

# UÇAK TASARIMINDA GÜVENİLİRLİK, HAZIR BULUNUŞLUK VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK ANALİZLERİ UYGULAMASI

Pınar Aydın<sup>1</sup>

## 1. GİRİŞ

Sivil havacılık endüstrisi, en büyük ve belki de güvenlik açısından en zor projelerin yapıldığı alandır. Her yeni proje tasarımı bir sözleşmeyle başlar. Bu sözleşme, birçok farklı konunun yanında alıcının tasarımcı şirketten beklentilerini içeren teknik gereksinimleri de içerir. Sözleşme diliyle yazılmış bu teknik gereksinimler, sistem mühendisleri tarafından alınır. Okuyan tüm kişiler tarafından aynı şekilde anlaşılacak açık, net ve doğrulanabilir gereksinimlere dönüştürülür. Bu teknik gereksinimlerin bir kısmı ağırlık, boyut, yolcu kapasitesi, uçak hızı gibi ürün gereksinimlerini, bir kısmı ise ürünün teslimat sonrası nasıl destekleneceği ile ilgili Entegre (Bütünleşik) Lojistik Destek (ELD) gereksinimlerini oluşturur. Bu gereksinimlerden bir tanesi de hazır bulunuşluktur.

Peki bir ürün kullanıma nasıl hazır olur? Hazır bulunuşluk dediğimizde sizin aklınıza neler geliyor? Bir üründen neler bekliyorsunuz? Peki bir uçak için hazır bulunuşluk nedir? Hazır bulunuşluk için gerekli olan kavramlar nelerdir? Hazır bulunuşluk hesaplaması için uçakta hangi analizler

yapılır? Bu yazıda, uçak tasarımında karşılaşılan bu soruların yanıtları açıklanmaya çalışılacaktır.

## 2. HAZIR BULUNUŞLUK

### 2.1 Hazır Bulunuşluk Tanımı

Bir ögenin, bilinmeyen (rastgele) bir zamanda göreve çağrıldığında veya bir görevin başlangıcında ne ölçüde çalıştırılabilir ve kullanılabilir durumda olduğunun ölçüsü olarak tanımlanır.

### 2.2 Hazır Bulunuşluk Çeşitleri

Çok önemli bir değişken olmasından ve farklı ölçümlerinde kullanılabilmesi nedeniyle birçok farklı hazır bulunuşluk çeşidi bulunmaktadır. Bu yazıda, en yaygın kullanılan üç türüne değinilecektir.

- Bunlardan birincisi tasarımsal hazır bulunuşluktur (inherent availability). Hesaplama ürünün belli süre aralıklarla arızalanacağı ve bu arızaların giderilmesi için gereken düzeltici bakım süresi göz önünde bulundurulur. Önleyici bakımlar ve lojistik gecikme

<sup>1</sup> Sistem Güvenilirlik ve Emniyet Müh. - [pinarkaymaz55@gmail.com](mailto:pinarkaymaz55@gmail.com)

süreleri göz ardı edilir. Amacı sadece tasarıma odaklanarak ürünün tasarımsal olarak gereksinimi karşılamasıdır. Kısacası ürünün yalnız içsel özellikleri dikkate alınır. İçsel özellikler, Arızalar Arası Ortalama Zaman (MTBF - Mean Time Between Failures) ve Onarımlar Arası Ortalama Zaman (MTTR - Mean Time To Repair) değişkenleri ile tanımlanır ve tasarımsal hazır bulunuşluk aşağıdaki formül ile hesaplanır:

$$A_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} X \%100$$

- İkinci tür; erişilebilir hazır bulunuşluktur (achieved availability). Hesaplama, ürünün belli aralıklarla arızalandığında, bu arızayı gidermek için harcanan sürenin yanında, sürekliliğinin sağlanması için yapılan önleyici bakımların süresi de göz önünde bulundurulur. Amacı, önleyici bakımların da belirli bir düzeyde tutularak ürünün, kullanıcının gereksinimini karşılamasını sağlamaktır. Kısacası, içsel özellikler ve önleyici bakımlar dikkate alınır. Aşağıdaki formül ile hesaplanır:

$$A_o = \frac{\text{Toplam Zaman}}{\text{Çalışma Süresi}} X \%100$$

- Son tür ise işlevsel hazır bulunuşluktur (operational availability). Hesaplama ürünün belli sürelerde arızalanıp bu arızayı gidermek için harcanan süre ve sistemin sürdürülebilirliğini sağlamak için gerekli olan planlı bakımların yanı sıra, lojistik destek için gerekli olan süre de göz önünde bulundurulur. Kısacası içsel özellikler, önleyici bakımlar ve bu bakımları gerçekleştirebilmek için lojistik olarak gerekli olan tüm gereksinimler (idari gecikme ve taşıma sürelerini de kapsayacak şekilde) dikkate alınır. Aşağıdaki formül ile hesaplanır:

$$A_o = \frac{\text{Çalışma Süresi}}{\text{Toplam Zaman}} X \%100$$

Yukarıda, alıcının istedikleri gereksinim olarak listelendiğini ve bu gereksinimlerden bir tanesinin de hazır bulunuşluk olduğu belirtilmişti. Uçak projelerinde, tasarımsal hazır bulunuşluk türü, gereksinim olarak görülür.

Tasarımsal hazır bulunuşluk gereksinimi, yukarıda da belirtildiği gibi güvenilirlik ve sürdürülebilirlik değişkenle-

rinden gereksinimi sağlayacak şekilde uçak için gerekli olan güvenilirlik ve sürdürülebilirlik hedefleri belirlenir. Bu hedef belirleme bir çeşit optimizasyondur. Benzer uçaklarda edinilen deneyim, tasarımsal veriler, mühendislik bu optimizasyonun en temel girdileridir.

### 2.3 Hazır Bulunuşluk Doğrulaması

Projenin başında belirlenmiş olan hedef MTBF ve MTTR değerleri, güvenilirlik ve sürdürülebilirlik analizleriyle hesaplanarak projenin ilerleyen aşamalarında Tasarımsal Hazır Bulunuşluk değeri doğrulanır. Böylelikle alıcı gereksinimlerinden birinin nasıl karşılandığı ayrıntılı analizlerle gösterilmiş ve isterin yerine getirildiğinin kanıtları alıcıya sunulmuş olur.

Gereksinimin doğrulanmadığı durumlarda, tasarım değişikliğine gidilmesi gerekir ki bu, havacılık endüstrisinde çok maliyetli ve çok zor bir durumdur. Bu durumu önlemek için, güvenilirlik ve sürdürülebilirlik analizleri, proje başlangıcından başlayarak tüm süreç boyunca bir tasarım işlemi olarak gerçekleştirilmelidir.

## 3. GÜVENİLİRLİK

### 3.1 Güvenilirlik Tanımı

Bir öğenin amaçlanan işlevini belirli bir süre boyunca, belirtilen koşullar altında yerine getirebilme olasılığı olarak tanımlanır [1]. Onarılabilir öğeler için temel bir güvenilirlik ölçüsü Hatalar Arası Ortalama Zaman (MTBF) değeridir. Bu değer; belirtilen koşullar altında, belirli bir ölçüm aralığı sırasında, öğenin tüm parçalarının belirlenen sınırlar içerisinde çalıştığı ortalama ömür birimi sayısı ile bulunur.

### 3.2 Güvenilirlik Gereksinimleri

Yukarıda Karakteristiksel Hazır Bulunuşluk gereksinimi ve bu gereksinimi öğrenen güvenilirlik bölümünün, güvenilirlik hedefi belirlemesi belirtilmişti. Bu hedef, güvenilirlik değeri olarak ya da Hatalar Arası Ortalama Zaman (MTBF) değeri olarak tanımlanır. Bu tanımlama yapılırken, uçağa etkiyecek basınç, sıcaklık, titreşim gibi etkenleri değiştirecek olan, uçağın türü (eğitim, kargo ya da savaş uçağı gibi) ve donanımlarının yerleştirileceği bölgeye göre ortalama sıcaklık değerinin belirlenmesi gereklidir. Çevresel şartları ve kullanılacağı platform göz önüne alınmadan belirlenen bir Hatalar Arası Ortalama Zaman (MTBF) gereksinimi, eksik bir gereksinimdir ve doğru bir ister olmaz.

Niceliksel güvenilirlik gereksinimleri yanında her sistem

ya da ekipman için niteliksel güvenilirlik gereksinimleri de belirlenir ve tasarımcı ya da alt yükleniciye iletilir.

### 3.3 Güvenilirlik Kırılımı

Uçak seviyesi belirlemiş olduğumuz MTBF değeri sistem seviyesine kırılır. Bu kırılımı yapmak için MIL-HDBK-338B askeri el kitabında, eldeki bilgiye ve projenin aşamasına göre uygulanabilecek farklı yöntemler yer almaktadır. Bu yöntemlerden en çok, Hedeflerin Fizibilitesi Tekniği (Feasibility of Objectives)dir. Uçakta yer alan ve MTBF atanması yapılacak olan tüm sistemler listelenir. Bu sistemler dört farklı değişken kapsamında incelenir. Bu değişkenler sistemin karmaşıklığı, sistemin tasarımsal olgunluk seviyesini göstergesi (state of art), sistemin kullanılacağı performans süresi ve sistemin maruz kalacağı çevresel şartlardır. Her sistem için, bu değişkenlere karşılık gelecek 1'den 10'a numaralandırmalar yapılarak, sistemler birbirleri ile karşılaştırılır ve MTBF atamaları yapılır. Atanan bu MTBF değerleri, her sistemin gereksinimlerini içeren Sistem Gereksinim Belgesine eklenir. Böylelikle sistem tasarımcısı ya da alt yükleniciden temin edilecek bir sistemse, alt yüklenici firma kendisinden beklenen MTBF hedefini öğrenmiş olur. Gereksinim atanırken uçak seviyesinden başlayıp aşağıya doğru sisteme, hatta sonrasında ekipmana kadar inilir.

### 3.4 Güvenilirlik Öngörülleri

Atanmış olan gereksinimi karşılamak için MTBF değeri hesaplanması gerekmektedir. MTBF değeri farklı yöntemlerle hesaplanır. Bunlardan bir tanesi test etme yöntemidir. Tasarlanmış olan donanımı, hızlandırılmış testlere sokarak, ne kadar sürede bir arıza yaptığı bilgisine ulaşılabilir. Elde edilen değer anlamlı olabilmesi için örnek sayısının çok olması gerektiğinden, bu maliyetli bir çalışmadır.

Bir diğer yöntem ise saha verisidir. Eğer donanım, değerlendirilen uçaktan önce benzer bir uçakta benzer sıcaklık ve basınç değerlerinde kullanılmışsa, saha verisinden yararlanılabilir. Saha verisi, MTBF hesaplama yöntemleri arasında en gerçekçi olanıdır. Bu değer hesaplanabilmesi için sahada gözlenen arızaların düzgün ve eksiksiz bir şekilde kaydedilmesi büyük önem taşır. Aynı donanım farklı bir platformda kullanılmışsa, standartlarda yer alan platform çevirici etkenlerden yararlanarak yine MTBF değeri hesaplanabilir. Ama saha verisinin kullanılabilmesi için de, çok sayıda araçtan uzun yıllar boyunca

düzgün ve güvenilir verinin toplanmış olması gerekir. Bu yöntem de, kolay uygulanabilen bir yöntem değildir.

Yukarıda belirtilmiş nedenlerden özellikle tasarımda en çok kullanılan yöntem, güvenilirlik öngörü yöntemidir. Bu çalışmada, askeri standartlardan ya da farklı veri tabanlarından (EPRD, NPRD, Telcordia, gibi) yararlanılarak MTBF değeri hesaplanır. Gereksinim ataması yaparken uçaktan aşağı doğru sisteme, sonrasında donanıma inilir. Güvenilirlik öngörüsünde ise, uçağın en alt parçası olan bileşenden yukarı doğru, önce karta sonra da donanıma çıkılır. Bu çalışmanın yapılabilmesi için ekipmanın içerisinde yer alan tüm elektronik elemanların ve mekanik parçaların listelenmesi gerekir. Bu parçaların teknik şartnamelerinde yer alan bilgiler kullanılıp, belirli eşitlikler uygulanarak ya da arka planda aynı eşitlikleri uygulayan güvenilirlik yazılımları kullanılarak MTBF değeri hesaplanır. Hesaplanan değeri etkileyen en önemli etkenler, yukarıda da belirtildiği gibi donanımın yerleştirileceği bölgedeki ortalama sıcaklık değeri ve takılacağı platform bilgileridir. Ekipman için hesaplanan tüm MTBF değerleri birbirlerine eklenerek, sistem MTBF değeri, sonrasında da sistemler eklenerek uçak MTBF değeri hesaplanır. Bu hesaplamayı yapmak için uçağa monte edilen en küçük bileşenden başlanarak uçak düzeyine kadar çok ayrıntılı bir irdeleme yapılır. Böylece tasarımda yer alan her bir parçanın hata yapma olasılığı dikkate alınmış olur.

### 3.5 Hata Modu, Etkileri ve Kritiklik Analizi (FMECA)

Güvenilirlik çalışmaları kapsamındaki bir diğer eylem de, Hata Modu Etkileri ve Kritiklik Analizidir. Bu analiz kapsamında, bir donanımda yer alabilecek tüm olası hata modları listelenir. Bu hata modlarının olası nedenleri, bu hatayı tespit edecek herhangi bir tespit yöntemi varsa yazılır. Her bir hata modunun olma olasılığı, her bir parça için hesaplanmış olan hata oranı değerinin hata modu, dağılım veri tabanları kullanılarak hata modlarına atanır. Bu hata modu oluştuğunda, hatanın donanıma, sisteme ve uçağa etkileri tanımlanır.

Hata modunun uçak seviyesindeki etkisine göre kritiklik seviyesi belirlenir. MIL-STD-1629 [2] askeri standardına göre 4 çeşit kritiklik seviyesi vardır. Bunlar Az önemli (Minor), Sınırlı önem taşıyan (Marjinal), Hayati önemli (Kritik) ve Ölümcül'dür. Ölümcül kritiklik seviyesi uçak kaybı ya da insan ölümüne neden olan hata kritiklik sınıflandırmasıdır. FMECA çalışmasının en temel çıktısı, tek bir hatadan

başlayarak ölümcül kritiklik seviyesine sebep olacak hataları listelemek, donanım düzeyinde test gereksinimlerini belirlemek, saptanamayan bazı hata modları için önleyici bakımları belirlemek, görev ve işlemlerle ilgili sınırlamaları belirlemektir.

FMECA analizinde her bir hata modu için belirlenen hata oranı değerleri, güvenlik analizleri kapsamında çizilen hata ağaçlarının en temel girdisidir. Güvenlik analizleri ile hata durumları için belirlenen hedef değerlere ulaşıp ulaşamadığı bu yöntemle gösterilir. Güvenlik ve güvenilirlik eylemleri, uçağın belirlenmiş yönetmeliklere, standartlara ve yeterliliklere göre sertifikaya edilmeye uçuş izni alabilmesi için gereken en önemli aşamalardandır.

## 4. İDAME EDİLEBİLİRLİK

### 4.1 İdame Edilebilirlik Sürdürülebilirlik Tanımı

Belirlenmiş beceri düzeyindeki personel tarafından, belirlenen yöntemleri ve kaynakları kullanarak, belirlenen bakım ve onarım seviyesinde gerçekleştirilen, bir ögenin belirli bir durumda tutulabilmesi veya bu duruma geri getirilebilmesi için gereken bakım olasılığı olarak tanımlanır [1]. Onarılabılır öğeler için temel bir sürdürülebilirlik ölçüsü Onarımlar Arası Ortalama Zaman değeridir. Bu değer, herhangi özel bir onarım seviyesindeki düzeltici bakım sürelerinin toplamının, belirtilen koşullar altında belirli bir aralıkta, o seviyede bir öğedeki toplam arıza sayısına bölünmesiyle elde edilen oran ile bulunur.

### 4.2 İdame Edilebilirlik Gereksinimleri

Güvenilirlik değerine benzer şekilde karakteristiksel hazır bulunuşluk değerinin bir diğer parçası olan sürdürülebilirlik hedefi de belirlenir. Bu hedef, Onarımlar İçin Ortalama Zaman (MTTR) değeri olarak tanımlanır.

### 4.3 İdame Edilebilirlik Kırılımı

Uçak için, belirlenmiş olan MTTR değeri, sistem düzeyine göre kırılım yapılır. Bu kırılım için MIL-HDBK-470A[3] askeri el kitabında, eldeki bilgiye ve projenin aşamasına göre uygulanabilecek farklı yöntemler yer almaktadır. Bu yöntemlerden yararlanılarak her sistem için MTTR hedefi atanır. MTBF değeri ile benzer bir süreç MTTR değeri için de yaşanır. Atanan MTTR değerleri, her sistemin gereksinimlerini içeren Sistem Gereksinim Belgesine eklenir. Böylelikle sistem tasarımcısı ya da alt yükleniciden sağla-

nacak bir sistemse, alt yüklenici firma kendisinden beklenen MTTR hedefini öğrenmiş olur. Gereksinim atanırken uçak seviyesinden başlayıp aşağıya doğru, sisteme hatta sonrasında donanıma kadar inilir.

### 4.4 Sürdürülebilirlik Öngörüsü

Atanmış olan değeri doğrulamak için MTTR hesaplaması yapılması gerekmektedir. MTTR hesaplamasında her bir düzeltici bakım için hazırlık zamanı, hatayı belirleme zamanı, hatalı parçayı söküp yerine yenisini takma zamanı ve onarım sonrası test etme zamanı toplanır. Tüm düzeltici bakımlar için harcanan zaman, onarım sayısına bölünerek MTTR hesaplanır. Bu hesaplama ile ilgili eşitlikler MIL-HDBK-470A[3] askeri el kitabında ayrıntılı olarak anlatılmaktadır.

MTTR hesaplamasında en önemli analiz Bakım Görev Analizidir. Bakım görev analizinde her bir bakım için kaç bakım personeli gerektiği, bakım için gerekli adımlar, her bir aşama için harcanan zaman, bakım sonrası yapılması gereken testler ve onların süreleri ayrıntılı olarak belirtilir. Bu irdeleme, uçağın alıcıya tesliminde, uçakla birlikte verilecek bakım kılavuzları için gerekli olan bilginin çok büyük bir kısmını içermektedir.

## 5. SONUÇ

Bir sözleşmeyle başlanılan uçak tasarım projesinde; Güvenilirlik, Sürdürülebilirlik ve Hazır Bulunuşluk analizlerin yapılarak uçağın güvenilir, sürdürülebilir ve istenilen ölçüde hazır bulunabilir olduğu gösterilmiş olur. Bu analizler yapılmadığında emniyet ve sertifikasyon gereksinimleri doğrulanıp uçağın sertifikaya olup uçuş izni alması mümkün olmadığı gibi bakımı çok pahalı ve sürdürülemez bir uçak tasarımı da ortaya çıkabilir. Bu tür sonuçları yaşamamak için, güvenilirlik ve sürdürülebilirlik mühendisleri, projenin başlangıcından uçak teslimine kadar tüm aşamalarda etkin olarak hem şirket içinde, hem alt yüklenicilerle hem de sertifikasyon otoriteleri ile çalışır.

## KAYNAKÇA

1. MIL-HDBK-338B ELECTRONIC RELIABILITY DESIGN HANDBOOK
2. MIL-STD-2169A PROCEDURES FOR PERFORMING FAILURE MODES EFFECTS AND CRITICALITY ANALYSIS
3. MIL-HDBK-470A DESIGNING AND DEVELOPING MAINTAINABLE PRODUCTS AND SYSTEMS