İNSANSIZ HAVA ARACI: NE KADAR GÜVENİLİR?

Yüksel Kenaroğlu
Uçak Yüksek Mühendisi
ykenaroglu@hotmail.com

ÖZET

"Güvenilirlik" (reliability) bir sistemin/aracın/ekipmanın belirlenmiş şartlar altında ve belirlenmiş bir süre için, kendisinden beklenen fonksiyonu gerçekleştirme ve sürdürme yeteneği veya olasılığıdır. Güvenilirliği, ihtiyaca göre, bir sistemin tamamı için veya bu sistemi oluşturan ekipmanlardan biri için tanımlamak mümkündür. Bir İHA (İnsansız Hava Aracı), onun emniyetli bir şekilde kullanımında, yerdeki insana büyük ölçüde bağımlıdır. 1980'li yılların sonunda İHA'larda karşılaşılan kaza oranı, beklenenin çok üzerinde gerçekleşmekteydi. İHA'ların güvenilirliğinde sağlanan iyileştirmelerle bu "çok yüksek" kaza oranı insanlı uçaklarda sağlanan kaza oranı seviyesine getirebildi.

İHA tasarımı ve entegrasyonunda kullanılacak komponentlerin arıza modları ve güvenilirlikleri hakkında "yeterli veya güvenilir bilgi azlığı" İHA tasarımının zayıf noktalarından biridir. İHA'ların sivil hava sahasında rutin olarak kullanılabilmeleri için, güvenilirliklerinin artırılması gerekecektir. İHA'ların sivil kullanımda sigortalanabilmesinin yanı sıra mevcut maliyeti de güvenilirlik artışı için önemli bir motivasyondur. Diğer taraftan, İHA'ların kabul görecek bir güvenilirlik seviyesine eriştirilebilmesi için havacılık endüstrisi önemli gayret göstermektedir. İHA'ların sivil hava sahasına entegrasyonunun sağlanabilmesi için, halen erişilmiş olan güvenilirlik seviyesinin artırılması gerekmektedir. Bunu mümkün kılmak için İHA tedarik bütçelerinde güvenilirlik artırma programları için de kaynak ayrılmalıdır.

Anahtar Kelimeler: İHA, güvenilirlik, emniyet, İHA sertifikasyonu

Unmanned Air Vehicle (UAV) How Reliable?

ABSTRACT

Reliability is defined as a probability or capability that a system, under defined conditions and for a defined time, can carry out the functions that are expected from it. Reliability can be defined according to requirements for a system or for an equipment. An UAV, for its operation safely, is dependent great deal on the operator who stays on the ground. UAV mishap rates had reached well over to the point that had not expected at the end of the 1980's.

UAV mishap rates were brought to comperable mishap rates of the manned aircraft by the reliability improvements. Besides the equipment reliability, it is assumed that low Reynolds Number flight of an UAV may be a contributing, but not well-understood, factor for UAV reliability and mishaps. Primary reliability issues for an UAV were engine and flight control system related failures, respectively, in 1999-2022 period. One of the weakness point of an UAV is the lack of information about failure modes and reliability of the components that are used an UAV design and integration. It is necessary to increase the reliability of UAV's to be able to integrate them in the civil air space. Aviation industry is working hard to increase the reliability level of UAV's to an acceptable level to convince the authorities. Beside these efforts, additional funding for UAV reliability improvements should be considered in the acquisition programs.

Keywords: UAV, reliability, safety, UAV certification

Geliş tarihi : 04.11.2012
Kabul tarihi : 15.02.2013

Kenaroğlu, Y. 2013. "İnsansız Hava Aracı: Ne Kadar Güvenilir?," Mühendis ve Makina, cilt 54, sayı 636, s.54-69

1. GİRİŞ

İnsansız Hava Araçları (İHA) gündem oluşturmaya devam ediyor. Başlangıçta, havacılık (uçuş) meraklıları için hoşça bir vakit geçirme aracı olan "model uçaklar" hızla evrimleşerek, ülke-ötesi uçuşlar yapabilen ve nisbeten düşük risklerle, önemli görevler başarabilen araçlara dönüşmüştür. İHA'lardaki bu hızlı evrimleşme bazı sorunları, kuşkuları ve tatminsizlikleri de beraberinde getirmiştir. Bu yazıya dayanak teşkil eden kaynaklardan da görüleceği üzere, 1995-2005 dönemi bu sorunların yoğun şekilde yaşandığı bir dönem oldu. Bu dönemde, İHA'larda karşılaşılan ana sıkıntının "güvenilirlik" olduğu görülüyor. Son on yıllık dönemde tasarımda önemli iyileştirmeler gerçekleştirilse de, İHA'lardan beklentinin hızla değişmesi ve gelişmesi, İHA'ların bugün dahi sorgulanmasına sebep olmaktadır. Bu yazıda "İHA'nın ne kadar güvenilir olduğuna" cevap bulunmaya çalışılmıştır.

2. GÜVENİLİRLİK

İnsansız Hava Araçlarının (İHA) güvenilirliği konusunda bir şeyler söylemeden önce, "güvenilirlik" için bir tanım yapmak uygun olacaktır. "Güvenilirlik" (reliability) bir sistemin/aracın/ekipmanın belirlenmiş şartlar altında ve belirlenmiş bir süre için, kendisinden beklenen fonksiyonu gerçekleştirme ve sürdürme yeteneği veya olasılığıdır. Güvenilirlik, belirlenmiş bir süre boyunca arıza yapmadan çalışabilme olasılığı olarak, sayısal yüzdeyle ifade edilir. Güvenilirlik, bir başka kavram olan MTBF (Arızalar Arası Ortalama Zaman) ile yakın ilişkilidir.

Güvenilirliği, ihtiyaca göre, bir sistemin tamamı için veya bu sistemi oluşturan ekipmanlardan biri için tanımlamak mümkündür. Bu sebeple, tanıma bağlı olarak yapılacak hesaplamalarda, farklı eşitlikler (formüller) kullanılabilmektedir. Bunlardan bir örneği aşağıda verilmiştir.

Mission Reliability R

$$R = 1 - \frac{\#\ Mx\ Aborts}{\#\ Sorties\ Launched}$$

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

where λ = Failure Rate

t = Period of Interest (mission duration)

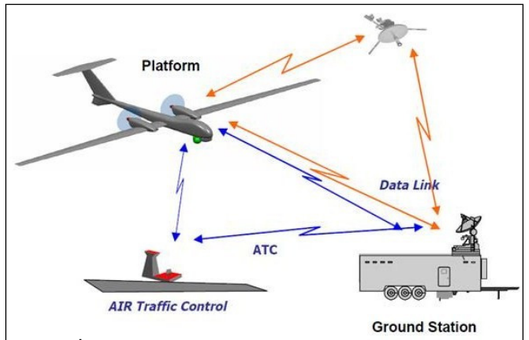
Güvenilirlik Analizi, sistem ve komponentlerin güvenilirliğinin ölçülmesi ve tahmininde çeşitli matematik teknikleri kullanan bir mühendislik disiplinidir. Güvenilirlik analizi sistemin emniyet ve risk analiziyle çok yakın ilgilidir. Güvenilirlik sivil hava sahasının kullanımı, tedarik/elde bulundurma maliyetinin düşük tutulması, görev etkinliğinin artırılması için önemlidir.

3. İHA'LARA GENEL BAKIŞ

Bazı araştırmacılara göre, İnsansız Hava Araçlarının (İHA) tarihi pilotlu uçakların tarihinin ötesine kadar uzanmaktadır. Ancak, yakın zamana kadar radyo kontrollü uçak operatörlerinin sportif eğlence aracı durumundaki bu araçların, daha doğrusu İHA teknolojisinin, yakın gelecekte kazanacağı önem 1980'li yıllardan itibaren anlaşılmaya başlandı. Bu sahadaki gelişmeler beklenenin ötesinde bir hız, İHA'lar da beklenenin ötesinde bir işlev kazandı.

Literatürde, ağırlıklı olarak, UAV (Unmanned Air Vehicle) veya UAS (Unmanned Air System) olarak adlandırılan bu Hava Aracı Sistemlerine "insansız" denmesine karşı çıkanlar da var. Çok da haksız görünmeyen bu görüş sahiplerine göre, İHA'nın bizzat içinde pilot mevcut olmamakla birlikte, yerde de olsa, bu sistemi uzaktan yöneten (en azından uçuş süresince izleyen) bir pilot/operatör mevcuttur. Bir İHA, onun emniyetli bir şekilde kullanımında, yerdeki insana büyük ölçüde bağımlıdır [1].

Peki, neden "pilotsuz" değil de "insansız"? Şüphesiz, İHA'ları "pilotsuz" olarak tanımlayanlar da mevcuttr. "İnsansız" sözcüğünü tercih edenlerin gerekçesi, herhalde bazı sınıf İHA operatörlerinin mutlaka pilot lisansı sahibi olma zorunluluğunun bulunmayışıdır. Kısaca, belirli kriterler dahilinde, "İHA Operatörlüğü" pilot lisansı sahibi olmayanlar için de yeni bir iş kapısı olacak görünüyor.

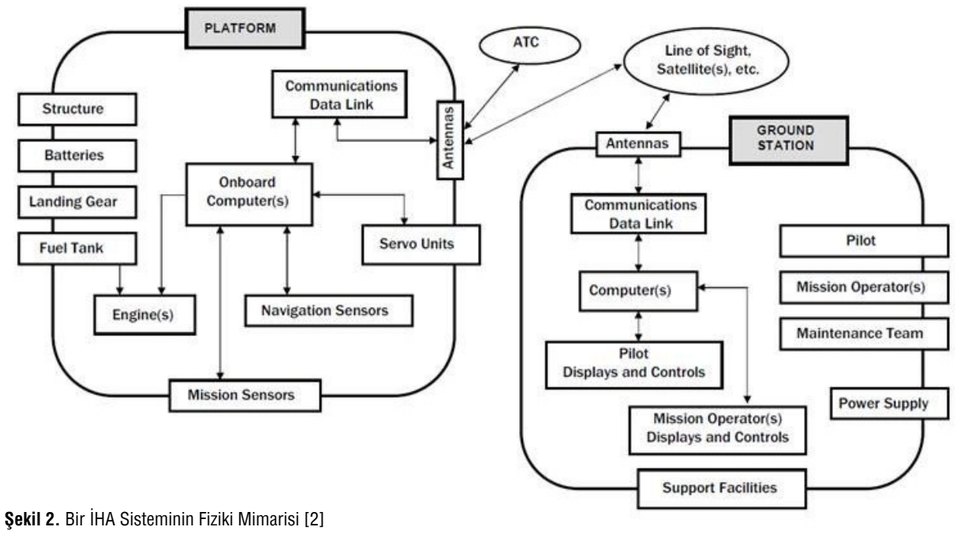


Şekil 1. İHA Sistemi [2]

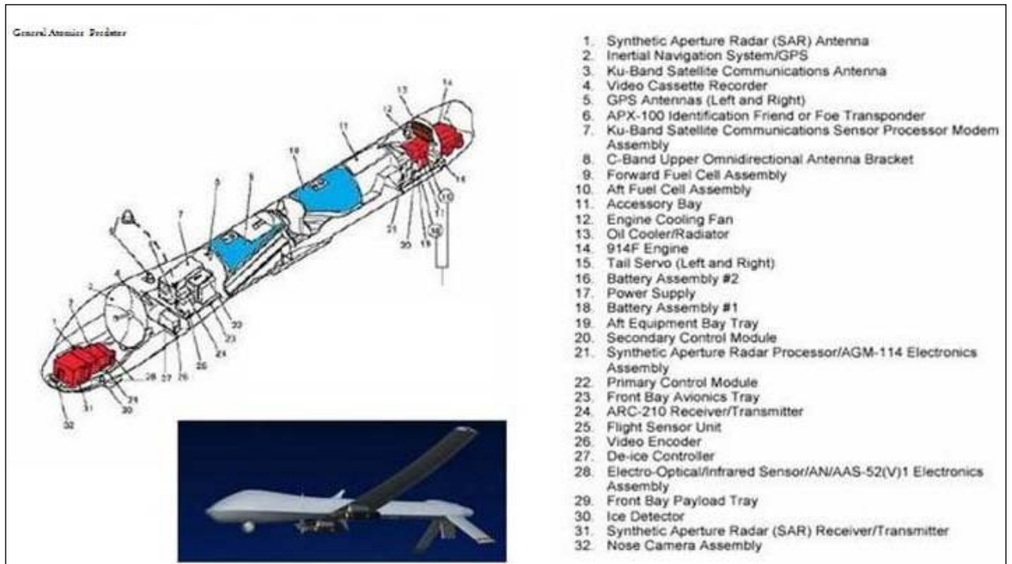
Tipik bir İHA Sistemi Hava Aracı (İtki, Uçuş Kumanda, Elektrik, Yakıt, Haberleşme ve Seyrüsefer Sistemleri,…); Faydalı Yük; Yer Kontrol İstasyonu; Komuta Kontrol ve Veri Aktarım Ağından (Data Link) oluşur.

Yer Kontrol İstasyonu'nda, İHA'nın yönetimini mümkün kılan pilot konsolu ile faydalı yükün yönetimini mümkün kılan faydalı yük (operatörü) konsolu ve toplanan verinin incelenmesini mümkün kılan konsol bulunur.

1990-2010 Döneminde geliştirilen ve halen kullanımda olan bazı İHA'lara ait bilgiler Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 2. Bir İHA Sisteminin Fiziki Mimarisi [2]



Şekil 3. Bir İHA'nın Gövde Sistemleri [2]

Halen kullanımdaki bazı İHA'ların 1986-2002 döneminde gerçekleştirdiği uçuş saati bilgisi Şekil 4'te gösterilmiştir. İHA'ların gerek güvenilirliklerinde ve gerekse havada kalış sürelerinde sağlanan artışa paralel olarak, toplam uçuş saatleri de hızla artmaktadır.

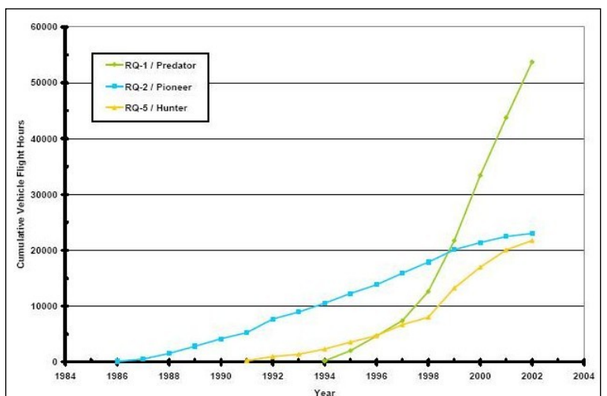
1980'li yılların sonunda İHA'larda karşılaşılan kaza oranı beklenenin çok üzerinde gerçekleşmekteydi. Şekil 5'ten de görüleceği gibi bu oran, İHA'ların güvenilirliğinde sağlanan iyileştirmelerle hızla azaldı ve insanlı uçaklarda sağlanan kaza oranı seviyesine getirebildi.

1996-2002 döneminde meydana gelen RQ-1/Predator ve RQ-5/Hunter kayıpları, pilotlu uçak kazalarıyla kıyaslanabilir seviyeye azaldı. Yine de, RQ-2/Pioneer kayıpları, istisnai durumunu koruyup çok yüksek olarak gerçekleşti.

Fotoğraf 1. İHA Yer Kontrol İstasyonu

Tablo 1. Kullanımdaki Bazı İHA'lar

	Kalkış Ağırlığı (Lb)	Kanat Açıklığı (Ft)	Azami Uçuş Yüksekliği (Ft)	Havada Kalış Süresi (Saat)	Uçuş Hızı (Kt)	Faydalı Yük (Lb)
MQ-1/Predator	2250	48.7	25000	24+	70	450
MQ-9/Predator	10 000	64	45000	24+	220	3750
RQ-1A/Predator	452	17	15 000	5	80	75
RQ-1B/Predator	1600	29.2	15000	11.6	100	200
GNAT 750	1140	35	25000	48	120	130
RQ-2A/Pioneer						
RQ-2B/Pioneer						
RQ-4/Global Hawk	26750	116.2	65000	32	345	1950
RQ-5/Hunter						
RQ-7/Shadow	327	12.8	15000	4	82	60
Darkstar			45000	8		1000



Şekil 4. İHA Uçuş Saatleri (1986-2002) [3]

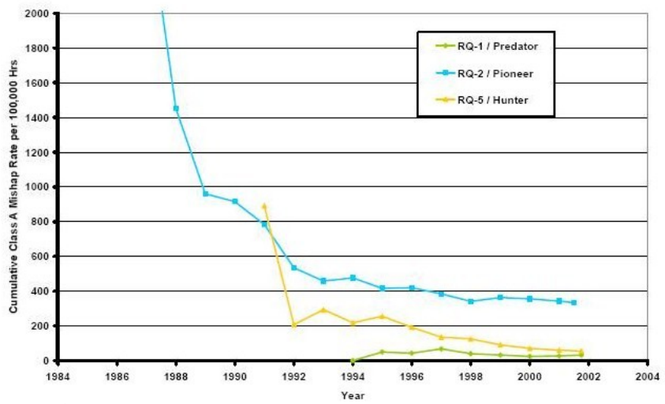
3.1 İHA Kaza Örnekleri

İHA'ların güvenilirliklerini irdelemeden önce, 1999-2012 döneminde meydana gelen ve haklarında açık kaynaklarda bilgi mevcut olan bazı İHA kazalarını hatırlatalım.

Predator'un yere indirilmesindeki zorluklar ve pilot hatalarından dolayı çok sayıda İHA inişte kaybedildi [4]. Pilot kamerasının inişte yeterli görüş sağlayamaması, pilotların hata yapmasının (aracın pozisyon algısını kaybetmesinin) ana sebebiydi.

3.2 İHA'ların Güvenilirliği

Gelelim "İHA'ların Güvenilirliği"ne… Sivil hava sahasına, diğer bir ifadeyle sivil hava trafiğine dahil edilmesi (entegrasyonu) gündemde olan İHA'lar ne



Şekil 5. İHA (100 000 Uçuş Saatine Göre) Kaza Oranlarındaki Gelişme [3]

kadar güvenilir? Bu soruya, mümkün olduğunca, açık kaynaklarda mevcut bilgi ve belgelere dayanarak bir cevap bulmaya çalışalım.

ABD Ordusundaki İHA'ların (Predetor (MQ-1), Pioneer (RQ-2), Hunter (RQ-5) 2002 yılında 100.000 uçuş saatini tamamladı [5]. Bu tarihte, elde yeterli veri toplandığı düşüncesiyle, İHA'ların güvenilirliği üzerine analizler yapılmaya başlandı. ABD'nin açıklık politikasının bir uygulaması olarak, bu analiz dokümanlarına, biraz gecikerek de olsa, internetten erişmek mümkün olabilmektedir.

Yapılan kıyaslamada, ABD imali olan ve İsrail imali olup ABD tarafından kullanılan İHA'ların arıza modu (tipi) yüzdelerinin benzer olduğu görüldü. İlk bakışta, insan hatasına dayandırılan kaza oranlarının İHA'lar ve pilotlu uçaklar arasında ters orantılı (%85'e karşı %17) görünse de, gerçekte pilotlu uçakta ve İHA sistemlerinde meydana gelen insan hatalarının oransal olarak birbirine yakın olduğu, sadece İHA'larda yüksek oranda meydana gelen sistem/ekipman arızalarının bu gerçeği perdelediği ileri sürüldü.

Diğer taraftan, küçük boyutlu İHA'ların düşük Reynolds sayılı uçuşlarının, İHA kayıplarında düşük uçuş kalitesine katkıda bulunan, yeterince bilinmeyen bir faktör olduğu anlaşılıyor.

ABD, 1975-1996 döneminde dokuz İHA programı için dört milyar dolar harcadıktan sonra, hedeflenen amaçlara ulaşılamadığı gerekçesiyle, bu programları iptal etti. Şüphesiz, yaşanan bu sıkıntılar İHA geliştirme çalışmalarını durdurmadı [20].

RQ-1/Predator, RQ-2 / Pioneer ve RQ-5 / Hunter'ın 1991-2002 döneminde MTBF'lerindeki gelişme Şekil 6'da gösterilmiştir. Her üç İHA'ya uygulanan iyileştirmelerle MTBF'lerinde belirli bir artış sağlanmıştır. Predetor'ün MTBF'sinde sağlanan artış yılda %6'ya yaklaşmıştır.

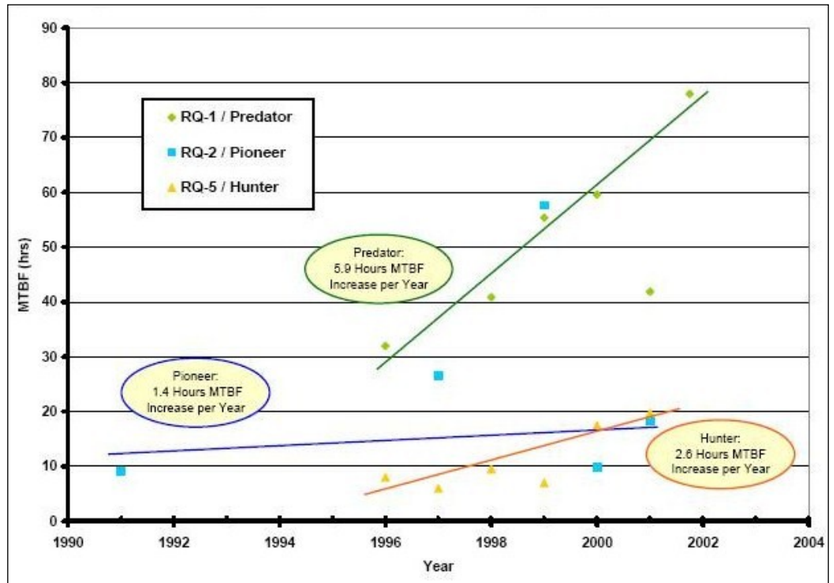
RQ-1/Predator, RQ-2/Pioneer ve RQ-5/Hunter'ın 1991-2002 döneminde güvenilirliklerindeki artış Şekil 7'de gösterilmiştir. 1996-2002 döneminde, güvenilirlikte en fazla artış, yılda %3.5 oranıyla Hunter'da sağlanmıştır. Başlangıçta yaygın olan motor arızaları, uçuş kontrol yazılımı hataları ve data link arızaları, bir ara programın iptaline dahi sebep oldu.

Daha sonra yapılan iyileştirmelerle; Hunter'in güvenilirliğinde altı yılda %25 iyileşme sağlandı. "Hunter"ın güvenilirliği kısa sürede sağlanan iyileştirmeler, yaşanan tecrübenin üretime yansıtılabilmesi sayesinde mümkün oldu. 1991-2002 döneminde bazı İHA'ların güvenilirliğinde sağlanan gelişmeler Şekil 7'de gösterilmiştir.

Belirli İHA'lar için, 1991-2002 dönemine ait bilgilere bakıldığında, İHA sözleşmelerinde öngörülen güvenilirlik seviyesi %70-85 arasında değişirken, üreticilerin erişebildiği güvenilirlik seviyesinin %74-91 arasında değiştiği görülüyor (Tablo 3). Yine bu tablodan RQ-2A / Pioneer'ın, bu dönemde,

Tablo 2. İHA Kazası Örnekleri

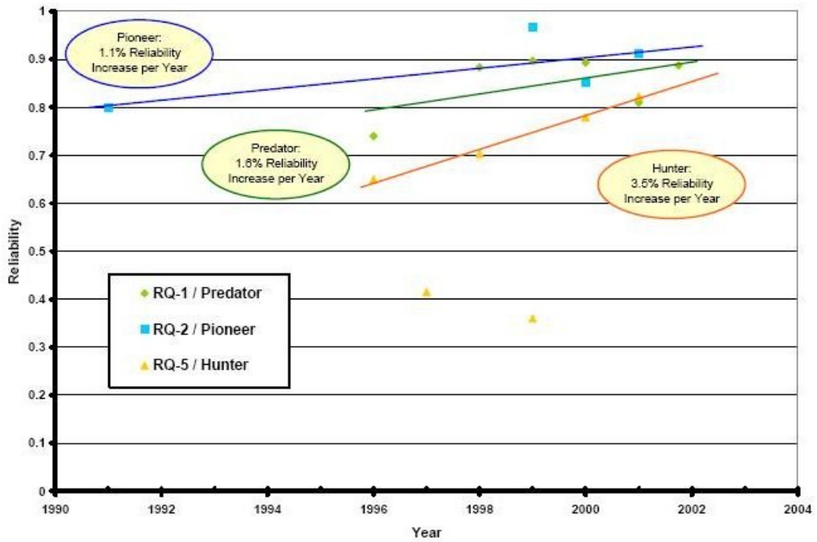
Tarih	Tip/Model	Sebep
3 Aralık 1999	Global Hawk	Taksi sürüşü testinde, hızın hatalı (aşırı yüksek) programlanması sebebiyle kaybedildi. *http://www.nationaldefensemagazine.org/archive/2003/May/Pages/Global_Hawk3871.aspx*
2 Mart 1999	Global Hawk	Limit dışı yüksek uçuşta komuta sinyali kaybedilen araca, bu aracı doğrudan yönetmeyen ancak görüş hattında (line of sight) olan başka bir kontrol istasyonundan "uçuşu sonlandırma" sinyalinin istenmeden gönderilmesi sonunda kaybedildi. *http://www.nationaldefensemagazine.org/archive/2003/May/Pages/Global_Hawk3871.aspx*
5 Aralık 2001	Global Hawk	Aracın, uçuşta, Radar Akçuatör bağlantısının ayrılması sebebiyle, araç kaybedildi.
6 Haziran 2002	Global Hawk	Yakıt nozulu arızası sebebiyle kaybedildi. *http://www.nationaldefensemagazine.org/archive/2003/May/Pages/Global_Hawk3871.aspx*
17 Eylül 2003	RQ-1 Predator kazası	Pilotun tehlikeli bir bulutun içine doğru uçması kazanın ana sebebiydi. Kötü hava şartları sebebiyle, Uçuş Kontrol Bilgisayarı arızalanmıştı. *RQ-1 Predator MAE UAV* *from http://www.globalsecurity.org/intell/systems/predator.htm*
30 Mart 2005	MQ-1 Predator	Pervane açısına kumanda eden mekanizmada kullanılan yatak (pilot bearing) arızası kazaya sebep oldu.
18 Aralık 2006	Lockheed P-175 Polecat	Araç Uçuş Sonlandırma Sisteminin bir arıza sebebiyle, istenmeden çalıştırılması sonunda kaybedildi. http://www.barnardmicrosystems.com/L4E_accidents.htm#Hawk
25 Nisan 2006	General Atomics Aeronautical Systems, MQ-9 Predator B	Pilot konsolundaki ekranın donması sebebiyle, Ana (PPO-1) Konsoldan Yardımcı Pilot (PPO-2) konsoluna geçen operatörün, Gazkolu (kumanda) pozisyonlarını (prosedüre uygun şekilde) eşitlemeden, yeni konsolu aktive etmesiyle, motoru duran araç kaybedildi. http://www.freerepublic.com/focus/f-chat/2867057/posts
3 Ekim 2006:	B-Hunter	Belçika'ya ait bir UAV, kalkışta her iki motorunun durması sebebiyle, Kongo'da kaybedildi. Yapılan incelemede, bu aracı uçuran pilotun, durum algısını, (situational awareness) kaybetmesi sebebiyle, aracın kalkışını tamamlayamayacağını düşünerek, uçuşu sonlandırma (motorları durdurma) kumandası verdiği anlaşıldı. Bu anda araç uçuşunu başarıyla sürdürmekteydi!
18 Haziran 2010	B-Hunter	Kötü hava şartlarında, paraşütle inişi takiben, paraşütün zamanında ayrılmaması sebebiyle hasar aldı. http://forums.jetphotos.net/showthread.php?t=50787
16 Kasım 2012	RQ-4(BAMS-D)	ABD'ye ait araç kaybedildi. http://abcnews.go.com/blogs/headlines/2012/06/navy-unmanned-drone-crashes-on-marylands-eastern-shore-186-million-burns/
29 Ocak 2012	"Heron TP (Eitan)"	Kalkışı takiben, uçuş limitlerinin aşılması sebebiyle, kanadının kırılması sonucu kaybedildi. http://www.flightglobal.com/news/articles/heron-tp-stays-grounded-as-israel-studies-uas-crash-372269/



Şekil 6. İHA'ların MTBF'sindeki Gelişme [3]

Sözleşmenin güvenilirlik hedefini tutturamadığı da anlaşılıyor.

Aynı dönemde, bu İHA'ların ana arıza sebeplerine bakıldığında RQ-1A/Predator'da, %39 ile Uçuş Kontrol Sisteminin; RQ-1B/Predator'da, %53 ile Motor/İtki Sisteminin; RQ-2A/Pioneer'da, %29 ile, Motor/İtki ve Uçuş Kontrol Sisteminin; RQ-2B/Pioneer'de, %51 ile Motor/İtki Sisteminin; RQ-5/Hunter'da ise, %29 ile Motor/İtki Sisteminin ve (yerdekilerle birlikte) İnsan Faktörünün en yüksek sebep oranına sahip olduğu görülüyor. RQ-7/Shadow'da meydana gelen en büyük arıza oranı ise %50 ile Motor/İtki Sistemi olmuştur.



Şekil 7. İHA'ların Güvenilirliğindeki Gelişme [3]

Bu tablodan göründüğü üzere, Motor/İtki Sisteminin yol açtığı arızalar, 1999-2002 döneminde, İHA'lar için ana güvenilirlik sorununu teşkil etmiş; Uçuş Kumanda Sisteminde ortaya çıkan güvenilirlik yetersizlikleri ise ikinci sırada yerini almıştır.

İHA'ların 100.000 saatlik toplam uçuşunda meydana gelen kaza oranları Tablo 5'te gösterilmiştir. Bu tabloya bakıldığında, gerçekleşen kaza oranının, bu sahada en düşük olan RQ-1B/Predator için bile, pilotlu uçak kazalarına nazaran oldukça yüksek olduğu görülmektedir.

ABD, İsrail'den satın aldığı RQ-2A/Pioneerlerde birçok güvenilirlik problemi belirledi. Bu araçların gemilerden yayımlanan elektromanyetik dalgalardan etkilenmeleri bazı İHA kayıplarında ana sebebi oluşturdu. Motorların küçük olması sebebiyle aşırı zorlanması da başka bir güvenilirlik problemi idi. 1995'te gerçekleştirilen kabul testinde üç adet Hunter üç haftalık süre içinde kaybedildi. Uygulanan tasarım geliştirmeleri sonunda, kazalarda ana sebep olarak belirlenen servo-akçuatörlerin MTBF'i 7800 uçuş saatinden 57 000+ saate yükseltildi. Bu noktada durup, biraz düşünmek gerek… Başlangıçtaki MTBF (7800 saat) acaba neden yeterli olamadı…? Başlangıçta yapılan MTBF hesapları acaba yeterince güvenilir değil miydi? Yapılan geliştirmelerle, Hunter'in MTBF'i 4 uçuş saatinden 20 uçuş saatine yükseltildi. Kaza oranı, yüz bin saatte 255 iken, 1996-2001 dönemindeki geliştirmelerle 16'ya azaltıldı [5]. Hunter, güvenilirlik açısından, başlangıçta ABD Silahlı Kuvvetlerinde ana endişe kaynağı iken, uygulanan iyileştirmelerle, diğer İHA'ların güvenilirlik kıyaslamalarında referans alınan bir Hava Aracı durumuna geldi.

ABD Silahlı Kuvvetleri 2008 yılından beri, bir ihtiyaç kalemi doğrulaması olarak, güvenilirliği test stratejisine dahil etmekte, güvenilirlik gelişme stratejisini Test ve Değerlendirme Ana Planında dokümante etmekte, Operasyonel Testlere başlama kriteri olarak güvenilirlik-temelli proje adımlarını tesis etmektedir. Ancak, sistemlerin hedeflenen güvenilirlik hedeflerine ulaştığını gösterecek ölçüde gelişme sağlanamamıştır. Bu tarih itibarıyla bazı sistemler, gerekli güvenilirlik iyileşmesini gösteremeden Operasyonel Testler başlatılmıştır [6].

Örnek olarak, MQ-9, Reaper, MQ-1C Gray Eagle ve RQ-4 Global Hawk Sisteminin bazı alt sistemleri güvenilirlik açısından yetersiz bulunmuştur. ABD Hava Kuvvetleri, RQ-4B Global Hawk için gerçekleştirdiği Operasyonel Kullanım Testlerinde, başta bu İHA'nın güvenilirliği olmak üzere bakım teknik verilerinde, bakım eğitiminde ve arıza teşhis sistemlerinde eksiklik ve yetersizlikler belirlenmiştir.

Operasyonel Kullanım Başlangıç Test ve Değerlendirmelerinden sonra, başta (emniyet açısından) kritik yedek parça listesi iyileştirmelerinin yanında, kritik sistem elemanı arızalarını azaltmak için, güvenilirlik artırıcı programların uygulanması gerekmiştir. Emniyet açısından kritik komponentler, tek başına arızalanmaları (single point failure) halinde Hava Aracı kaybına veya görevin başarısız kalmasına sebep olabilen komponentlerdir.

İHA tasarımı ve entegrasyonunda kullanılacak komponentlerin arıza modları ve güvenilirlikleri hakkında "yeterli veya güvenilir bilgi azlığı" İHA tasarımının zayıf noktalarından biridir [7]. İHA'ların yapısal bütünlüğünün (ve yorulma ömrünün) izlenmesinde, gövdeye entegre (sayıcı/sensör) sistemlerin, maliyet ve ağırlık kaygılarıyla kullanılamaması da yapısal yorulmanın izlenmesinde başka bir zayıf noktayı teşkil etmektedir.

Bugünlerde İHA ana yapısının neredeyse tamamı kompozit malzemeden imal edilmektedir. Kompozit malzemenin başta hafifliği olmak üzere imalat (şekil verme) kolaylığı büyük avantaj sağlarken, kompozit yapıların yorulma ve/veya yapısal dayanım ömrü hususundaki araştırmalar henüz metal yapılar düzeyinde değildir. Kısaca, başka bir yazıya esas teşkil edebilecek bu konuda, kompozit yapısal tasarımları biraz "de-

Tablo 3. Tiplere Göre MTBF, Güvenilirlik ve Kaza Oranları [3]

		MTBF (hrs)	Availability	Reliability	Mishap rate per 100,000 hrs (Series)	Mishap Rate per 100,000 hrs (Model)
RQ-1A/Predator	Requirement	n/a	n/a	n/a	n/a	32
	Actual	32.0	40%	74%	43	
RQ-1B/Predator	Requirement	40	80%	70%	n/a	
	Actual	55.1	93 %	89%	31	
RQ-2A/Pioneer	Requirement	25	93 %	84%	n/a	334
	Actual	9.1	74%	80%	363	
RQ-2B/Pioneer	Requirement	25	93%	84%	n/a	
	Actual	28.6	78%	91%	139	
RQ-5/Hunter (pre-1996)	Requirement	10	85%	74%	n/a	55
	Actual	n/a	n/a	n/a	255	
RQ-5/Hunter (post-1996)	Requirement	10	85%	74%	n/a	
	Actual	11.3	98%	82%	16	

Tablo 4. Tiplere Göre Arıza Ana Kaynakları [3]

Faktör Yüzdesi	Motor/İtki	Uçuş Kumanda	İletişim	İnsan Faktörü/ Yerde	Çeşitli
RQ-1A/Predator	23	39	11	16	11
RQ-1B/Predator	53	23	10	2	12
RQ-2A/Pioneer	29	29	19	18	5
RQ-2B/Pioneer	51	15	13	19	2
RQ-5/Hunter	29	21	4	29	17
RQ-7/Shadow	50	0	19	6	25

Tablo 5. Tiplere Göre MTBF ve Güvenilirlik ve Kaza Oranı [3]

	MTBF	Availability	Reliability	Kaza Oranı (100 000 Uçuş Saatinde)
RQ-1A/Predator	32	%40	%74	43
RQ-1B/Predator	55.1	%89	%93	31
RQ-2A/Pioneer	9.1	%74	%80	363
RQ-2B/Pioneer	28.6	%78	%91	139
RQ-5/Hunter	11.3	%98	%82	271

neysel" olarak görmek ve kabullenmek gerekmektedir.

Yapılan çalışmalardan, sistem güvenilirliğinin İHA'ları klasik uçaklardan daha fazla etkilediği görüldü [8]. Servo-akçuatör arızaları, İHA'larda kontrol arızalarında ana sebebi teşkil etmiştir. Rafta Hazır (COTS) malzemeler, yüksek arıza oranına sahip olabilmektedir. Rafta Hazır bir malzemenin operasyonel testi uygun şekilde yapılmadan tedarik süreci, vasat sistemlerin daha yüksek maliyetle kullanıma verilmesine yol açtı. Tedarik edilen bazı sistemlerin geliştirilmesi için yapılan harcamalar, başlangıç tedarik maliyetinin yedi katına ulaşılabilmiştir [20].

Yeterli hizmet ömrü ve arıza oranı bilgisine sahip olmadan, güvenilirlik-merkezi bakım programı oluşturmak zorlaşmaktadır. Bu durum da kritik sistemlerin zamanında önleyici bakım alamama riskini beraberinde getirir. Buna karşı risk ise, gereksiz aşırı bakımın yol açabileceği "bakım tarafından tetiklenmiş arıza" ihtimalidir. Mevcut durumda, İHA'lar için hazırlanacak "güvenilirlik-temelli" bakım programlarının, gereken seviyenin biraz altında veya biraz üstünde olarak tasarlanması mümkündür. Şüphesiz, havacılığın gerçeği olan bu durum, belirli ölçüde pilotlu uçaklar için de geçerli olmuş ve bizzat yaşanmıştır. Uçakların "kullanıcıya tesliminden sonra uygulanması gerekmiş" yapısal/sistem tadilat programlarına bakıldığında; bu görüşü doğrulamak zor olmayacaktır.

Güvenilirlik çalışmaları İHA'ların pilotlu hava araçlarından daha yüksek bir kaza oranına sahip olduğunu göstermiştir. İHA'ların tasarımlarında öncelik kalkış ağırlığına ve maliyete verilmiştir. Güvenilirliği hedefleyen sistem yedeklemelerine (redundancy) ve diğer tekniklere ise sınırlı bir öncelik verilmiştir.

Bir yazılımın hazırlanması karmaşık mühendislik aktivitelerinden biridir. Bir İHA sisteminin yazılımı tipik olarak karmaşık ve büyük hacimdedir. Yazılım elemanları görev yazılımı, görev ilişkili, görev için kritik ve uçuş emniyeti açısından kritik olarak yazılım spektrumunun geniş bir sahasını kapsar.

İHA sistemlerinde sağlanabilen güvenilirlikteki yetersizlik bu araçların yaygın şekilde kabul görmesi ve kullanımını engelleyen başlıca faktör olarak ileri sürülmüştür [9].

İHA'larda sağlanacak güvenilirlik seviyesi aracın boyutuna, hızına, kullanacağı hava sahasına ve niyetlenilen göreve de bağlı olacaktır. Bir FAA yetkilisinin de dediği gibi, kendisinden ikinci bir uçuş beklenmeyecek bir hava aracına (hedef aracı) uygulanacak güvenilirlik kriteri şüphesiz diğerlerinden farklı olacaktır.

Önceki İHA tasarımlarında güvenilirlikten ziyade maliyet, ağırlık ve performans ana endişe kaynağı idi. Görev yapacakları ortamlarda hedef durumunda olmaları ve tasarımın deneysel özelliği güvenilirliği artırmaya yönelik, yedeklik veya diğer tasarım hususlarının geri planda tutulmasına yol açtı. 1990'lı yıllarda Avrupa hava sahasında görev yapan Predator-lara sağlanan yedek parça, bakım ve kullanıcı eğitimi desteği yetersiz kaldı. Global Hawk Sistemi de yeterince olgunlaşamadan, Afganistan'da kullanılmaya başlanmıştı.

Bir örnek olarak, Predator'da karşılaşılan yetersizlikler sistemin olgunlaşmadan kullanıma verilmesi, doküman eksikliği ve insan faktörünün tasarımda yeterince dikkate alınmamasıydı. Geliştirme maliyeti artışına katkıda bulunan diğer faktörler ise yeterince olgunlaşmamış teknoloji kullanımı, tedarikçinin performans taleplerinde hızlı artış, tedarikçinin yükleniciler üzerine uyguladığı kısıtlamalar, yetersiz İHA performansı olarak belirlendi [20].

Hemen hemen her programda, tedarikçinin isteklerinin hızla değişmesi, sözleşmede yer alan ihtiyaç kalemlerinin ifade yetersizlikleri, maliyet artışına katkıda bulunarak bazı programları tehlikeye soktu. Tedarikçinin yeni talepleri Predator'ün maliyetinin ikiye katlanmasına sebep oldu [20].

Predator sisteminin, operasyonel alanda yeterince test edilmeden üretimine geçilmesi, kullanım aşamasında belirlenen yetersizlikler için pahalı modifikasyonlara sebep oldu [20].

İHA'ların yüksek arıza oranına bir dayanak olarak, İHA imalatçılarının maliyetten tasarruf veya aradıkları uygun boyutta veya İHA'nın gerektirdiği güçteki malzemeleri bulamamaları sebebiyle, havacılığın gerektirdiği kalitede olmayan malzemeleri kullanmaları gösterilebilir.

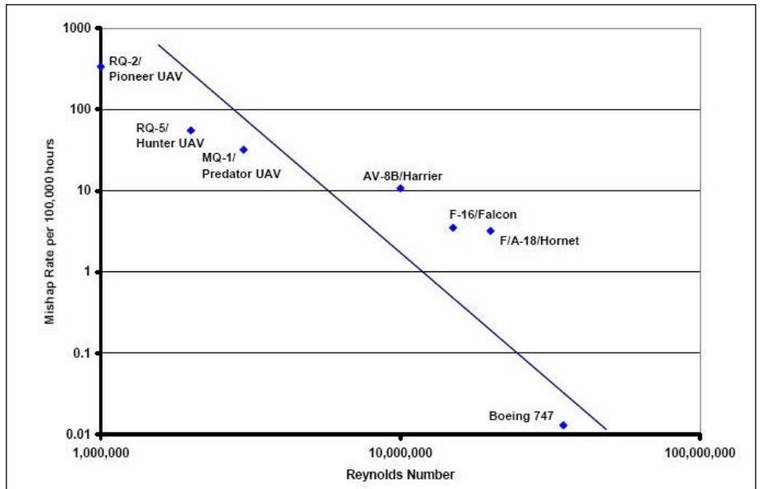
NASA tarafından kullanımı amacıyla Predator B'den modifiye edilen Altair, görevin gerektirdiği güvenilirlik seviyesini sağlayabilmek için, arızaya toleranslı çifte-mimarili uçuş kontrol sistemi ve üç defa yedekli aviyonik sistemli olarak geliştirildi. Bu hava aracına daha sonra, havada çarpışmadan otomatik korunma sistemi takılması da planlandı.

4. REYNOLDS SAYISI: İHA'LARIN GÜVENİLİRLİĞİNDE BİR FAKTÖR MÜ ?

Yapılan araştırmalarda, ABD ve IAI üretimi bazı İHA'ların arıza modları arasında görülen benzerlik, uçulan hava şartlarının yanında, uçuşlarda gerçekleşen düşük Reynolds Sayısına da bağlanmıştır [3]. Reynolds Sayısı bir Hava Aracının ataletinin içinde uçtuğu havanın viskozitesine oranıdır. Reynolds sayısı, Hava Araçları arasında, dinamik benzetim açısından kıyaslama imkanı sağlar. Bir Hava Aracının, özellikle rüzgar tüneli testlerinde kullanılacak modellerinin doğru ölçeklendirilmesinde referans bilgisi sağlar. Aşağıda görülen eşitlikte "ρ" havanın yoğunluğu, "V" Hava Aracının hızı, "x" Hava Aracının kanat veter boyu ve "μ" ise havanın viskozitesidir.

$$Re = \frac{\rho\, Vx}{\mu}$$

Yapılan çalışmalarda, küçük boyutlu olan; ancak büyük uçakların uçuş profillerinde uçan İHA'ların güvenilirliğinin daha düşük olduğu görülmüştür. Burada sistem mühendisliği ile komponent kalitesi güvenilirlik yetersizliğinde birinci derecede etken iken, Reynolds Sayısının etkisinin ikinci sırada yer aldığı görülmüştür. Reynolds Sayısının farklı uçaklar için kıyaslaması Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 8. Kazaların Reynolds Sayısıyla Kıyaslaması [3]

5. İHA'LAR ELDEN KAÇIRILABİLİR Mİ ?

İHA'ların, sensör datalarının iletim hatlarına girilerek veya komutası ele geçirilerek, siber saldırının hedefi olması da mümkündür [1]. İlave olarak, İHA'nın komuta ve kontrolü linki kasıtlı olarak bloke edilebilir veya İHA'nın kontrolü ele geçirilebilir. Teksas Üniversitesi ile ABD Silahlı Kuvvetlerinin 2012 yılında, birikte gerçekleştirdiği bir çalışmada, GPS sinyallari kullanılarak, yakın mesafedeki bir İHA'nın kontrolü ele geçirildi [10]. 17 Aralık 2009'da yayımlanan bir haberde, ABD'ye ait Predetorların sağladığı video görüntülerinin, yetkisiz kişiler tarafından, yirmi küsur dolara satın alınabilen COTS yazılımlarla indirilebildiği duyuruldu [11]. Korumasız iletişim linklerindeki emniyet açığı sebebiyle, internetten oldukça düşük bir bedelle temin edilebilen, SkyGrabber gibi yazılımlar buna imkan sağlamaktadır. İran, 4 Aralık 2011'de, ABD'nin (Lockheed Martin firması imali) RQ-170 hava aracını yakalamayı ve yere indirmeyi başardı [12]. Daha sonra televizyonda da yayımlanan görüntülerden, bu aracın, yere çok sınırlı bir hasarla indirildiği anlaşıldı.

6. NE YAPMALI ?

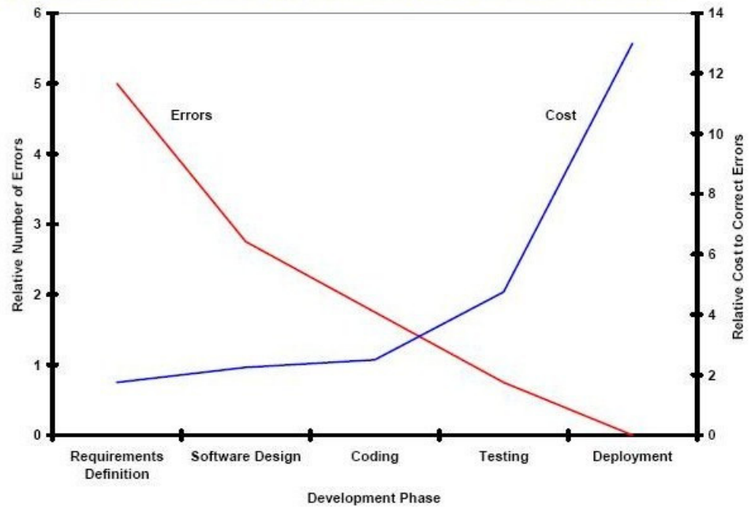
Alınan dersler göstermiştir ki, güvenilir havacılık sistemlerine ulaşılması sadece sistem kapasitesiyle yetinilmeyip, konsept tasarımı aşamasında güvenirlilik, idame edilebilirlik, komponent kalitesi, insan faktörleri ve performansın da göz önünde bulundurulmasına bağlıdır. Fiyatları yönetilebilir tutarken, güvenilirliği artırmak için, İHA Alt Sistem tasarımında aşağıda özetlenen prensiplerin göz önünde bulundurulması gerekir [3]:

- Standart sistem mühendisliği uygulamalarının kullanılması (daha doğru bir ifadeyle, standart sistem mühendisliği prensiplerine birebir uyulması),
- Tasarımda basitliğin sağlanması,
- Tasarımın test edilebilirliğinin sağlanması,
- Yedek malzeme ve parçaların gelecekte tedarik edilebilirliğinin sağlanması,
- İmalat, operasyonel kullanım ve idame edilebilirlikte insan faktörlerinin göz önünde bulundurulması,
- FMEA'ya dayalı, yedekli (redundant) ve kontrollü bir şekilde hasarlanabilen (fail-safe) tasarımların kullanılması,
- Tasarımın üretilebilirliğinin garanti altına alınması,
- Sınanmış ve kabul görmüş malzeme ve parçaların kullanılması,
- Malzeme ve parça kalitesi üzerinde kontrolün sürdürülmesi.

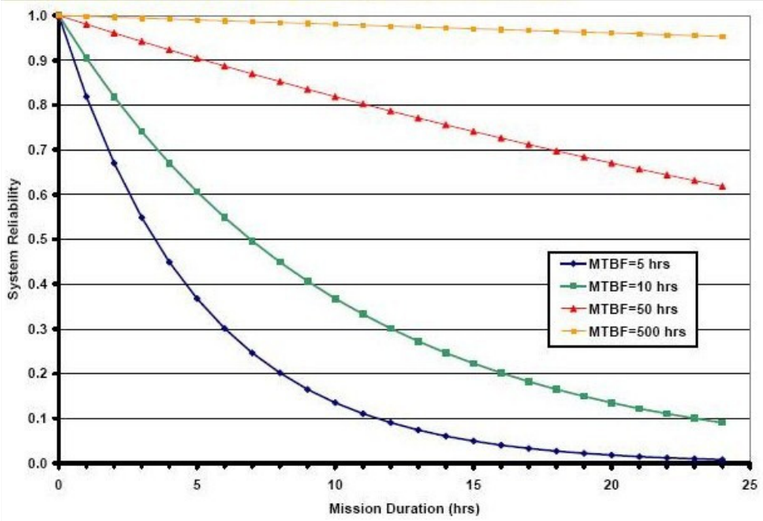
Uçuş kumanda sistemi için bir yazılım geliştirmede güvenilirliğin, tasarımın başlangıç safhasında dikkate alınmasının önemi Şekil 9'da gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere tasarım ilerledikçe; meydana gelen hataların giderilme maliyeti katlanarak artmaktadır.

Güvenilirlik analizleri arıza modlarına ilave olarak, elde hazır bulunduramama olasılığı, kaza/olay oranı, birlikte çalışabilirlik (interoperability), çevresel beka, komponente erişilebilirlik (takılabilirlik/değiştirilebilirlik) hususlarını da kapsamalıdır. Daha karmaşık komponentlerde tasarımcının, malzemenin başka uygulamalarda kullanım durumunu ve hatta, tedarikçinin havacılık sektöründeki "tanınmışlığını" (reputation) dahi dikkate alması gerekir.

Kullanılması düşünülen malzemenin, başlangıçta havacılık sistemi için tasarlanıp tasarlanmadığı hususunun dahi değerlendirmede dikkate alınması önemlidir. Yapılan bir araştırmada, "Pioneer" Sisteminde kullanılan bir yakıt pompasının, başlangıçta otomobil ve motorsikletlerde kullanılmak üzere üretildiği, üreticisinin, bu malzemenin bir Hava Aracında kullanıldığından haberdar dahi olmadığı anlaşılmıştır [3]. Baş-



Şekil 9. Yazılım Hatası Kaynakları ve Giderme Maliyeti [3]



Şekil 10. Farklı MTBF'ler İçin Güvenilirlik [3]

langıçta Hunter İHA'lara takılmış olan motorsiklet motorları ABD Silahlı Kuvvetlerinin performans ihtiyacını karşılamada yeterli olamamıştır [20].

Bir sistem veya alt sistem kendisini oluşturan komponentler kadar iyidir. Maliyeti uygun fakat uçabilir kalitede olmayan bir malzeme, üzerine takıldığı tüm sistem için bir ana arıza kaynağı teşkil edebilir. Unutmayalım ki, Challenger Uzay Mekiğini düşüren bir kauçuk conta, Columbia Uzay Mekiğini düşüren ise sadece bir izolasyon köpüğü parçasıydı! (Challenger'in soğuk kış şartlarında fırlatılması hususunda endişelerini belirten mühendisi kâle almayanları da varın siz sınıflandırın!)

Sistem yedeklemesi maliyeti artırsa da, yapılacak maliyet-kazanç analizi bu yöntemin risk azaltmada etkin bir seçenek olacağını gösterebilir. Rafta Hazır (COTS) ürünler göz önünde bulundurulurken, komponent kalitesi, yedekleme ve komponent üretim teknolojisinin de dikkatle değerlendirilmesi gerekir.

Basitçe söylenirse, güvenilirlik tasarıma, inşaya, işletmeye ve uygun şekilde yapılacak eğitime çok sıkı şekilde bağlıdır. Güvenilirlik satın almak demek, MTBF satın almak demektir; (ispatlanabilir) yüksek MTBF yüksek güvenilirlik demektir. Bu durum değişik MTBF'ler için Şekil 10'da gösterilmiştir. Tanım olarak güvenilirlik çalışma (kullanım/görev) süresine bağlı olduğundan, bu süre ne kadar uzun olursa, sistemin/komponentin güvenilirliği de o kadar azalacaktır.

Yağış İHA'ları pilotlu Hava Aracı'ndan daha fazla olumsuz etkileyen meteoroloji olayıdır. Bunun başlıca sebepleri, İHA'nın nispeten küçük boyutları, bazı uygulamalarda ahşap pervane kullanılması ve sızdırmazlık için alınan tedbirlerin sınırlı olmasıdır. Bir İHA'nın yağmurdan korunmasının en kestirme yolu, yoğun yağmur şarlarında mümkün olduğunca iniş kalkış yapılmaması, uçuşta da, yağmur bölgelerinden uzak durulmasıdır. Yağmur Global Hawk için dahi sorun yaratabilmiştir [3]. Sonuç olarak, İHA'larda maliyet azaltma girişimleri, bu kapsamda ahşap pervane kullanımı ve yağışa karşı yetersiz sızdırmazlık tedbirleri, bazı İHA'ların güvenilirliğini olumsuz etkiledi [13].

Pistten kalkışta, pervane yere fazla yakın ise, pervaneye yabancı madde çarpma ihtimali artar. Bu durumda, pervane hasarı sebebiyle, İHA, pilotun reaksiyonundan önce kontrolden çıkabilir. Yağmur ahşap pervanenin hücum kenarında hızlı erozyona ve takiben pervane hasarına sebep olabilir. Pervane seçiminde kompozit, metal ve ahşap pervanelerin avantaj ve dezavantajlarının iyi değerlendirilmesi gerekir.

Buzlanma iki Hunter ile üç Predator kazasında ana ya da katkıda bulunan sebep olarak belirlenmiştir. Bu sebeple, İHA'larla kış şartlarında gerçekleştirilecek uçuş eğitimlerine özel önem verilmesi gerekmektedir.

Pilotlu hava aracı ile kıyaslandığında bir İHA, mevcut kontrol yüzeyi, servo-akçuatörün (nispeten düşük) reaksiyon süresi ve İHA'nın sınırlı uçuş hızı gibi sebeplerle, rüzgar sağanaklarından daha fazla etkilenir. Bu durum video görüntüsünde atlamaya, link kaybına, hatta, otopilotun kabiliyet sınırı aşıldığında kumanda kaybına dahi sebep olabilir [3]. Link kayıplarına karşı çok yönlü (omnidirectional) anten ve acil iniş paraşütü kullanımı, maliyeti artırsa da, aynı zamanda güvenilirlik artışına da katkı sağlayabilir.

Güvenilirliğin artırılmasında başlıca iki yol komponent ve sistemlerin bütünlüğünün (integrity) artırılması ile yedeklemenin (redundancy) sağlanmasıdır. Her iki yöntemin de bir maliyeti söz konusudur. Daha güvenilir ve sertifikalı parçaların kullanımı, şüphesiz, tedarik ve bakım maliyetini artıracaktır. Bugün, güvenilirlik artışı İHA üretici ve kullanıcılarının ortak hedefi gibi görünmekle birlikte, bu sahada tedbiri elden bırakmamak gerekir. Uygulamaya güzel bir örnek Predator B'nin güvenilirlik seviyesindeki iyileşmedir. Predator B'nin 2004'te eriştiği güvenilirlik seviyesi pilotlu uçakları geçmiş durumdaydı [8].

Halen, sivil İHA'ların operasyonel emniyetini (uçuşa elverişliliğini) sertifiye etmek için tesis edilmiş standartlar mevcut değildir. Askeri kullanım için STANAG 4671 mevcut olmakla birlikte, EASA gibi merkezi bir gözetim otoritesi (henüz) oluşturulmuş (yetkilendirilmiş) değildir. Yine de, diğer hava araçları gibi İHA tedarikçisi ve tasarımcılarının da ICAO'nun öngördüğü "tüm hava araçları uçuşa elverişli olmalı" prensibini göz önünde bulundurması gerekir [10].

İHA'nın; yer kontrol sisteminin, iletişim linkinin, uçuş kontrol sisteminin ve yazılımının sertifikasyon sürecinde göz önünde bulundurulması gerekir. Bir İHA'ya uygulanacak sertifikasyon kuralları, şüphesiz, İHA'nın ait olacağı sınıfa göre değişiklik gösterecektir. Global Hawk için uygulanacak sertifikasyon kurallarının belirlenme çalışmalarında mevcut FAA kurallarının (FAR) ve yöntemlerinin, bu İHA'ya uygulanmasının sanıldığı kadar kolay olmayacağı, İHA sertifiksyonunda yeni bir yaklaşımın uygulanmasının gerekli olacağı anlaşılmıştır [8].

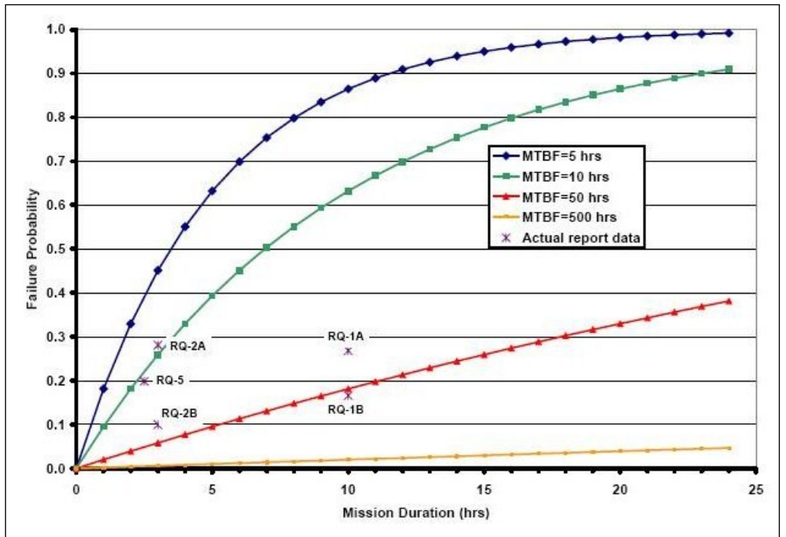
İtki sistemi, uçuş kumanda sistemi ve pilot/kullanıcı eğitimi iyileştirmeleri sayesinde, güvenilirlik artışının sağlayacağı tasarruf ile güvenilirlik artışı için göğüslenilecek maliyetin üstesinden gelinebilir. Bu hedef Pioneer, Predator ve Hunter programlarında başarılmıştır.

"Güvenilirlik için tasarım" yedekli (redundant) sistem tasarımını da öngörür. Bu ihtiyaç, genelde, uçuş açısından kritik sistemlerde veya yeterli seviyede düşük arıza oranı sağlayamayan sistemlerde ortaya çıkar.

ABD'de 2006 yılında meydana gelen Predator (MQ-9) kazası, insan faktörünün İHA kullanımındaki önemini göstermiştir [1]. Hava Aracının içinde pilot mevct olmasa bile tasarımda, operasyonel kullanımında ve eğitim planlamalarında insan faktörünün göz önünde bulundurulması kaçınılamaz bir ihtiyaçtır.

Yazılım sahasındaki mevcut gelişmeler ve GPS Sinyal Simülatörlerinin mevcut olması sebebiyle, İHA'lara dışarıdan müdahale imkanı mevcuttur. Gerek İHA tasarımında ve gerekse komuta kontrol sistemlerinin siber saldırıya dayanıklı (spoof-resistant) olarak hazırlanması gerekmektedir. GPS'e bağımlı olmayan seyrüsefer sistemleri veya iletişim ve telemetri sinyallerinin kriptolanması da önerilen diğer çözümlerdendir.

İHA'lar için tahsis edilmiş bir radyofrekans spektrumunun



Şekil 11. Görev Süresine (saat) Bağlı Arıza Oranı [3]

mevcut olmaması da, bilerek veya istenmeden sinyal engellenmesi (interference) sebebiyle iletişim kaybı riskini de artırmaktadır.

İHA'ların bakımı pilotlu uçaklardan biraz farklılık arz eden bir sahadır. Geleneksel uçak bakımından farklı olarak, İHA Bakım Personelinin hava aracının, yer kontrol istasyonunun ve iletişim ekipmanından olşan sistemin güvenilirliğini sürdürmek zorundadır. İHA bakımcılarının motordan yazılıma, elektronikten radyo kontrol teorisine, antenlerden RF girişimi ve elektromanyetik etkiden korumaya kadar pek çok şey bilmesi gerekiyor. İHA'lara yazılım yüklenmesinde ve testinde kullanılacak laptop bilgisayarlar ve bunlarda kullanılan yazılımlar "uçuşa elverişlilik" konusu olmaya başladı. İHA'ların bakımında, bakımcı personelin bilgisayar kullanım bilgisi ve tecrübesi önemli bir "insan faktörü" olmaktadır.

Diğer taraftan sertifikasyon otoriteleri, İHA'ların operasyonel kullanımı meselesine bir netlik kazandırmadan; bakım konusundaki yönergesel ihtiyaçları karşılamayı öncelikli bir konu olarak görmüyor. Bu duruma bir örnek olarak FAA, İHA'nın bakımı konusunu, yönerge hazırlama çalışmalarında, en son ihtiyaç kalemi olarak görüyor [9]. Aslında bu durum (bakış açısı) insanlı hava araçları için de geçerlidir [10].

İHA'ların, pilotlu uçaklara nazaran nispeten daha küçük boyutta imal edilmeleri, bakım açısından erişilebilirliği güçleştirirken, yeterince aydınlatılmamış gece ortamında bakım ve uçuşa hazırlanmak durumunda kalınması da insan hatası ihtimalini artırmaktadır. Bu sebeple, bakım için İHA sistemlerinin erişilebilirliğinin tasarım aşamasında mutlaka dikkate alınması gerekmektedir.

İHA'ların ortak paylaştıkları havacılık sistemi ve ortamında emniyetli bir şekilde işletilmesi zorunludur. Tasarımı ve üretimi veya tedariği gerçekleştirilecek İHA Sistemlerinin, diğer hava araçlarına ve yerdeki şahıslara/mülke bir zarar vermeyeceğinin gösterilmesi, pilotlu hava araçlarıyla eşdeğer emniyet seviyesinin sağlanması gerekir.

Güvenilirliğin yanında, İHA tasarımını güçlü bir şekilde etkileyen diğer emniyet unsurları çarpışmadan kaçınma, insan faktörleri ve aracın içinde uçabileceği atmosfer limitleridir. Havada (olası) çarpışmalardan kaçınabilmek için, İHA'nın görerek kaçınma veya tespit ederek kaçınma kabiliyetinde olması gerekir. Çarpışmadan kaçınma için geliştirilecek çözümlerin, insanlı uçaklarda sağlanan görerek kaçınma imkanıyla eşdeğer emniyet seviyesinde olması zorunludur. İHA'ların tüm uçuşu süresince, diğer hava araçlarıyla çarpışmaya karşı güvenilir bir önleme/kaçınma tedbirine sahip olması gerekir [2, 9].

Sistem güvenilirliği anahtar bir parametre olup, sistemin donanım ve yazılımının olgunluğunun doğrudan bir sonucudur. Donanım arızaları ve yazılım hataları, bir İHA'nın geliştirilmesinde ve operasyonel kullanımında yaygın karşılaşılan bir durum olup, sistemin güvenilirliğini doğrudan etkiler. Bir İHA'nın ana komuta ve kontrol fonksiyonunda Data Link'in performansı hayati önemdedir. İHA operasyonel kullanımı, faydalı yük verisinin iletim ihtiyaçlarının çok ötesinde, atmosferik perdeleme (fading), çoklu iletişim yolu kaybı ve anten hizalamaması gibi sebeplerle, Data Link'in kullanıma hazır olmasına büyük ölçüde bağımlıdır. Data Link tasarımında ekipmanın fonksiyonel yedekliliği (bolluğu) veya tekrar konfigüre edilebilme kabiliyeti gibi, yüksek sistem güvenilirliği gereklidir.

Halen kullanımdaki İHA'lar için motor ilişkili faktörler, İHA kazalarında ana kaynakları teşkil etmiştir. İHA'ların Motor/İtki sistemlerinin geliştirilmesinde pilotlu uçaklar için gerçekleştirilen gelişmelerden büyük ölçüde istifade edilmekte ise de, halen Ticari Hazır (COTS) olarak sunulan Motor/İtki Sistemlerinin performansı bazı uygulamalar için yeterli olmayabilir. Bu durumun, tasarımın erken safhasında iyi değerlendirilmesi gerekir.

Diğer taraftan, Fırlatma (Launch) ve Kurtarma (Recovery) sistemlerinin kalkış ve iniş gibi kritik safhalarda uygun bir güvenilirlik seviyesini sağlaması zorunludur. Güvenilirliği artırmak için başlıca iki yol sistemin ve komponentlerinin bütünlüğünün (integrity) geliştirilmesiyle fonksiyonel yedeklemenin/bolluğun (redundancy) sağlanmasıdır [2]. Yedekleme, bir sistemde (veya ekipmanda), güvenilirliği artırmak amacıyla belirli bir fonksiyonu yerine getirmek için, iki veya daha fazla vasıta kullanarak uygulanan bir tekniktir.

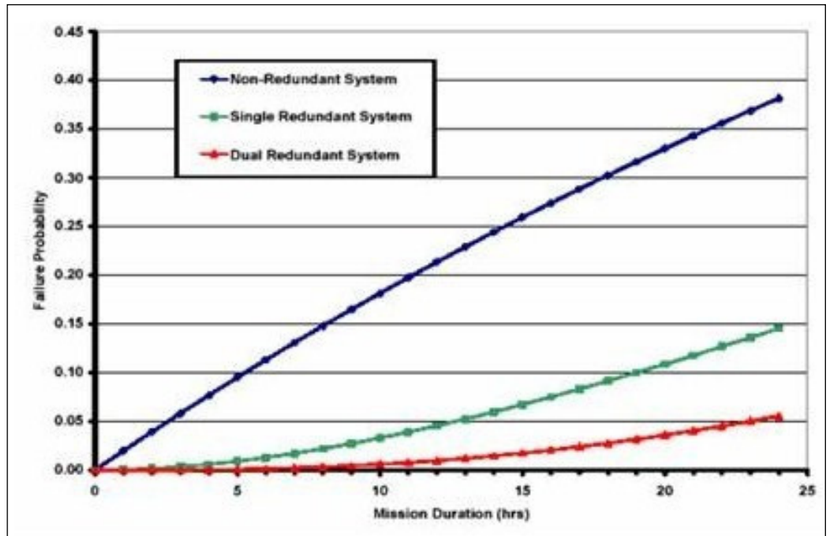
İHA'ların görev ihtiyacı göz önünde bulundurulduğunda, çok değişik tip ve kapasitede geliştirilmeleri sözkonusudur. Bu durum da değişik emniyet seviyesi ihtiyacını beraberinde getirmektedir. Bir İHA Sistemi tasarımında, bu İHA Sistemi için sağlanacak emniyet seviyesi belirlenirken, sivil/askeri hava trafiği ile kesişme olasılığının ve üzerinde uçulacak arazideki insan yoğunluğunun (asgari bir ihtiyaç olarak) göz önünde bulundurulması gerekir.

Güvenilirlik çalışmaları, maliyeti katlanılabilir sınırda tutarken, güvenilirliği artırmak için, tasarımcılara özel tasarım gerekleri de sunar. Güvenilirlik çalışmaları kapsamında gerçekleştirilecek Arıza Modu ve Etkileri Analiziyle

- Çok fonksiyonlu veya "kontrollü arızalanan" (fail safe) tasarımların kullanımı
- Standart sistem mühendisliği prosedürlerinin kullanımı
- Denenmiş malzeme ve parçaların kullanımı
- Basitlik, tasarımın test edilebilirliği ve üretilebilirliği

yollarından bir kısmının veya tamamının izlenmesinin gerekliliği ortaya çıkabilir.

İHA'lar daha karmaşık sistemler haline geldikçe, insan faktörünün ve İHA'ların kullanımında görev alacak insanın da önemi artmaktadır. "İHA sistemlerinde insan performansı" üzerine çalışmalar, insanın reaksiyonunun ve etkinliğinin sistemdeki otomasyonun seviyesine, sistemin güvenilirliğine ve bilgi güncelleme hızına bağlı olduğunu göstermiştir. İHA



Şekil 12. Yedeklemenin (Redundancy) Görev Süresi ve Arıza Olasılığıyla İlişkisi [3]

sisteminin güvenilirliğinde, Yer Kontrol İstasyonu tasarımı, kullanıcı beceri seviyesi, uçuş esnasında "durumun farkında olma" (situational awareness) ve hava trafik kontrolü hususları büyük ölçüde etkilidir.

Bir hava aracının kokpit ortamının Yer Kontrol İstasyonu'na adaptasyonu beklenenden daha zordur. Bir Hava Aracı içindeki pilotlara sağlanan görsel, işitsel ve hareket verileri, durum/ortam algılamasını kolaylaştırarak, pilotun otomatik sisteme müdahalesini ara sıra gerekli kılar. Uçuşu yerden yöneten pilotlar ise, kararlarında otomatik sistem verilerine ve göz temasına büyük ölçüde bağımlıdır. İHA'lara komuta edecek personelin kalifikasyonunda farklı ön şartlar ve uygulamalar sözkonusudur. Bir örnek olarak, ABD Hava Kuvvetleri, bir İHA operatörünün IFR (gece şartlarında) uçabilen bir kalifiye pilot olmasını öngörmüşken, ABD Silahlı Kuvvetlerinin diğer birimleri, özel pilot lisansına sahip veya yerde eğitilmiş personeli de yeterli görebilmektedir. FAA ise, "Özel (Private) Pilot Lisansı"nı şart koşmaktadır. Şüphesiz, bu kriter farklılığında, uçuşu yönetilecek İHA'nın sistem karmaşıklığı ve uçulacak ortam da etkili olmaktadır.

Havada ve yerde görev yapan pilotlar için, durum/ortam farkındalığı ve dolaylı riskler hususunda farklar sözkonusudur. Hava Aracı içindeyken daha fazla riske maruz olan pilotun, gelişen duruma bağlı olarak, otonom fonksiyonları devre dışı bırakma ihtiyacı büyüktür. Bir Yer Kontrol İstasyonu tasarımında ana hedeflerden biri de, durum/ortam farkındalığının artırılması veya otomasyona daha fazla yetki devridir. Yine de İHA'nın operasyonel kullanımında İnsan faktörünün etkisini azaltmak için yönelinen "otonom uçuş" (otomasyon) güvenilirlik ihtiyacını karşılamada (henüz) yeterli olamadı [14].

Bu arada, hava trafik kontrolü hizmeti sağlayanların da İHA'ları anlama ve davranışlarını tahmin hususlarında, alışılmış pilotlu Hava Araçlarından farklı bir yaklaşım ve algı geliştirmeleri gerekecektir. İHA'ların nispeten küçüklüğü ve İHA Uçuş (Yönetim) Ekibi ile dolaylı iletişim zorunluluğu hava trafik kontrolün karşılaşacağı güçlüklerden bazılarıdır.

Bu yazının "Reynolds Sayısı Etkisi"yle ilgili paragrafında da bahsedildiği üzere İHA'lar, genelde hava şartlarından, pilotlu hava araçlarından daha fazla etkilenir. Diğer kaza faktörleriyle kıyaslandığında, hava şartlarının İHA uçuş emniyeti üzerine etkisi/katkısı yine de sınırlı kalmıştır. Bunun sebepleri, İHA pilotlarının meteorolojik şartları takip etme imkanının daha fazla olması, İHA'ların havada kalış sürelerinin daha uzun olması ve uygun olmayan atmosfer katmanının üzerine tırmanabilme imkanlarıdır. Yine de, türbülans gibi istenmeyen hava şartları, link kaybı ile kumanda kaybına da sebep olabilmektedir. Bu sebeple otopilot veya otonom seyrüsefer fonksiyonlarının ana kurtarma kabiliyeti olarak göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

İHA'ların güvenilirliğini artırmak mümkündür. Nitekim, yakın geçmişte Predator sistemine uygulanan iyileştirmelerle MQ-9'ların güvenilirliği, MQ-1'lere göre büyük ölçüde artırıldı. Başta uçuş kontrol sistemi olmak üzere insan faktöründen ve yerdeki sistemlerden kaynaklanan arızalarda önemli azalma sağlandı. Uçuş kumanda sistemindeki servo-akçuatörlerin güvenilirliği de büyük ölçüde artırıldı. Artık daha güvenilir sistem elemanlarını Rafta Hazır (COTS) olarak tedarik etmek mümkündür.

Birçok İHA'da algılama, kontrol, iletişim ve artan oranda bağımsız seyrüsefer için, yazılım tarafından işletilen karmaşık sistemler kullanmaktadır. Bu insan kontrolünden bağımsızlık, aracın emniyetli uçuşu sürdürebileceği kendi sistemlerinin ve üzerindeki komuta/kontrol sistemlerinin performansını, programlanmış limitleri dikkate alarak, ölçebileceği anlamına gelmektedir. Artan otonomi data linkten gönderilecek daha sınırlı talimat ve daha dar bant genişliği anlamına gelmektedir. Otonominin potansiyel faydaları açıkken; teknik güçlük, sertifikasyon ihtiyacı ve ekonomiklik hususlarını da beraberinde getirecektir [9].

7. İHA'LARIN SİVİL HAVA SAHASINA ENTEGRASYONU

2000'li yılların başında otuzdan fazla ülke, yaklaşık 300 farklı modelde İHA üretiyordu. Kırktan fazla ülke de, çoğu askeri amaçlı olmak üzere, İHA kulanıyordu. 2007'ye gelindiğinde ise yaklaşık 50 ülkedeki 250 firma farklı boyutta altıyüzdenfazla iha üretmekteydi. 2012 yılına gelindiğinde, ABD olmak üzere İsrail, İngiltere, Fransa, İtalya, Türkiye, Japonya, Avustralya, İsveç ve Güney Kore dahil İHA imal eden ülke sayısı elliyi, üretilen İHA sayısı da yedi bini aştı. Hava aracı üretiminde İHA'ların yakın gelecekte önemli bir iş potansiyeli yaratacağı, 2020'li yıllarda, İHA üretiminin yüz milyar dolara ulaşacağı hesaplanıyor [19].

İHA'ların sivil hava sahasında rutin olarak kullanılabilmeleri için, güvenilirliklerinin artırılması gerekecektir. İHA'ların sivil kullanımda sigortalanabilmesinin yanı sıra mevcut maliyeti de güvenilirlik artışı için önemli bir motivasyondur [9]. Diğer taraftan, İHA'ların kabul görecek bir güvenilirlik seviyesine eriştirilebilmesi için, havacılık endüstrisi önemli gayret göstermektedir.

İHA'ların sivil hava sahasında kullanılabilmesi için, başta sertifikasyon standartları olmak üzere, bu araçların sivil hava sahasına entegrasyon prosedürlerinin hazırlanması için birçok çalışma eş zamanlı yürütülmektedir.

Yönergesel gerekler İHA sertifikasyonu ve operasyonel kullanımında "operasyonel sınırları" belirleyecektir. Bugünlerde İHA'ya özgü yönergelere sahip ülke sayısı çok azdır. Yönergesel yapı, İHA pazarının gelişmesinde tanımlayıcı ana bir faktör olacaktır. Mevcut durumda İHA sınıflaması ve tanımlaması için uluslararası kabul görmüş düzenlemeler henüz hazırlanmaya başlanmıştır. İHA'lara yönelik yönergelerin geliştirilmesinin koordinesi için uluslararası birçok çalışma yürütülmektedir. Bu kapsamda EASA prensipler ve sertifikasyon konusunda, JAA/EUROCONTROL Yönerge Konsepti konusunda, FAA prensipler konusunda, ABD Savunma Bakanlığı İHA Yol Haritası konusunda çalışmalar yapmaktadır. ICAO bir anketle üye ülkelerden bu konuda görüş toplamıştır. NATO ise FINAS çalışma grubu ile tasarım ve eğitim sahalarında çalışmalar yürütmektedir.

NATO STANAG 4671 dışında, İHA'lara özgü olarak oluşturulmuş bir sertifikasyon, operasyonel kullanım veya operatör kalifikasyonu standardı henüz yoktur. FAA'in bu sahaya yönelik standart oluşturulmasının da uzun zaman alacağı anlaşılıyor. FAA, yine de, 2011 yılında yayımladığı "FAA Order 8130.34B Airworthiness Certification of Unmanned Aircraft Systems" ile İHA tasarımı, üretici ve kullanıcılarına yönelik bazı kuralları ve ihtiyaçları belirlemiştir. FAA, diğer taraftan, İHA'lara "Özel Uçuşa Elverişlilik Sertifikası" (Special Airworthiness Certificate) vermeye başlamıştır. FAA'in "FAA Order 8130.34B" dokümanında tanımladığı "Emniyet Kontrol Listesi"nin (Safety Checklist) tasarımcılar tarafından özellikle göz önünde bulundurulmasında yarar görülmektedir. Bu dokümanda da yer aldığı üzere FAA göre, İHA Pilotunun Özel (Private) Pilot lisansına sahip olmasını gerekli görmektedir. FAA'in zorunlu kıldığı diğer bir ihtiyaç ise, İHA kontroldan çıktığında kullanılacak Uçuşu Sonlandırma (Flight Termination) Sistemidir [15].

İHA'larda, acil durumlarda kullanılmak üzere, bir "Uçuşu Sonlandırma Sistemi"ne (Flight Termination System) de ihtiyaç bulunmaktadır. Bu sistem kısaca motoru durdurmak (veya rölantiye almak), İHA'nın kontrollü uçuşuna son vermek , acil durum paraşütünü açmak veya bazı uç uygulamalarda, hava aracını uçamaz hâle getirmek için kullanılmaktadır. Uçuşu Sonlandırma Sisteminin ihtiyaç duyulduğunda, kendisinden beklenen performansı tam olarak gerçekleştirebilmesi için, ileri derecede güvenilir olarak tasarlanması ve elektromanyetik etkilenmeye karşı test edilmesi ve uçuş testi için planlanan test sahasının maksimum uzaklık sınırında dahi kumanda edilebildiğinin sınanması gerekmektedir [16].

EASA İHA'lara yönelik ilk yönerge dokümanını Eylül 2011'de yayımladı. Diğer taraftan EASA, İHA Sertifikasyon kriterinin 2017'ye kadar hazırlanmasını planladı. ICAO Mart 2011'de, İHA'lar için 328 numaralı sirküleri yayımladı. EUROCONTROL, aynı dönemde, İHA'ların ATM'ye entegrasyonu için prosedür hazırlamaya başladı [17].

İHA Sistemlerinin uçuşa elverişlilik sertifikasyonu için henüz sivil standartlar mevcut olmamakla birlikte, hazırlanacak standartlarda hava aracının yanı sıra yer kontrol istasyonu, iletişim (data) linki, uçuş kontrol sistemi, otonom sistemlerin, fırlatma sisteminin sertifikasyonunun öngörülmesi, ayrıca bu sertifikasyon süreci içinde "sistemin toptan sertifikasyonu"nun da kapsanması gerekecektir. Northrop Grumman Global Hawk (İHA) sistemi, 2006 yılında ABD'de Askeri Uçuşa Elverişlilik Sertifikası alan ilk araç oldu. FAA, bu sistemin ABD hava sahası içinde kullanımına da, CoA (Certificate of Authorization) belgesiyle izin verdi.

Havacılık yazılımları için standartlar sağlayan RTCA/DO-178B (Software Considerations in Airborne Systems and Equipment Certification) İHA'larda kullanılacak yazılımlara uygulanması için fazla katı bulunabilir. Ancak, bir İHA'nın geliştirilme maliyeti ve entegre olacağı sivil hava trafiği için yaratabileceği risk dikkate alındığında, diğer havacılık standartlarının yanı sıra yazılım standartlarının önemi de daha kolay anlaşılacaktır.

İHA'ların yönetiminde kullanılacak yer kontrol istasyonları için güvenilirlik ihtiyacı seviyesi henüz araştırılmakta olan bir konudur. Komuta/kontrol data link sistemi, İHA'nın emniyetle uçurulmasında ölümcül derecede önem taşımaktadır. Data link sisteminin bir bölümünün havacılık standartlarına uyumlu olmama olasılığı bu sistemlerin sertifikasyonunu da zorlaştıracaktır.

8. SONUÇ

İHA'lar, birçok bakımdan pilotlu hava araçlarından farklıdır. Bir İHA Sisteminde yer kontrol istasyonu, data link tesisi ve İHA'nın birlikte çalışmak üzere farklı organizasyonlar tarafından inşa edildiği düşünüldüğünde, uçuş emniyetini sağlamak için komponent düzeyindeki sertifikasyonun yeterli olamayacağı hususu açıktır. Bu sebeple, bir İHA Sisteminin sertifikasyonunda "toplam sistem sertifikasyonu" yaklaşımının izlenmesi gerekecektir. Bu konuda İsveç Silahlı Kuvvetleri ile İsveç Sivil Havacılık Otoritesi örnek alınacak çalışmalar yürütmektedir [6]. Avrupa Birliği tarafından göz önünde bulundurulan "toplam sistem yaklaşımı"nın yakın gelecekte kurumsallaşması beklenmektedir. İHA'ların yönetiminde ve izlenmesinde görev alacak pilotlar için de oluşturulacak İHA sınıfları paralelinde, farklı beceri seviyeleri gerektiren ihtisaslaşma söz konusu olacaktır.

İHA'ların sivil hava sahasına entegrasyonunun sağlanabilmesi için, halen erişilmiş olan güvenilirlik seviyesinin artırılması gerekmektedir. Bunu mümkün kılmak için İHA tedarik bütçelerinde güvenilirlik artırma programları için de kaynak ayrılmalıdır [15].

SHGM, İHA'ların operasyonel kullanımı için hazırladığı talimatla İHA'ların Türkiye Hava Sahasına entegrasyonu çalışmalarında ilk adımı teşkil edecektir [18].

KAYNAKÇA

1. **Elias, B.** 2012. "Pilotless Drones: Background and Considerations for Congress Regarding Unmanned Aircraft Operations in the National Airspace System," http://www.fas.org/sgp/crs/natsec/R42718.pdf
2. Nautilus-Unmanned Aerial Systems Reliability and Safety. 2008. http://www.smatf1.polito.it/it/content/download/363/1454/version/1/file/UAS+Reliability+and+Safety+-+Slides.pdf, son erişim tarihi: 08.10.2012.
3. Office of Secretary of Defense, UAV Reliability Study – Section 2, UAV Reliability Data
4. RQ-1 Predator MAE UAV, http://www.globalsecurity.org/intell/systems/predator.htm, son erişim tarihi: 08.10.2012
5. Defense Science Board Study on Unmanned Aerial Vehicles and Uninhabited Combat Air Vehicles, 2004. http://www.fas.org/irp/agency/dod/dsb/uav.pdf, son erişim tarihi: 08.10.2012
6. FY 2011. Annual Report-Operational Test and Evaluation Director; ABD Savunma Bakanlığı, http://www.dote.osd.mil/pub/reports/FY2011/, son erişim tarihi: 08.10.2012.
7. **Hobbs, A., Herwitz, S.R.** 2006. Human Challenges in the Maintenance of Unmanned Aircraft Systems, 2006. http://human-factors.arc.nasa.gov/publications/UAV_interimreport_Hobbs_Herwitz.pdf, son erişim tarihi: 08.10.2012.
8. Aviation Today. 2007. http://www.aviationtoday.com/am/categories/military/Technology-Focus-Unmanned-Vehicle-Maintenance_16794.html, November, son erişim tarihi: 08.10.2012.
9. **T. De Garmo, M.** 2004. Issues Concerning Integration of Unmanned Aerial Vehicles in Civil Airspace, http://www.mitre.org/work/tech_papers/tech_papers_04/04_1232/04_1232.pdf, son erişim tarihi: 12.10.2012.
10. **Kenaroğlu, Y.** 2011. Hava Araçlarının Uçuşa Elverişlilik Sertifikasyonu, Mühendis ve Makina, cilt 52, sayı 614, s.16-28
11. **Roberts, J.** 2012. Drones Vulnerable to Terrorist Hijacking, Researchers say, http://www.foxnews.com/tech/2012/06/25/drones-vulnerable-to-terrorist-hijacking-researchers-say/, son erişim tarihi: 12.10.2012.
12. **Gorman, S., Dreazen, Y. Z., Cole, A.** 2009. Insurgents Hack U.S. Drones The Wall Street Journal, December, http://online.wsj.com/article/SB126102247889095011.html, son erişim tarihi: 18.10.2012.
13. Iran–U.S. RQ-170 incident; Wikipedia. http://en.wikipedia.org/wiki/Iran%E2%80%93U.S._RQ-170_incident, son erişim tarihi: 18.10.2012.
14. **Williams, K.W.** 2004. A Summary of Unmanned Aircraft Accident/Incident Data: Human Factors Implications, DOT/FAA/AM-04/24 Medicine, Washington, DC 20591
15. FAA Order 8130.34B Airworthiness Certification of Unmanned Aircraft Systems. 2011. http://web.shgm.gov.tr/kurumsal.php?page=duyurular&id=1&haber_id=2420, son erişim tarihi: 18.10.2012.
16. **Pontzer, A.E. Lower, M.D., Miller, J.R.** 2010. RTO AGARDograph 300 Flight Test Technique Series – Volume 27 AG-300-V27, April, Unique Aspects of Flight Testing Unmanned Aircraft Systems, http://ftp.rta.nato.int/public//PubFullText/RTO/AG/RTO-AG-300-V27///$$AG-300-V27-ALL.pdf, son erişim tarihi: 08.10.2012.
17. Policy Statement; Airworthiness Certification of Unmanned Aircraft Systems (UAS). 2009. https://www.easa.europa.eu/certification/docs/policy-statements/E.Y013-01_%20UAS_%20Policy.pdf, son erişim tarihi: 08.10.2012.
18. İnsansız Hava Aracı Operasyonlarının Usul ve Esaslarına İlişkin Talimat (Taslak; Kasım 2012) http://web.shgm.gov.tr/kurumsal.php?page=duyurular&id=1&haber_id=2420, son erişim tarihi: 25.11.2012.
19. Deloitte; Disruptive Innovation Case Study: Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), https://www.deloitte.com/assets/Dcom-Australia/Local%20Assets/Documents/Industries/Government%20Services/Public%20Sector/Deloitte_DefenseUAV_DI_CaseStudy_2Apr2012.pdf, son erişim tarihi: 20.10.2012
20. **Carlson, B.J.** 2001. Past UAV Program Failures and Implications for Current UAV Programs, http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA407103, son erişim tarihi: 28.10.2012.