




# Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

*Araştırma Makalesi*

## Uzay Elektroniklerinde Uygulanan Güvenilirlik Muayene ve Testleri\*

 Barış ÇAL

*TÜBİTAK Uzay Teknolojileri Araştırma Enstitüsü, Ankara, TÜRKİYE*

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: baris.cal@tubitak.gov.tr*

**DOI : 10.29130/dubited.651075**

### ÖZET

Havacılık, uzay ve askeri elektronik uygulamaları ticari elektronik uygulamalarından belirgin yönlerle ayrılırlar. Uzay araçları, fırlatma araçları ve uydular; fırlatmadan yörüngeye yerleştirmeye, hayat döngüsüne kadar yüksek sıcaklık değişimleri, irtifa, vakum, şok ve titreşim gibi çok ağır çevresel koşullar ve yüklere maruz kalmaktadır. Uzay araçları ve uydularda ürün ömrü genellikle 5 ile 15 yıl arası uzun süreler ile ifade edilir. Güvenilirlik, uzay çalışmalarının ayrılmaz ve en kritik basamaklarından biridir. Güvenilirlik, en basit şekilde bir ürünün ya da bileşenin istenen performansı beklenen sürede yerine getirebilme yeteneği olarak tanımlanabilir. Uzay araçlarında kullanılan öğeler yada bileşenlerin (sistem, alt sistem, ekipman ve modüller) doğrulaması için çeşitli uluslararası standartlar mevcuttur. Bu standartlar yeterlilik, kabul ve ön uçuş aşamaları için farklı testleri ya da aynı testi farklı aşama için farklı seviyelerde gerekli kılabilir. Doğrulama işlemleri tahribatlı ve tahribatsız testlerin yanı sıra muhtelif muayeneleri de içerir. Bu muayene ve testler sayesinde öğelerin ya da bileşenlerin hata ve ömür tahminleri yapılabilmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** *Uzay, Elektronik, Güvenilirlik, Test, Muayene*

## Reliability Inspections and Tests Applied in Space Electronics

### ABSTRACT

Aerospace, space and military electronic applications differs from commercial electronic applications in significant aspects. Spacecraft, launch vehicles and satellites; they are subjected to very harsh environmental conditions and loads such as high temperature changes, altitude, vacuum, shock and vibration from launching to orbiting and life cycle. Life of spacecraft and satellites are usually expressed as a long period from 5 to 15 years. Reliability is a major inseparable and critical steps of space studies. Reliability can simply be defined as the ability of a product or component to provide the desired performance within the expected time. There are several international standards for the verification of elements or components (systems, subsystems, equipment and modules) used in space vehicles. These standards may require different tests for qualification, acceptance and pre-flight stages or require same test at different levels for different stages. Verification procedures include destructive and non-destructive tests as well as various inspections. Failure and life predictions of elements or components can be done by the help of these inspections and tests.

**Keywords:** *Space, Electronic, Reliability, Test, Inspection*

Geliş: 26/11/2019, Düzeltme: 01/11/2020, Kabul: 07/11/2020

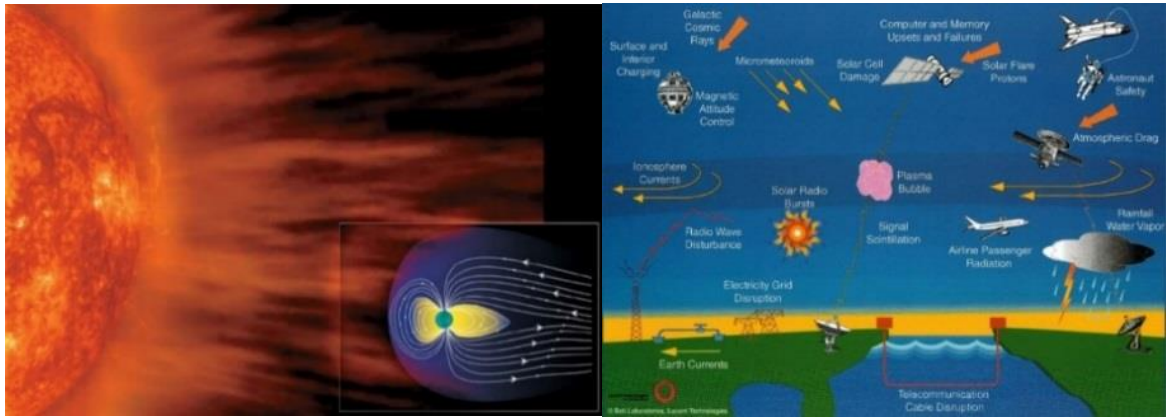
# I. GİRİŞ

Uzay çalışmalarında önemli iki nokta vardır. Bunlardan ilki kullanılan malzemelerin uzayda vakum ve radyasyona maruz kaldıklarında gösterdikleri tepki, ikincisi ise geri dönüşü olmayan bir süreç olduğundan tasarımdan malzeme seçimine, üretime kadar geçen süreçte yüksek güvenilirlik düzeyinin yakalanması gereğidir.

Güvenilirlik; en basit şekilde ürünün ya da bileşenin istenen performansı beklenen sürede yerine getirebilme yeteneği olarak tanımlanabilir. İkinci Dünya Savaşı'ndan önce kelime anlamı çoğunlukla tekrar edilebilirlik ile aynı anlamda kullanılmaktaydı. Güvenilirlik mühendisliğinin modern terimi 1940'lar esnasında Amerikan Ordusu'nun kullanımı ile beraber literatüre girdi ve şu anki halini aldı. Bu terim en başlarda belirli bir periyot içerisinde ve beklendiği şekilde çalışma (şu anda bu özellik için "sistem hazır olabilirliği" terimi kullanılmaktadır) anlamı taşımaktaydı [1]. Güvenilirlik mühendisliğinin ortaya çıkmasında ve kabul görmesinde tarihçesinden anlaşıldığı gibi askeri uygulamaların etkisi çok büyüktür.

Uzay ortamı yüksek vakum, radyasyon ve sıcaklık farklılıkları gibi ağır çevresel koşullara sahiptir. Şekil 1.(a)'da görülen ve saniyede ~ 400 ile ~ 2,500 km hızla esen güneş rüzgarı saniyede bir milyon ton civarı madde taşıyabilmektedir [2]. Uzay havasının, Dünya yüzeyinde ve uzayda yayılan sinyalleri uzay ortamına dağılmış teknik sistemler üzerindeki etkilerinden bazıları Şekil 1.(b)'de görülebilmektedir.

Bu ağır çevresel koşullara yaşam döngüsü boyunca maruz kalacak olan uzay araçları ve uydular için güvenilirlik en önemli kriterlerden bir tanesi olmuştur. Diğer alt sistem ve ekipmanlarda bu ağır çevresel yüklerden etkileniyor olmasına karşın elektronik alt sistem, ekipman ve modüller bu yüklerle karşı daha hassas elemanlardır.



Şekil 1. (a) Saniyede ~ 400 ila ~ 2,500 km hızla esen güneş rüzgarı, (b) Uzay havasının, Dünya yüzeyinde ve uzayda yayılan sinyalleri uzay ortamına dağılmış teknik sistemler üzerindeki etkilerinden bazıları [3]

Ürünlerin test edilmesinin iki temel amacı vardır. Bunlardan birincisi maruz kalınması beklenen çevresel yükler simüle edilmeye çalışılır, test başında ve sonunda yapılan muayeneler ile çevresel yüklerden kaynaklı bir hasar, bozulma, değişim olup olmadığı kontrol edilir, ikincisi maruz kalması beklenen çevresel yüklerin belirgin biçimde üzerinde yükler uygulanılarak ekipman ya da modülün arızalanması ya da performans kaybetmesini sağlamak amaçlanır, bunların sonucu olarakta zayıf noktalar, hata kök sebepleri ve tahmini ömür belirlenmeye çalışılmaktadır.

## **II. MATERYAL VE METOD**

Uzay araçlarında kullanılan öğeler ya da bileşenlerin (sistem, alt sistem, ekipman ve modüller) doğrulaması için çeşitli uluslararası standartlar mevcuttur. Bu standartlar yeterlilik, kabul ve ön uçuş aşamaları için farklı testleri gerekli kılmasının yanı sıra aynı testi farklı aşamalar için farklı seviyelerde gerekli kılabilir. Doğrulama işlemleri tahribatlı ve tahribatsız testleri ve muayeneleri içerir.

### **A. UZAY ARAÇLARI, ÖĞE VE BİLEŞEN TESTLERİ**

Uzay araçlarında kullanılan öğeler ya da bileşenler yeterlilik, kabul ve ön uçuş aşamaları için çeşitli testlere tabi tutulur. Bu testler uzay kesimi ekipman tipleri olan; i.elektronik, elektriksel ve radyo-frekans ekipmanları, ii.anten, iii.batarya, iv.valf, v.sıvı yada itki ekipmanları, vi.basınçlı kap (tank), vii.motor, viii.ısı ekipman, ix.optik ekipman, x.mekanizmalar, xi.güneş enerjisi ekipmanları, xii.güneş panelleri için farklılıklar gösterir [4]. Bazı testler ilgili ekipman için gerekli olabilir, olmayabilir ya da yapıp yapılmayacağı müşteri kararına bağlı olabilir. Ayrıca aynı ekipmanın yeterlilik, kabul, ön uçuş aşamalarından hangisi için yapıldığına bağlı olarak testler gerekli olabilir, olmayabilir ya da yapıp yapılmayacağı müşteri kararına bağlı olabilir. Yer ve uzay segmenti öge ve bileşenlerinin testleri aşağıdaki şekilde sınıflandırılmaktadır.

#### **A.1. Genel Testler**

Genel testler dört temel testten oluşmakta olup bunlar; işlevsel ve performans testleri, nem testi, ömür testi ve çalışma hazırlığı testidir. Bu testlerden işlevsel ve performans testleri elektronik ekipman ve modüllerde hem yeterlilik hem de uçuş aşamaları için zorunlu testlerdir. Çalışma hazırlığı testi yeterlilik ve kabul aşamaları için yapıp yapılmayacağı müşteri kararına bağlı olan testtir. Diğer iki test ise yeterlilik aşaması için yapıp yapılmayacağı müşteri kararına bağlı olan, kabul aşaması için gerekli olmayan testlerdir.

#### **A.2. Mekanik Testler**

Mekanik testler on temel testten oluşmakta olup bunlar; fiziksel özelliklerin ölçümleri, ivmelenme testleri (statik yük testi, döndürme testi, değişken durum testi), rastgele titreşim testi, akustik testi, sinüs biçimli titreşim testi, şok testi, mikro titreşim testleri (çevresel etki ve duyarlılık) testleridir. Bu testlerden fiziksel özelliklerin ölçümleri ve rastgele titreşim testi elektronik ekipman ve modüllerde hem yeterlilik hem de uçuş aşamaları için zorunlu testlerdir. Sinüs biçimli titreşim testi ve şok testinde yeterlilik aşaması için zorunlu olan, kabul aşaması için ise gerekli olmayan testlerdir. Akustik testi yeterlilik ve kabul aşamaları için gerekli olmayan testtir. Kalan testler ise yeterlilik aşaması için yapıp yapılmayacağı müşteri kararına bağlı olan, kabul aşaması için gerekli olmayan testlerdir.

#### **A.3. Yapısal Bütünlük Testleri**

Yapısal bütünlük testleri beş temel testten oluşmakta olup bunlar; sızıntı (bazı kaynaklarda sızdırmazlık olarak geçmekte) testi, ispat (proof) testi, basınç döngü testi, tasarım patlatma basıncı testi, patlatma testleridir. Bu testlerden elektronik ekipman ve modüllerde yeterlilik ve uçuş aşamaları için zorunlu olan yoktur. Sadece sızıntı testinde yeterlilik ve kabul aşamaları için yapıp yapılmayacağı müşteri kararına bağlıdır. Kalan testler ise yeterlilik aşaması için yapıp yapılmayacağı müşteri kararına bağlı olan, kabul aşaması için gerekli olmayan testlerdir.

#### **A.4. Isıl Testler**

Isıl testler iki temel testten oluşmakta olup bunlar; ısı vakum ve ısı ortam testleridir. Bu testlerden her ikisi de elektronik ekipman ve modüllerde yeterlilik ve uçuş aşamaları için zorunlu olan testlerdir.

## A.5. Elektriksel / Radyo Frekans Testleri

Elektriksel/Radyo frekans testleri altı temel testten oluşmakta olup bunlar; elektromanyetik uyumluluk testi, manyetik test, elektrostatik deşarj/boşalım testi, pasif çapraz bindirme testi, doğrusal olmayan elektriksel atlama testi, elektrik ve ark deşarj/boşalım testleridir. Bu testlerden elektromanyetik uyumluluk ile elektrik ve ark deşarj/boşalım testleri elektronik ekipman ve modüllerde yeterlilik ve uçuş aşamaları için zorunlu olan testlerdir. Elektrostatik deşarj/boşalma testi yeterlilik aşaması için zorunlu iken kabul aşaması için gerekli olmayan testtir. Kalan testler ise yeterlilik ve kabul aşamaları için yapıp yapılmayacağı müşteri kararına bağlı olan testlerdir.

## A.6. Göreve Özgü Testler

Göreve özgü test; duyulabilir gürültü testidir ve elektronik ekipman ve modüllerde yeterlilik ve uçuş aşamaları için zorunlu olan testtir [4].

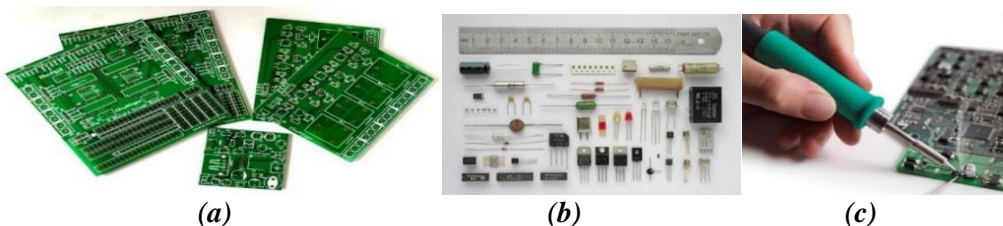
## B. UZAY ELEKTRONİĞİNDE UYGULANAN TEST VE MUAYENE YÖNTEMLERİ

Uzay araçlarında kullanılan öğeler ya da bileşenlerin; sistem, alt sistem ve ekipman seviyesi için ısıl vakum, elektriksel ark boşalım vs. zorunlu testler uygulanır iken elektronik kart doğrulama ve yeterlilik testleri farklılık göstermektedir. Elektronik kartlara özgü muayene ve testler sonucu doğrulanan ve yeterliliği tespit edilen kartlar içinde kullanılacakları ekipman, alt sistem ve sistemler ile uzay standartlarının zorunlu kıldığı Uzay Araçları, Öge ve Bileşen Testlerine de tabi tutulacaktır.

Uzay elektroniği; uzay ortamında beklenen sürede beklenen performans düzeyinde çalışabilen elektronik devre ve devreyi oluşturan elemanlar şeklinde tanımlanabilir. Elektronik devreler; Şekil 2.'de görüldüğü gibi (a) baskılı devre kartı (BDK), (b) elektronik devre elemanı ya da bileşeni ve bu ikisini birleştirmekte kullanılan (c) lehimden oluşur. Hali ile testler ve muayeneler hem baskılı devre kartı, hem devre elemanı hem de devre elemanı döşenmiş elektronik devre üzerinde gerçekleştirilir. Modül ya da ekipman güvenilirliği öncelikli bir ister olduğu için elektronik devrenin muayene ve testleri ön plandadır.

Muayene yöntemleri tahribatlı ve tahribatsız yöntemler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Tahribatsız yöntemlere görsel ve X-ışını muayeneleri örnek verilebilirken tahribatlı yöntemlere mikro kesit ve boya nüfuz muayeneleri örnek verilebilir. Tahribatlı muayene yöntemlerinin son ürünün kalite doğrulaması için değilde ancak işlem ya da sürecin yeterliliğini belirlemede kullanılabilir olduğu aşikardır [5].

Baskılı devre kartları; görsel muayeneden, ısıl ve mekanik testlere, sonlandırma işlemlerinden lehimlenebilirliğe onlarca test ve muayeneden geçirilebilir [6] ancak bunların çoğunluğu kart tasarım ve üretimi ile ilgili testler olduğundan üreticilerden yapılması beklenenecek ya da talep edilecek test ve muayenelerdir. Elektronik devre elemanı ya da bileşeni içinde benzer bir durum geçerlidir. Uzay çalışmalarındaki yüksek güvenilirlik ihtiyacı dolayısı ile kullanılan devre elemanları çoğunlukla tarihçeye sahip, bilinen uzay enstitüleri ve kurumlarınca onaylanmış devre elemanlarından seçilmektedir. Kritik olan nokta, belirli bir geçmişe ve güvenilirliğe sahip kart ile devre elemanlarının yine güvenilir biçimde birleştirilmesi yani lehimlenmesi ve giriş kalite muayenesinden montajı tamamlanmış kartların testlerine ve muayenelerine kadar bir dizi işlemle bu sürecin doğrulanmasıdır.



Şekil 2. (a) Boş baskılı devre kartı, (b) Elektronik devre elemanı/bileşeni, (c) Lehimleme işlemi

Uzay elektronikğinde uygulanan güvenilirlik muayene ve testleri; görsel, stereo mikroskop, X-ışını muayeneleri ve ısı döngü, titreşim testleri gibi bazı ana test ve muayenelerin yanı sıra müşteri tarafından talep edilen ve tanımlanan muayene ve testleri de içerebilir. Bu muayene ve testler sayesinde öge ya da bileşenin hata tahminleri ve ömür tahminleri yapılabilmekle birlikte uydulardan haliyle uydularda kullanılan elektronik devrelerden beklenen ömür 5 ile 15 yıl arası uzun kabul edilen bir süre olduğundan hata analizleri ve ömür tahminleri ancak Hızlandırılmış Testler çoğunlukla da Yüksel Derecede Hızlandırılmış Ömür Testleri ile mümkündür.

## B.1. Görsel Muayene

Lehimlenen ve montajı yapılan her bileşen görsel muayeneye tabi tutulmalıdır [7]. Görsel muayeneler çıplak gözle (Şekil 3.(a)) ve mikroskop ya da benzeri görüntü büyütme yeteneğine sahip ekipmanlar (Şekil 3.(b)) ile gerçekleştirilmekte olup çıplak göz ile ancak fiziksel karakteristik, belirgin hata ve anormallikler tespit edilmektedir. Standart ve dokümanların pek çoğu görsel muayenenin, bağlantı noktasına bağlı olarak 4X ile 10X büyütme yapabilen mikroskop ya da benzeri ekipmanlarla yapılmasını ancak bunun yanı sıra şüpheli anormallikler ve kusurların çözümlemesinde daha yüksek büyütme oranlarında kullanılmasını zorunlu tutar ya da tavsiye eder.

NASA-STD-8739-2 standardı 8.8 numaralı maddesine göre elektronik bileşenlerin lehimleme öncesinde yerleşim ve hizalama muayenelerinin 4X ile 10X büyütme ile yapılması gerekirken, standardın 12 numaralı maddesine göre de lehim bağlantılarının bası ya da yüzey genişliklerine göre 4X ile 45X arasında büyütme yapılarak muayene edilmesi gerekmektedir [8].



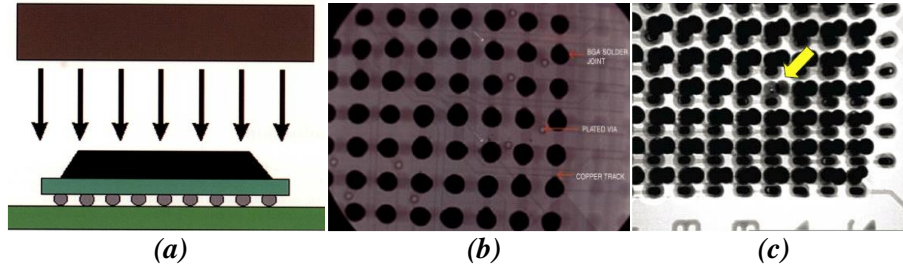
Şekil 3. (a) Çıplak gözle görsel elektronik devre muayenesi, (b) Mikroskop ve büyüteç ile BDK muayenesi

## B.2. X-ışın Muayenesi

X-ışın muayenesi; genel anlamda saklı kalmış ya da saklanmış hedef bir cisim ya da ürünün şekil yahut biçimlerini görüntülemek amacı ile kullanılan bir teknolojidir. Temel olarak X-ışın kaynağı ile yansıyan ve iletilen ışınları algılayan dedektörden oluşan bir dizedir (Şekil 4.(a)).

Elektronikte ise BGA gibi görsel muayenesi zor olan alan dizinli yapıların lehim bağlantılarının muayenesinde en işe yarayan tahribatsız muayene yöntemi X-ışını yöntemidir. X-ışını yöntemi iki ana gruba ayrılabilir. Bunlar; aktarım ve kesitalan (laminografi) X-ışını teknikleridir.

Şekil 4.(b) ve (c) de görülen eksik lehim topları ve kolonları, lehimlenmemiş lehim topları ya da elektronik köprüler X-ışını yöntemi ile kolaylıkla tespit edilebilir. Bunun yanı sıra lehim pastasındaki yetersiz yeniden akışın ve açık bağlantıların tespiti daha zor olmakla birlikte farklı açılardan yapılan X-ışın muayenesi bunun mümkün kılmaktadır [5]. Bunlar dışında BDK iç yapısı, bakır kaplı delikler, lehim içi boşluklar, ergimemiş toplar ve lehim bağlantı noktalarındaki diğer anormalliklerde X-ışını muayene yöntemi ile tespit edilebilen kusurlardır.



**Şekil 4.** (a) X-ışını muayene sisteminin basitleştirilmiş gösterimi [9], (b) Lehimlenmiş BGA'in X-ışını görüntüsü [9], (c) Lehimlenmiş kolon ızgara dizini X-ışını muayenesinde tespit edilen eksik kolon [5]

### B.3. Temizlilik Testi

Elektronik kartlarda temizlilik; döşenmiş ve döşenmemiş BDKların temizlenmesindeki birincil amaç lehimle esnasında kullanılan reçine ve lehim pastası atıkları ile taşıma ve nakliye esnasında oluşabilen kalıntı ve atıkların uzaklaştırılmasıdır. Elektronik alanı için temizlilik özellikle döşenmiş BDKların orta ve uzun vade için kart performansını, ömrünü ve kalitesini doğrudan etkileyebilen bir etkidir.

Amaca yönelik farklı temizlilik test yöntemleri olmasına karşın uzay çalışmaları için tavsiye edilen iki yöntem vardır. Bunlar; test çözeltilisinin elektriksel iletkenliği ve sodyum klorür (NaCl) tuzu eşdeğer iyonik kirlilik testidir.

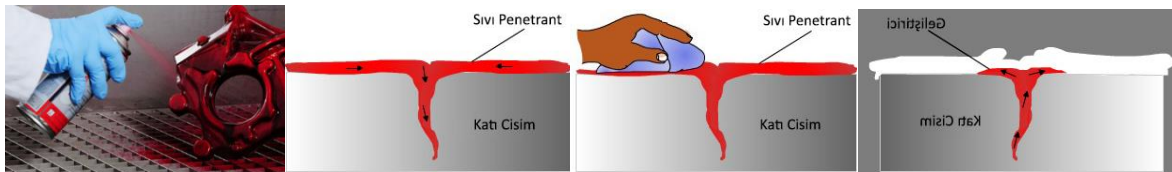
Yapılan yıkama ya da temizlik yönteminin BDK ve komponentlerde ne kadar etkili olduğu sodyum klorür (NaCl) eşdeğer iyonik kirlilik testi ile test edilmelidir [7].

### B.4. Kesit Alan / Mikrokisit Muayenesi

Elektronik kartların doğrulaması amacı ile gerçekleştirilen kesit alan muayenesi bir tahribatlı muayene yöntemidir. Kesit alan muayenesinde; BDK'ların belirlenmiş bölgelerinden kesilerek alınan numuneler, lamine edilmiş yapıyı ve delik içi kaplama, lehim bağlantıları, lehim köprüleri vs. kaplanmış yapının kalitesini değerlendirmek amacı ile kullanılır. Kaplama yapılmış yapılar; uygulanabilir ya da istenen performans gereklerine uygunluğu belirlemek amacıyla numune hazırlanıp muayene edilmek suretiyle değerlendirilebilir [10].

### B.5. Boya Nüfuz (Dye Penetrant) Muayenesi

Boya nüfuz muayenesi Şekil 5.'te görüldüğü gibi farklı aşamalar içermektedir ki bunlar; yüzey hazırlığı, boya (penetrant) uygulaması, boya bekleme süresi, aşırı boyanın temizlenmesi, geliştirici uygulaması, belirtileri geliştirme, muayene ve yüzey temizleme aşamalarıdır.



**Şekil 5.** Boya nüfuz muayenesinin muayene öncesi hazırlanma aşamaları

### B.6. Isıl Döngü Testi

Isıl döngü testinin amacı BDK, elektronik bileşen ve lehim bağlantılarının çok yüksek ve düşük sıcaklıklara dayanma yeteneğini belirlemenin yanı sıra aynı zamanda uç sıcaklık döngülerine dayanma yeteneklerini de görmektir. Isıl döngü ile oluşan mekanik gerilmelerin sonucunda test edilen üründe oluşan kalıcı fiziksel değişiklikler ürünün orta ve uzun dönem güvenilirliğini etkilemektedir. BDK hammaddesi, lehim ve elektronik bileşen malzemelerinin ısıl uyumsuzluğu lehim bağlantı çatlakları,

bileşen bacaklarında hasarlar gibi hasarlara ve arızalara neden olabilir. Özellikle ısıl genleşme katsayısı 4-8 ppm/°C gibi düşük değerlerde olan seramik kapasitörler ya da sızdırmaz seramik paketlerin 15-18 ppm/°C olan BDK'lara [11] montajı ve bu bağlantıyı sağlayacak lehim alaşımının seçimi çok önemlidir. Ayrıca tasarım aşamasında elektronik devreyi oluşturan bileşenlerin yaşam döngüsü boyunca karşılaçağı yükler göz önüne alınarak ısıl döngü test aralığı ve döngü sayısı doğru belirlenmelidir.

## **B.7. Titreşim Testi**

Titreşim testinin amacı BDK, elektronik bileşen ve lehim bağlantılarına belirlenmiş frekans aralıklarındaki titreşimlerin etkisini değerlendirmektir. Ürünler, belirlenmiş test koşulları doğrultusunda süre, frekans aralığı, dalga şekli ve genliği gibi kriterlerde test edilir.

## **C. GÜVENİLİRLİK VE UZAY ELEKTRONİĞİNDE UYGULANAN GÜVENİLİRLİK TEST VE MUAYENE YÖNTEMLERİ**

### **C.1. Güvenilirlik**

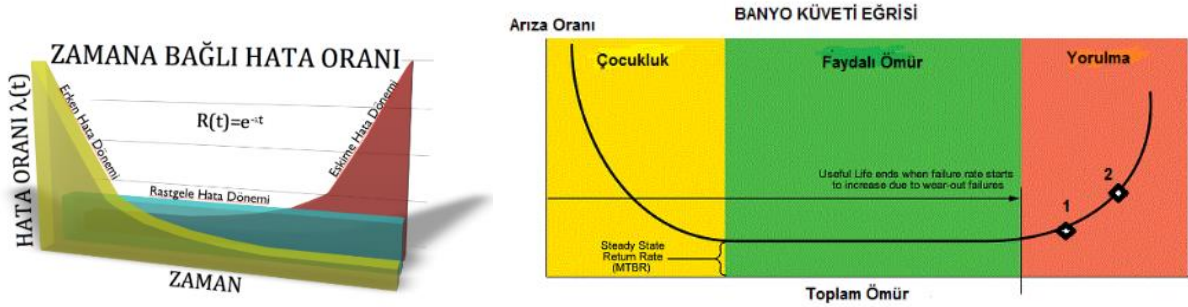
Güvenilirlik; bir sistemin belirlenen koşullar altında belirli bir zaman periyodu içinde istenilen fonksiyonları gerçekleştirecek şekilde çalışma olasılığıdır. Güvenilirliğin en yalın tanımı bir ürünün zaman içindeki performansdır. Güvenilirlik analizi; ürünün tüm ömür süreci göz önünde bulundurularak yapılan performans değerlendirmesi olarak tanımlanır.

Güvenilirlik, ürünün tasarımdan bakım, test ve destek süreçleri de dahil olmak üzere tüm ömür süreci içinde değerlendirilmesi ile sağlanır. Sistem mimarisinden, kullanılan materyallere, işlemlere ve parçalara kadar yapılan seçimlerin analiz ve testinin yapılması güvenilirlik açısından önem taşımaktadır.

Hata; bir sistemin istenen fonksiyonu yerine getirememesi durumudur. Güvenilirlik için en belirleyici kriter, ürünün ne sıklıkla hata verdiği [12]. Ürün güvenilirliği tamir edilebilir ürünler için “hatalar arasındaki ortalama zaman” ve tamiri mümkün olmayan ürünler için “hata için ortalama süre” değerleri ile hesaplanabilir [13].

Güvenilirlik değerlendirmesi; sıcaklık, titreşim, gerilim (stress) ve hızlandırılmış ömür analizleri vasıtası ile yapılmaktadır. Sistemin üretiminden taşınmasına ve kullanım ömrü sonuna kadar bir gerilim hesaplanması yapılır. Bu gerilim koşullarında ürünün ömrü hesaplanır. “Hatalar arasındaki ortalama zaman” veya “hata için ortalama süre” gibi hata zaman parametreleri belirlenir. Hızlandırma faktörleri, güvenilirlik değerlendirmesinin belirleyici unsurlarıdır.

Yapılan analizler ve ömür tahminleri sonrasında elde edilen veriler doğrultusunda ürünün ömrü “Banyo küveti eğrisi (Bathtub Curve)” olarak adlandırılan bir eğri ile karakterize edilmektedir (Şekil 6.). Bu eğri zamana bağlı hata oranını göstermek için kullanılan en yaygın yöntemdir [14]. Banyo Küveti eğrisi üç periyottan oluşur; bunlardan ilki düşen hata oranına sahip “Erken Hata Dönemi/Çocukluk” evresi, ikincisi düşük ve aşağı yukarı sabit hata oranına sahip “Rastgele Hata/Faydalı Ömür” evresi ve son olarakta yükselen hata oranına sahip “Eskime Hata Dönemi/Yorulma” evresidir.



Şekil 6. Banyo küveti eğrisi (Bathtub curve)

## C.2. Elektronik Kartlarda Güvenilirlik

Elektronik kartlar kullanım ömür süreci içerisinde çeşitli yıpratıcı etkilere maruz kalmaktadır. Bunlardan en yaygın ve etkin olan bazıları; sıcaklık ve nem değişimleri, titreşim ve çarpma, açma/kapama ani voltaj değişimleri, basınç değişimleri, solar, kozmik radyasyon, kimyasallardır. Elektronik kartların güvenilirliğinde önemli noktalardan bir tanesi lehimleme sürecinin güvenilirliğidir. Lehim bağlantıları genellikle, kullanım sürecindeki yıpratıcı streslerin etkilediği ve kart arızasına neden olan ilk hata bölgeleridir. Basit bir süreç gibi gözükse de lehimleme işlemi, orta ve uzun vadede kart işlevselliğini etkileyen çok önemli bir süreçtir. Lehimleme süreci oluşturulurken, lehim bağlantı güvenilirliğini etkileyebilecek bütün kriter ve aşamalar göz önüne alınmalıdır ki bunlar; kart tasarımı, elektronik bileşen seçimi, lehim türü seçimi, lehimleme yöntemi ve ekipman-cihazları, temizlik, tamir ya da onarımdır [15].

## C.3. Lehim Güvenilirlik Testleri ve Muayeneleri

Lehim güvenilirlik testleri, elektronik kartın kullanım ömrü süresince tabi kalacağı ortam koşullarına uygunluğunu ve dayanıklılığını saptama testleridir. Bu testleri iki ana başlıkta toplayabiliriz; hızlandırılmış testler ve çevresel testler. Çevresel testler ürünü doğrulama ve kabul amacı ile ürünün yaşam döngüsünde maruz kalacağı yüklerde ve gerilimlerde yapılır. Uzay elektroniğinde güvenilirlik analizi için gerekli verilerin elde edilebileceği testler ise hızlandırılmış testlerdir ki bunlarda temelde ısıl döngü ve titreşim testleridir.

### C.3.1. Hızlandırılmış Testler

Ürünün gerçek kullanım ömrü boyunca ortaya çıkarabileceği hata mekanizması ve türlerini kısa bir sürede göstermesi amacını taşımaktadır. Ürünün daha kısa sürede arızalanmasını sağlamak için laboratuvar şartlarında temsili bir ortamda ancak ürünün hayat döngüsü boyunca maruz kalacağından çok daha ağır yüklerde yapılan testlerdir. Hızlandırılmış testte ürün, normal kullanım şartlarında arızalandığı zayıf noktadan ancak daha kısa sürede arızalanmalıdır.

Hata sonuçları ürün tasarımı, geliştirmesi işlemleri ve güvenilirlik değerlendirmeleri açısından önemlidir. Bu tür testlerde amaç; hata türünü keşfetmek (yanlış, hatalı gitmesi muhtemeli gözlemlenmek) ve normal şartlardaki çalışma ömrünü tahmin etmektir. Hızlandırılmış testler güvenilirlik bilgisini ve seviyesini elde etme maliyet ve süresini ciddi biçimde azaltmaktadır. Hızlandırılmış testler ürüne nicel ve nitel olarak uygulanabilir.

**Nitel Testler:** Tasarım aşamasında uygulanır. Yaşam döngüsündeki yüklerden daha yüksek yükler uygulanır. Eğer kuvvetler yanlış hesaplanır ise ürün gerçek hayat döngüsündeki hata kök nedeni dışında bir nedenden arızalanabilir ve bu nedenle yanıltıcı bir güvenilirlik ve ömür tahminine neden olabilir.

**Nicel Testler:** Kullanım yerine hata oranı, ortalama ömür, tahmini geri dönüş ve garanti maliyetinin hesaplanmasını kapsayan güvenilirlik bilgilerini sağlar. Artan yük ya da kullanım oranı olarak



uygulanır. Bir ürün grubunun yaşam döngüsü grafiksel olarak çoğunlukla Banyo Küveti eğrisi ile ifade edilir.

Normal kullanım koşullarında hiçbir zaman gerçekleşmeyecek hata türlerinin ortaya çıkmaması için uygulanacak yük ya da gerilim seviyeleri çok özel durumlar dışında tasarım aralığı içindedir [16].

### ***C.3.1.1. Yüksek Derecede Hızlandırılmış Ömür Testi***

Yüksek Derecede Hızlandırılmış Ömür Testi ürün güvenilirliğini arttırma amaçlı bir gerilim test metodolojisidir. Bir Yüksek Derecede Hızlandırılmış Ömür Testi prosedüründe; ürünün yaşam döngüsü sırasında beklenenden daha yüksek seviyeye ulaşan çevresel gerilimler ya da yükler uygulanır. Yüksek Derecede Hızlandırılmış Ömür Testinde kullanılan gerilimler tipik olarak sıcak ve soğuk sıcaklıklar, sıcaklık döngüleri, rasgele titreşim, güç sınırlaması ve güç çevrimidir.

Test edilen ürün test sırasında çalışır durumda olmalı ve arızalar için sürekli izlenmelidir. Yüksek gerilim kaynaklı arızalar ortaya çıktıkça, arızanın nedeni belirlenmeli, eğer mümkünse diğer zafiyetlerin bulunması için ürün tamir edilip teste devam edilmelidir.

Yüksek Derecede Hızlandırılmış Ömür Testi çıktıları ile şunlar elde edilebilir; i.Ürün, deneme testine tabi tutulmadan önceki çoklu hata türü, ii.Ürünün çalışma sınırları (bunlar tasarımcının ya da üreticinin belirlediği sınırlar ile kıyaslanabilir), iii.Ürünün tahribat sınırları (ürün işlevselliğini kaybettiği ve kurtarılması ya da onarılmasının mümkün olmadığı sınır değeridir).

## **III. SONUC**

Isıl döngü ve titreşim testleri ağırlıklı olarak ürünü doğrulama ve yeterliliğinin tespiti amacı ile gerçekleştirilir. Doğrulama ve yeterlilik testlerinde ürünün yaşam döngüsü ya da normal çalışma şartlarında maruz kalması öngörülen yük ya da gerilimler uygulanır. Bu testlerde hata oranı, ömür tahmini gibi bilgileri elde edecek bir veri elde edilmez.

Önceki bölümde ifade edildiği üzere, güvenilirlikte hata oranı ve ömür tahmini yapılabilmesi için “hatalar arasındaki ortalama zaman” ve “hata için ortalama süre” değerlerine ihtiyaç vardır. Özellikle ömrü uzun kabul edilebilecek ürünlerde bu değerlerin elde edilmesi için en doğru test yöntemi hızlandırılmış çevresel ve işlevsel testlerdir.

Elektronik devrelerin ömür süreleri olarak tanımlanan uzun yıllar boyunca maruz kalması beklenen ya da hesaplanan kullanım sürelerinde ve gerilim ya da yüklerde test edilmesi hem yüksek maliyetli hem de süre olarak kabul edilebilir sürelerin çok üzerindedir. Şöyle ki kullanım ömrü on ile onbeş yıl olarak hesaplanan ancak yeni modeli beş ile on sene içinde piyasaya sürülecek bir elektronik ürünün testlerinin ömür süresinde yapılması teknolojik ve ticari olarak anlamlı değildir. Özellikle uzay, havacılık, askeri, sağlık gibi kritik teknolojiler için ürün güvenilirliğini tasarım aşamasında mümkün olduğu kadar erken doğrulamak gerçekçi yaklaşım olacaktır.

Asgari beş yıl ömür biçilen bir uydu elektronik devresinin ömrü boyunca günde bir defa otuz dakika çalışması planlanmasına karşın altmış dakika süre ile günde oniki defa çalıştırılması şeklinde test edilebilir. Ayrıca ömrü boyunca maruz kalacağı ısıl, titreşim, radyasyon vs. yüklerin daha üzerinde Hızlandırılmış Ömür testleri hatta ömür ve kullanım süresi göz önüne alınıp artarak uygulanan daha yüksek yüklerin uygulandığı Yüksek Derecede Hızlandırılmış Ömür Testleri vasıtası ile testler hızlandırılıp ömür ve hata tahminleri daha kısa sürelerde yapılabilmektedir.

Uzay alanında elektronik bileşenlerin BDK' ya lehimlenmesi ya da montajı konusunda yayınlanmış uzay kurum ve kuruluşlarına ait standart ya da prosedürlerde lehim yada montaj işlemlerinin doğrulama ya da kabul muayene ve testleri; görsel-optik muayene, X-ışını muayenesi, temizlik testi,

kesit alan muayenesi, boya nüfuz muayenesi, titreşim testi ve ısıl döngü testleridir. Isıl döngü ve titreşim testlerinin hızlandırılmış testler olarak uygulanması ve bu testlerden elde edilen sonuçlar özellikle uzay elektroniği için öncelikli öneme sahip tasarım güvenilirliği açısından önemlidir. Bu testler öncesinde ve sonrasında lehim bağlantıları, BDK ve bileşenler üzerinde yapılan görsel-optik muayene, X-ışını muayenesi ve kesit alan muayeneleri de hatanın kök sebebinin doğru tespiti ve hatanın ortadan kaldırılması için alınacak tedbirlerin belirlenmesi açısından önem arz etmektedir.

## **IV. KAYNAKLAR**

- [1] Wikipedia. (2019, Oct. 06). *Reliability engineering* [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Reliability\\_engineering](https://en.wikipedia.org/wiki/Reliability_engineering).
- [2] P.K. Marhavidas, "The space environment and its impact on human activity," *RECORDER Official Publication of Canadian Society of Exploration Geophysicists*, vol. 29, no. 10, pp. 41-50, 2004.
- [3] L.J. Lanzerotti, "Space weather effects on technologies," in *Geophysical Monograph Series*, USA: American Geophysical Union, 2001, ch. Space Weather, pp. 11-22.
- [4] *Space Segment Equipment Test Requirements*, ECSS-E-ST-10-03C, 2012.
- [5] *High-Reliability Soldering For Surface-Mount And Mixed Technology*, ECSS-Q-ST-70-38C, 2018.
- [6] A. Peiravi, "Testing and reliability improvement of high reliability consumer electronics products manufactured on printed circuit boards," *Journal of American Science*, vol. 5, no. 3, pp. 95-105, 2009.
- [7] *Manual Soldering Of High-Reliability Electrical Connections*, ECSS-Q-ST-70-08C, 2009.
- [8] *Workmanship Standard For Surface Mount Technology*, NASA-STD-8739.2, 1999.
- [9] M. Wickham, C. Hunt, B.D. Dunn, D.M. Adams, "An investigation into ball grid array inspection techniques," Noordwijk, The Netherlands: ESA-STM-261, 1999.
- [10] *Microsectioning, Manual and Semi or Automatic Method*, IPC-TM-650 Section 2.1.1, 2015.
- [11] L.J. Turbini, "Processing and material issues related to lead-free soldering," in *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, S.O. Kasap, Eds. New York, NY, USA: Springer, 2007, pp. 147-154.
- [12] İ. Baylakoğlu, "Güvenilirlik altyapısı ve güvenilirlik mühendisliği," unpublished.
- [13] G. Sharon, C. Tulkoff, "Temperature cycling and fatigue in electronics," presented at SMTAI 2014 Conference, Illinois, USA, 2014.
- [14] K. Üçüncü, (2013,Nisan). *Güvenilirlik merkezli bakım (GMB)* [Online]. Available: <http://www.İsteguvenlik.tc/GuvenilirlikMerkezliBakimMAKALE.pdf>.
- [15] İ. Baylakoğlu, U.C. Sarıkaya, M.Gürün, "Elektronik kartların yüksek güvenilirlik için lehimleme süreci," Savunma Sanayi Kongresi (SAVTEK)'inde sunuldu, Ankara, Türkiye, 2010.
- [16] B. Demirbilek, "Çevresel ve hızlandırılmış testler," unpublished.