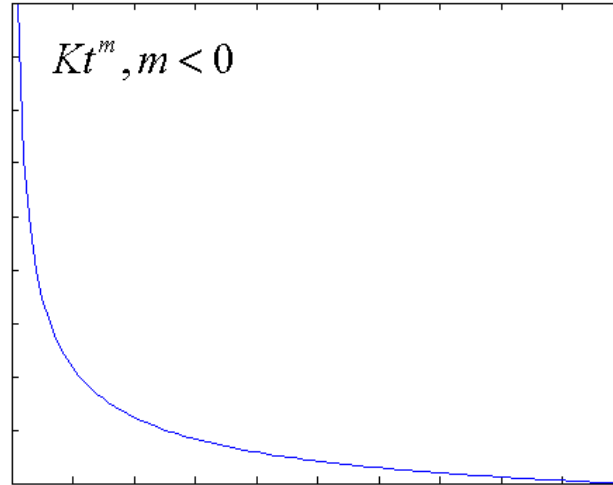
$$b(t) = Kt^m, m > 1 \quad (3.25)$$

Bu bozulma hızına ilişkin bozulma yoğunluk ve güvenilirlik işlevleri, denklem 3.8 ve denklem 3.3'ten aşağıdaki gibi elde edilir:

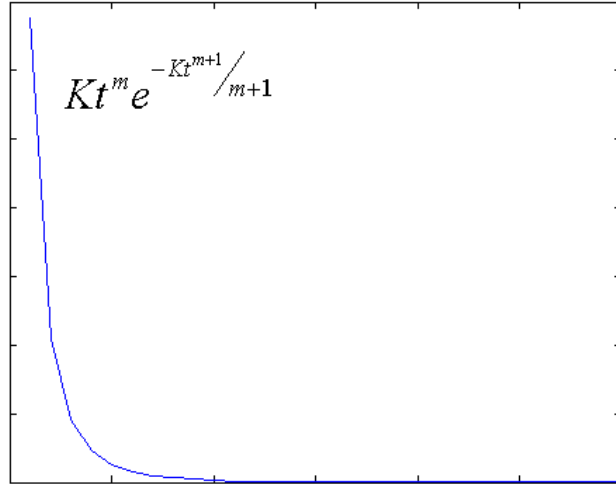
$$f(t) = Kt^m e^{-Kt^{m+1}/(m+1)} \quad (3.26)$$

$$G(t) = e^{-Kt^{m+1}/(m+1)} \quad (3.27)$$

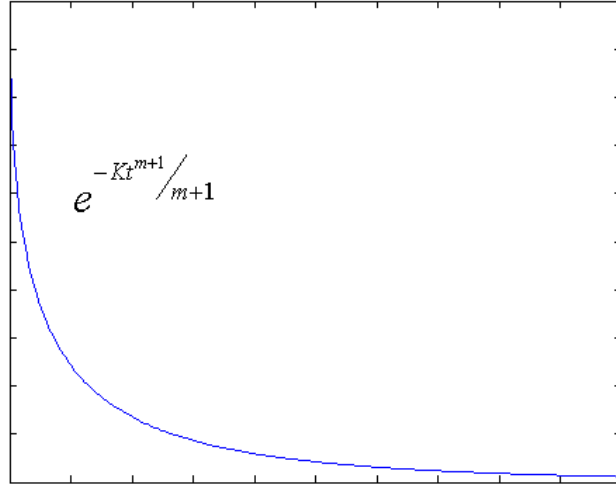
K ve m parametreleri elde edilen test verileri kullanılarak kestirilebilir. Eğer bozulma hızı zamanla azalıyorsa, m parametresi negatif bir sayı olmalıdır. **Şekil 3.9**, **Şekil 3.10** ve **Şekil 3.11**'de m= -0.5 değeri ile bu işlevlerin grafikleri görülmektedir.



Şekil 3.9: Yazılım Bileşenlerine ilişkin bozulma hızı işlevi



Şekil 3.10: Yazılım Bileşenlerine ilişkin bozulma olasılık yoğunluk işlevi



Şekil 3.11: Yazılım Bileşenlerine ilişkin Güvenilirlik İşlevi

Beklenen bozulma süresi denklem 3.16'dan,

$$BBS = \int_0^{\infty} G(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-Kt^{m+1}/(m+1)} dt = \frac{\Gamma\left[\frac{(m+1)}{(m+2)}\right]}{\left[K/(m+1)\right]^{1/(m+1)}} \quad (3.28)$$

olarak elde edilir.

4. ÖRNEK BİR İNSANSIZ HAVA ARACI İÇİN GÜVENİLİRLİK ANALİZİ

Bu bölümde örnek bir insansız hava aracının bileşen düzeyinden başlayarak sistem düzeyinde güvenilirlik analizi yapılmıştır. Karşılaştırma amacıyla ilk önce sistemin yedekli olmayan biçimi incelenmiştir.

4.1. Yedeksiz Sistem

4.1.1. Elektronik Bileşenler

Örnek insansız hava aracının elektronik bileşenleri hava aracının durum bilgilerinin elde edilmesini sağlayan duyargalar, uçuş kontrol bilgisayarı ve kontrol yüzeylerinin konum duyargalarıdır. **Tablo 4.1'** de hava aracının üzerindeki duyargaların ve uçuş kontrol bilgisayarının görevleri ve BBS değerleri verilmiştir. İlgili bölümde açıklandığı gibi elektronik bileşenler için sabit bozulma hızı varsayılmıştır.

Tablo 4.1: Örnek İnsansız Hava Aracının Elektronik Bileşenlerinin Bozulma Hızı ve Beklenen Bozulma Süresi Değerleri

Bileşen	Görev	Bozulma Hızı, 1/saat	BBS, saat
İvmeölçer X	Hava aracının X eksenindeki ivmesinin ölçümü	0.000002	500000
İvmeölçer Y	Hava aracının Y eksenindeki ivmesinin ölçümü	0.000002	500000
İvmeölçer Z	Hava aracının Z eksenindeki ivmesinin ölçümü	0.000002	500000
Cayro X	Hava aracının X eksenindeki açısal hızının ölçümü	0.0000035	285714
Cayro Y	Hava aracının Y eksenindeki açısal hızının ölçümü	0.0000035	285714
Cayro Z	Hava aracının Z eksenindeki açısal hızının ölçümü	0.0000035	285714
Devimsel Basınç	Hava aracının havaya göre hızının ölçümü	0.0000045	222222
Durgun Basınç	Hava aracının bulunduğu yükseklikteki atmosfer basıncının ölçümü	0.0000025	176366

GPS	Küresel konumlandırma Sistemi	0.00000567	176366
Devir Duyargası	Pervane devrinin ölçümü	0.000014	71428
Yükseliş Dümeni 1	Yükseliş Dümeni konumunun ölçümü	0.0000011	909090
Yükseliş Dümeni 2	Yükseliş Dümeni konumunun ölçümü	0.0000011	909090
Kanatçık 1	Kanatçık konumunun ölçümü	0.0000011	909090
Kanatçık 2	Kanatçık konumunun ölçümü	0.0000011	909090
Gaz	Gaz Konumunun Ölçümü	0.0000014	714285
Uçuş Kontrol Bilgisayarı	Uçuş Kontrolü	0.0000175	57142
Duyarga Ağı	Duyargalar ile Uçuş Kontrol Bilgisayarı arası veri bağlantısı	0.000000411	2433090
Kontrol Yüzeyi Ağı	Uçuş kontrol bilgisayarı ile kontrol yüzeyleri arası veri bağlantısı	0.000000411	2433090

Bu sistem herhangi bir yedeklilik içermediğinden, herhangi bir bileşenin bozulması sistemin bozulması anlamına gelmektedir. Güvenilirlik işlevi, bütün bileşenlerin bozulmama ihtimallerinden hesaplanabilir. Bileşenin bozulmama ihtimali b_i ile gösterilirse, sistemin bozulmama ihtimali yani güvenilirliği G_s , n adet bileşen için aşağıdaki şekilde gösterilir:

$$G_s = (p_1)(p_2 | p_1)(p_3 | p_2 p_1).....(p_n | p_{n-1} p_{n-2} p_1) \quad (4.1)$$

Bileşenlerin bozulma ihtimallerinin birbirinden bağımsız olduğu varsayımı ile güvenilirlik işlevi, bileşenlerin bozulmama ihtimallerinin çarpımına eşit olur:

$$G_s = (p_1)(p_2).....(p_n) = \prod_{k=1}^n p_k \quad (4.2)$$

Denklem 3.19' dan,

$$G_s(t) = \prod_{k=1}^n e^{-\lambda_k t} \quad (4.3)$$

$$G_s(t) = e^{\left(\sum_{k=1}^n -\lambda_k t\right)} \quad (4.4)$$

Tablo 4.1’ deki değerleri kullanarak,

$$G_s(t) = e^{-0.000067292t} \quad (4.5)$$

olarak elde edilir. Denklem 3.20’ den,

$$BBS = 14860 \text{ saat} \quad (4.6)$$

değerine ulaşılır. Elde edilen bu güvenilirlik işlevini kullanarak 10 saatlik bir uçuş süresi için elektronik bileşenin bozulmama olasılığı,

$$G_s(t) = e^{-0.00067292} = 0.999327 \quad (4.7)$$

Olarak hesaplanır.

4.1.2. Mekanik Bileşenler

Örnek insansız hava aracında mekanik bileşenler, kontrol yüzeyleri ve motordur. **Tablo 4.2’** de bileşenlerin görevleri ve bozulma hızları verilmiştir. Mekanik bileşenler için daha önce bahsedildiği gibi zamanla azalan bozulma hızı varsayılmıştır.

Tablo 4.2: Örnek İnsansız Hava Aracının Mekanik Bileşenlerinin Bozulma Hızı ve Beklenen Bozulma Süresi Değerleri

Bileşen	Görev	Bozulma Hızı, 1/saat	BBS, saat
Kanatçık 1	Hava aracının yatış açısının kontrolü	0.00000012t	3618
Kanatçık 2	Hava aracının yatış açısının kontrolü	0.00000012t	3618
Dümen 1	Hava Aracının yönelme ve dikilme açılarının kontrolü	0.00000012t	3618
Dümen 2	Hava Aracının yönelme ve dikilme açılarının kontrolü	0.00000012t	3618
Gaz	Hava Aracının motorunun gaz kontrolü	0.00000014t	3349
Motor	Hava Aracının İtkisinin üretilmesi	0.0000023t	826

Denklem 4.2 ve denklem 3.23 ' ten

$$G_s(t) = \prod_{a=1}^n e^{-\frac{1}{2}K_a t^2} \quad (4.8)$$

Tablo 4.2' deki değerleri kullanarak güvenilirlik işlevi,

$$G_s(t) = e^{-0.00000146t^2} \quad (4.9)$$

olarak elde edilir. Denklem 3.24 ' ten

$$BSS = 733 \text{ saat} \quad (4.10)$$

Olarak hesaplanır. 10 saatlik bir uçuş için mekanik bileşenin bozulmama olasılığı,

$$G_s(t) = e^{-0.00000146 \cdot 100} = 0.999854 \quad (4.11)$$

olarak hesaplanır.

4.1.3. Yazılım Bileşeni

Yazılım bileşeni için bölüm 3.5.3'te verilen model kullanılmıştır. Tablo 4.3'te sistemin yazılım testleri ve uçuş testleri sırasında bulunan hava aracının kaybına sebep olabilecek hatalar ve bunların ortaya çıkış zamanları görülmektedir.

Tablo 4.3: rnek İnsansız Hava Aracının Yazılım Hatalarının Ortaya ıkma Zamanları

Zaman Aralığı, saat	Bozulma Hızı, 1/saat
0-1960	0.00051
1960-4020	0.000485
4020-9936	0.000169

K ve m parametrelerinin bulunması için MathWorks Curve Fitting Toolbox 1.2.1 yazılımı kullanılmıştır. Elde edilen değerler aşağıdaki şekildedir:

$$K = 0.0889$$

$$m = -0.376$$

Bu değerlerle denklem 3.28 ' den

$BSS = 1324 \text{ saat}$ olarak elde edilir.

4.1.4. Bütün Sistem

Sistemin bütünün güvenilirlik işlevini hesaplamak için mekanik, elektronik ve yazılım bileşenlerinin güvenilirliklerinin çarpımını almak, bu bileşenlerin bozulma ihtimallerinin birbirinden bağımsız olması koşuluyla, yeterlidir. Buna göre,

$$G_s(t) = G_m(t)G_e(t)G_y(t) \quad (4.12)$$

Sistemin beklenen bozulma değerini hesaplamak için, bütün bileşenlerin bozulma hızları sabit varsayılırsa yaklaşık bir değer bulunabilir. Denklem 3.20 ' den,

$$\lambda_m = 1/733 = 0.001364$$

$$\lambda_e = 1/14860 = 0.00006729$$

$$\lambda_y = 1/1324 = 0.000755$$

$$\lambda_s = \lambda_m + \lambda_e + \lambda_y = 0.002186$$

$$BBS_s \cong 1/0.002186 \cong 458 \text{ saat}$$

Bu değer göre 10 saatlik bir uçuş süresi için tüm sistemin bozulmama olasılığı,

$$G_s(t) = e^{-0.002186t} = 0.997816$$

olarak hesaplanır.

4.2. İkili Bağdaşık Sistem

İkili bağdaşık sistem, bölüm 4.1' deki sistemin bütün bileşenlerinin ikili yedeklerinden oluşmaktadır. Bu bölümde yazılım bileşeni aynı kabul edildiğinden yazılım bileşeninin güvenilirliği hesaplanmamıştır.

4.2.1. Elektronik Bileşenler

Hava aracının bütün elektronik bileşenlerinin ikili yedeği olması durumunda, tüm bileşenler yedekleriyle birlikte tek bir bileşen gibi düşünülüp bu bileşenin güvenilirliği hesaplandıktan sonra, yedeksiz sistemde olduğu gibi hesaplamalara devam edilebilir. İkili bileşenin bozulma olasılığı bileşenlerin ikisinin birden bozulma olasılıklarına eşittir. Denklem 3.4 'ten

$$G_1(t) = e^{-\lambda t} = 1 - F_1(t) \quad (4.13)$$

$$F_1(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (4.14)$$

Bileşenlerin bozulma olasılıklarının birbirinden bağımsız olduğu varsayılırsa,

$$F(t) = F_1(t)F_2(t) = (1 - e^{-\lambda t})(1 - e^{-\lambda t}) \quad (4.15)$$

$$F(t) = 1 - 2e^{-\lambda t} + e^{-2\lambda t} \quad (4.16)$$

$$G(t) = 1 - F(t) = 2e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t} \quad (4.17)$$

Denklem 3.20 ' den,

$$BBS = \int_0^{\infty} G(t)dt = \int_0^{\infty} (2e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t})dt = \left[-\frac{2}{\lambda} + \frac{1}{2\lambda} \right]_0^{\infty} = \frac{3}{2\lambda} \quad (4.18)$$

Buna göre ikili bileşenin bozulma hızı sabiti $\frac{2\lambda}{3}$ olmaktadır. Denklem 4.4 ve 4.5' ten,

ikili elektronik bileşenin güvenilirliği

$$G_s(t) = e^{-0.00044861t} \text{ olur. Denklem 3.20 ' den,}$$

$$BSS = 22291 \text{ saat}$$

olarak elde edilir. bu güvenilirlik işlevini kullanarak 10 saatlik bir uçuş süresi için elektronik bileşenin bozulmama olasılığı,

$$G_s(t) = e^{-0.00044861t} = 0.999551$$

olarak hesaplanır.

4.2.2. Mekanik Bileşenler

İkili yedekli elektronik bileşenlerde olduğu gibi, ikili mekanik bileşenler de tek bir bileşen gibi düşünülmelidir. Denklem 3.23'ten,

$$F(t) = F_1(t)F_2(t) = (1 - e^{-Kt^2/2})(1 - e^{-Kt^2/2}) \quad (4.19)$$

$$F(t) = (1 - 2e^{-Kt^2/2} + e^{-Kt^2}) \quad (4.20)$$

$$G(t) = 1 - F(t) = 2e^{-Kt^2/2} - e^{-Kt^2} \quad (4.21)$$

Denklem 3.16 ' dan,

$$BBS = \int_0^{\infty} G(t)dt = \sqrt{\frac{2\pi}{K}} \operatorname{erf}\left(\sqrt{\frac{K}{2}}t\right) - \sqrt{\frac{\pi}{4K}} \operatorname{erf}(t\sqrt{K}) \quad (4.22)$$

$$BBS = \int_0^{\infty} G(t)dt = \sqrt{\frac{2\pi}{K}} - \sqrt{\frac{\pi}{4K}} \quad (4.23)$$

$$BBS = \left(\sqrt{2} - \frac{1}{2}\right)\sqrt{\frac{\pi}{K}} \quad (4.24)$$

İkili bileşenin K parametresi aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$BBS = \sqrt{\frac{\pi}{2K_{ikili}}} = \sqrt{\frac{1}{2}}\sqrt{\frac{\pi}{K_{ikili}}} \quad (4.25)$$

$$\sqrt{\frac{1}{2}}\sqrt{\frac{\pi}{K_{ikili}}} = \left(\sqrt{2} - \frac{1}{2}\right)\sqrt{\frac{\pi}{K}} \quad (4.26)$$

$$\frac{\sqrt{\frac{1}{K_{ikili}}}}{\sqrt{\frac{1}{K}}} = 1.293 \quad (4.27)$$

$$K_{ikili} = 0.5981 K \quad (4.28)$$

Tablo 4.4: İkili Bileşenli Mekanik Sistemin Bozulma Hızı ve Beklenen Bozulma Süresi Değerleri

Bileşen	Görev	Bozulma Hızı, 1/saat	BBS, saat
Kanatçık 1	Hava aracının yatış açısının kontrolü	0.0000000717t	4680
Kanatçık 2	Hava aracının yatış açısının kontrolü	0.0000000717t	4680
Dümen 1	Hava Aracının yönelme ve dikilme açılarının kontrolü	0.0000000717t	4680
Dümen 2	Hava Aracının yönelme ve dikilme açılarının kontrolü	0.0000000717t	4680
Gaz	Hava Aracının motorunun gaz kontrolü	0.00000008374	4331
Motor	Hava Aracının İtkisinin üretilmesi	0.0000023t	826

4.8’den ve **Tablo 4.3**’teki değerleri kullanarak;

$$G_s(t) = e^{-0.00000133527t^2} \quad (4.29)$$

Denklem 3.16 ’ dan

$$BSS = 766 \text{ saat} \quad (4.30)$$

ve 10 saatlik bir uçuş için mekanik bileşenin bozulmama olasılığı,

$$G_s(t) = e^{-0.0000013352*100} = 0.999866 \quad (4.31)$$

Olarak hesaplanır.

4.2.3. Bütün Sistem

Sistemin bütünün güvenilirlik işlevini hesaplamak için mekanik, elektronik ve yazılım bileşenlerinin güvenilirliklerinin çarpımını almak, bu bileşenlerin bozulma ihtimallerinin birbirinden bağımsız olması koşuluyla, yeterlidir. Buna göre;

$$G_s(t) = G_m(t)G_e(t)G_y(t) \quad (4.32)$$

Sistemin beklenen bozulma değerini hesaplamak için, bütün bileşenlerin bozulma hızı sabit varsayılarak yaklaşık bir değer elde edilebilir. Elde edilen BBS değerlerinden,

$$\lambda_m = 1/766 = 0.00130$$

$$\lambda_e = 1/22291 = 0.00004486$$

$$\lambda_y = 1/1324 = 0.000755$$

$$\lambda_s = \lambda_m + \lambda_e + \lambda_y = 0.00209986$$

$$BBS_s \cong 1/0.00209986 \cong 476 \text{ saat}$$

4.3. Üçlü Sistem

Bu bölümde sadece elektronik bileşenler için üçlü yedekli çalışmanın güvenilirlik incelemesi yapılmıştır.

4.3.1. Elektronik Bileşenler

Hava aracının bütün elektronik bileşenlerinin üçlü yedeği olması durumunda, tüm bileşenler yedekleriyle birlikte tek bir bileşen gibi düşünülüp bu bileşenin güvenilirliği hesaplandıktan sonra, yedeksiz sistemde olduğu gibi hesaplamalara devam edilebilir. Üçlü bileşenin bozulma olasılığı bileşenlerin iki veya daha fazlasının bozulma olasılıklarına eşittir. Üç bileşenin üçünün birden bozulma olasılığı hesaplanırsa üçlü bileşenin bozulma olasılığı hesaplanmış olur. Denklem 3.4' ten

$$G(t) = e^{-\lambda t} = 1 - F(t)$$

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$$

$$F_s(t) = F(t)^3 \quad (4.33)$$

$$F_s(t) = (1 - e^{-\lambda t})^3 \quad (4.34)$$

$$G_s(t) = 1 - F_s(t) = 3e^{-\lambda t} - 3e^{-2\lambda t} + e^{-3\lambda t} \quad (4.35)$$

$$BBS = \int_0^{\infty} G(t) dt = \int_0^{\infty} (3e^{-\lambda t} - 3e^{-2\lambda t} + e^{-3\lambda t}) dt = \frac{3}{\lambda} - \frac{3}{2\lambda} + \frac{1}{3\lambda} = \frac{11}{6\lambda} \quad (4.36)$$

$$\lambda_s = \frac{6}{11} \lambda \quad (4.37)$$

Denklem 4.4 ve denklem 4.5 ' ten, ikili elektronik bileşenin güvenilirliği $G_s(t) = e^{-0.00036704t}$ olur. Denklem 3.20 'den,

$BSS = 27244$ saat olarak elde edilir. Elde edilen bu güvenilirlik işlevini kullanarak 10 saatlik bir uçuş süresi için elektronik bileşenin bozulmama olasılığı,

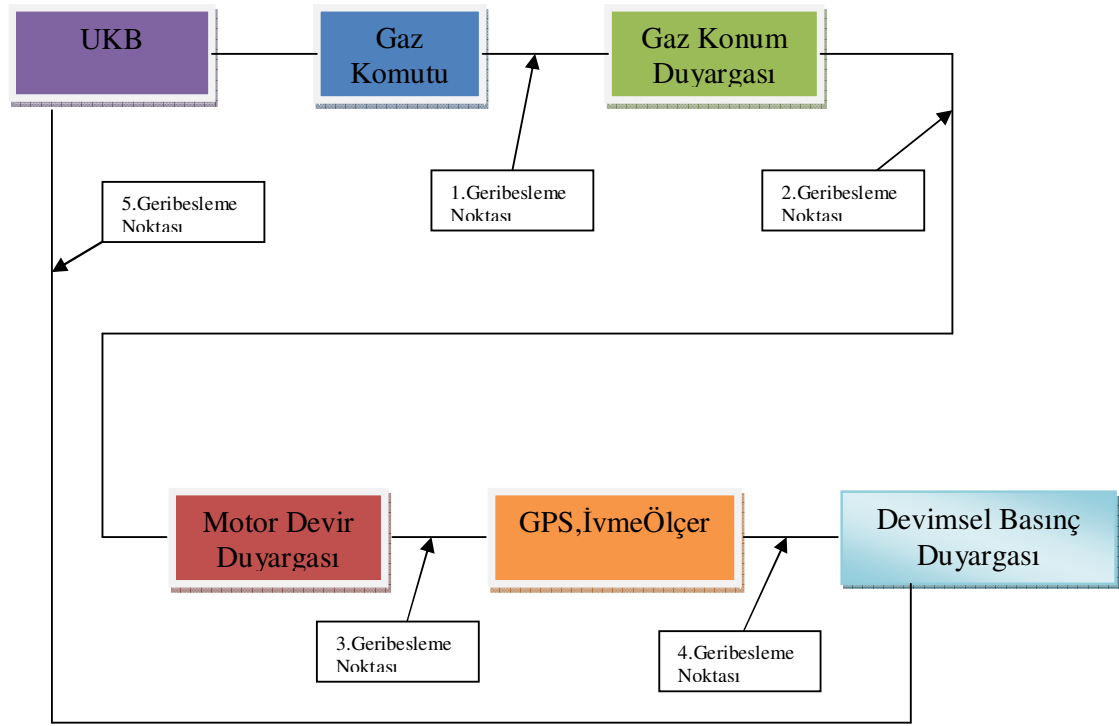
$$G_s(t) = e^{-0.00036704t} = 0.999633 \quad (4.38)$$

olarak hesaplanır.

4.4. Kavramsal Duyargalar İle Yedeklilik

Önceki bölümlerdeki güvenilirlik analizlerinde, farklı tipte duyargaların birbirlerinin bilgilerini doğrulamak için kullanılabileceği dikkate alınmamıştır. Örneğin, devimsel basınç duyargası için ikili ve üçlü yedeklerin yanında, diğer duyargalardan alınan bilgilerin ve sistemin ürettiği komutlardan sağlanan bilgiler de kullanılabilir. **Şekil 4.4** 'te X eksen i vme bilgisi için geribesleme noktaları görülmektedir.

Bütün bileşenler için, veriler arasındaki ilişkiler bilinirse, önceki bölümlerde ihmal edilen alınmayan duyargaların bozulduğu halde veri göndermeye devam etmesi ihtimali de ortadan kaldırılmış olacaktır. Bütün duyargaların hata miktarları incelenip mümkün olan her bir bozulma için elde edilebilecek verilerin doğruluğu elde edilerek güvenilirlik analizini buna göre yapılabilir. Kavramsal duyargalar kavramı ile ifade edilmek istenen, örneğin fiziksel devimsel basınç duyargası değil, devimsel basınç duyargasının ölçtüğü büyüklük hakkında bilgi verebilecek bütün bileşenlerin katkısıyla elde edilen kavramsal duyargadır. Bu duyarganın güvenilirliğini ölçmek için bütün bileşenlerin verilerinin hata miktarları incelenerek hangi durumlarda kavramsal duyarganın geçerli kabul edilebileceği incelenmelidir. Hava aracının uçuş güvenliğinin sağlanması için 6 tane kavram duyarganın çalışmasının yeterli olduğu değerlendirilmektedir. Bunlar, İvmeölçer X, İvmeölçer Y, İvmeölçer Z, Cayro X, Cayro Y, Cayro Z'dir. Hava aracının 16 duyargasının bütün birleşik bozulma durumları $2^{16} = 65536$ kadardır.



Şekil 4.1: X eksenindeki ivme için geribesleme noktaları

Kavramsal duyargalardan geribesleme noktası en az olan biri için güvenilirlik incelenip, kalanlarının güvenilirliğinin de en az o mertebede iyileşeceği düşünülürse, bütün elektronik sistemin güvenilirliği için yaklaşık bir değer belirlenebilir. Bu inceleme için Kavramsal Devimsel Basınç duyargası seçilmiştir. Kavramsal Devimsel basınç duyargasına katkıda bulunan veri kaynakları, **şekil 4.1** 'de görüldüğü gibi Gaz Komutu, Gaz Konum Duyargası, Motor Devir Duyargası, GPS-İvmeölçer takımı, devimsel basınç duyargalarıdır. Hangi bozulma bileşimi için üretilen verinin doğruluğu için istatistik yöntemler bulunmakla birlikte bu çalışma için bozulma durumunun kabul edilebilir olup olmadığı değerlendirilerek belirlenmiştir. Ayrıca, Gaz Komutu ve Gaz Konum duyargası yaklaşık olarak aynı verileri üreteceğinden, ikisinden birinin varlığı gaz konumunun bilinmesi olarak kabul edilmiştir. Bu durumda, 16 farklı bozulma durumu oluşmaktadır. **Tablo 4.4** 'te bu durumlar ve uçuş için yeterli olarak kabul edilenleri görülmektedir.

Tablo 4.5: Kavramsal Devimsel basınç duyargasına katkıda bulunan duyargaların bozulma durumları için kabul/red kararları

Bileşen	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Gaz Konumu	Ç	Ç	Ç	Ç	Ç	Ç	Ç	Ç	B	B	B	B	B	B	B	B
Motor Devir Duyargası	Ç	Ç	Ç	Ç	B	B	B	B	Ç	Ç	Ç	Ç	B	B	B	B
GPS, İvmeölçer	B	B	Ç	Ç	B	B	Ç	Ç	B	B	Ç	Ç	B	B	Ç	Ç
Devimsel Basınç Duyargası	B	Ç	B	Ç	B	Ç	B	Ç	B	Ç	B	Ç	B	Ç	B	Ç
Kabul	K	K	K	K	K	K	K	K	R	K	K	K	R	K	K	K

Görüldüğü gibi, kabul edilemeyecek durumlar Gaz Konumu, GPS-İvmeölçer ve Devimsel Basınç Duyargalarının aynı anda bozulduğu durumlardır. Gaz Konumu bilgisinin bozulması için, gaz komutu bilgisinin ve gaz konum duyargasının birlikte bozulması gerekmektedir. Gaz komutu bilgisinin bozulması ise uçuş kontrol bilgisayarının bozulması anlamına geldiğinden, hesaplamada uçuş kontrol bilgisayarının güvenilirliği kullanılmalıdır. Uçuş kontrol bilgisayarının güvenilirliği ise gaz konum duyargasının güvenilirliğine göre çok küçük olduğu için, ihmal edilmiştir. Tablodan anlaşıldığı gibi, kavramsal devimsel basınç duyargasının bozulması için Gaz konumu, GPS-İvmeölçer takımı ve devimsel basınç duyargasının aynı anda bozulması gerekmektedir. Buna göre kavramsal devimsel basınç duyargasının güvenilirliği denklem 4.34' ten yararlanarak

$$F_s(t) = (1 - e^{-\lambda_1 t})(1 - e^{-\lambda_2 t})(1 - e^{-\lambda_3 t}) \quad (4.39)$$

$$G(t) = 1 - F(t) = e^{-\lambda_1 t} + e^{-\lambda_2 t} + e^{-\lambda_3 t} + e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t} + e^{-(\lambda_1 + \lambda_3)t} + e^{-(\lambda_2 + \lambda_3)t} - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)t} \quad (4.40)$$

Denklem 4.36 ' dan

$$BBS = \int_0^{\infty} G(t) dt = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} + \frac{1}{\lambda_3} - \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_3} - \frac{1}{\lambda_2 + \lambda_3} + \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} \quad (4.41)$$

Tablo 4.1 'deki değerlerden

$$\lambda_1 = 0.0000045, \lambda_2 = 0.0000014, \lambda_3 = 0.00000767,$$

Kavramsal duyarganın bozulma hızı,

$$\lambda_k = 0.000001284 \quad (4.42)$$

olmaktadır. Denklem 3.20 ' den,

$$BBS = 1/0.000001284 = 778816 \text{ saat} \quad (4.43)$$

olarak elde edilir. Bu değer, kavramsal duyargayı oluşturan bütün değerlerin üstündedir. Sonuç olarak, yazılımla sağlanan yedekliliğin güvenilirliği artırdığı görülmektedir.

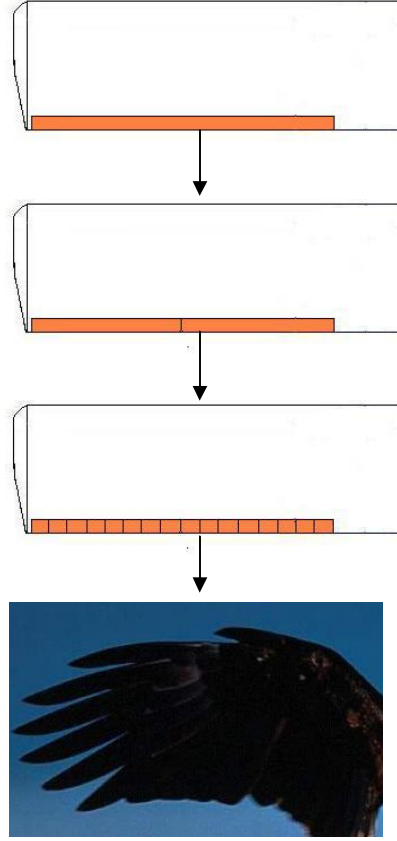
5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Güvenilirlik analizi sonuçları değerlendirilirse, insansız hava araçlarının güvenilirliğini azaltan bileşenlerin mekanik ve yazılım bileşenleri olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 5.5 : Yedeklilik Karşılaştırma Tablosu

	Yedeksiz	İkili	Üçlü
Elektronik	14860 saat	22291 saat	27244 saat
Mekanik	733 saat	766 saat(motor yedeksiz)	-
Yazılım	1324 saat	-	-
Bütün Sistem	458 saat	476 saat	478 saat

Önceki bölümlerdeki bütün analizlerde hava aracında tek bir motor bulunduğu için diğer bileşenlerdeki yedekliliğin sağladığı güvenilirlik artışının, hava aracının tamamının güvenilirliğine katkısı sınırlı kalmıştır. Bu bileşenlerin güvenilirliğini artırmak için, yazılım ve mekanik bileşenler için de bağdaşık yedekli sistem mantığıyla geliştirme yapmak gereklidir. **Şekil 5.1'** de bağdaşık yedekli sistemin gelişme süreci ve doğadaki uçan canlılarla karşılaştırması görülmektedir. Öngörülen bu gelişim, mekanik bileşenlerin tümü için, örnek insansız hava aracının yedeklilik konusunda en az esnekliğe sahip olan motor bileşeni için de geliştirilebilir. Yazılım güvenilirliğinin artırmak içinse, yeterli sayıda farklı yazılımların geliştirilmesi için bir yöntem geliştirmek gerekmektedir. Sistem bütün bu özelliklere sahip olduğunda, hesaplanan güvenilirlik değeri bileşenlerin bölünme sayısı ile fazla artmamakla beraber, sürekli olarak bozulan bileşenlere görev yapma yeteneğine sahip olacaktır. Bozulan bileşenlerin değiştirilebilmesi sayesinde kırım sayılarında önemli ölçüde azalış görülebilecektir.



Şekil 5.1: Bağdaşık Yedekli Sistemin Gelişimi

KAYNAKLAR

- [1] **Shooman, Martin L.**, 2002. Reliability of Computer Systems and Networks. *John Wiley & Sons, Inc.*
- [2] **Faraci, Vito.**, Calculating Failure Rates of Series/Parallel Networks. *Journal of Allion's System Reliability Center, First Quarter 2006.*
- [3] **Weibel, Roland E., Hansman R. John Jr.**, 2004. Safety Considerations for Operation of Different Classes of UAVs in the NAS. *AIAA's 3rd "Unmanned Unlimited" Technical Conference, Workshop and Exhibit, 20-22 September 2004.*
- [4] **Bartlett, J., Gray, J., Horst, B.**, 1986. Fault Tolerance in Tandem Computer Systems. *Tandem Computers, Inc Technical Report 86.2*
- [5] **Yamada, S.**, 2000. Software Reliability Models and Their Applications: A Survey. International Seminar on Software Reliability of Man-Machine Systems *17-18 August 2000.*
- [6] **Pham, H., Pham, M.**, 1991. Software Reliability Models for Critical Applications. *Idaho National Engineering Laboratory, Inc*
- [7] **Akdeniz, F.**, 1998. Olasılık ve İstatistik. *Babil Kitabevi, 1998.*
- [8] **Hawkins, Jeff.**, 2004. On Intelligence. *Times Books, Henry Holt and Company, 2004*

ÖZGEÇMİŞ

Hüseyin Fatih Lokumcu, 18/03/1980 tarihinde İzmir’de doğmuştur. Ortaöğrenimini İzmir Fen Lisesin’nde tamamladıktan sonra İstanbul Teknik Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü’nde lisans eğitimi almıştır. 05.2004 tarihinden bu güne Baykar Makina A.Ş’nin İnsansız Hava Aracı ARGE bölümünde Bilgisayar Mühendisi olarak görev yapmaktadır. Burada geliştirilen uçak ve helikopter sistemlerinin otopilot ve yer kontrol istasyonu yazılım ekiplerinde yer almıştır.