

BASKI DEVRE KART ELEMANLARININ MEKANİK YORULMA VE HASSASİYET ANALİZLERİ

Mehmet ÇELİK ve Cem GENÇ

Mekanik Analiz ve Test Birimi, ASELSAN A.Ş, REHİS-PEMM, 06172, Ankara
mcelik@aselsan.com.tr, genc@aselsan.com.tr

(Geliş/Received: 24.07.2008 ; Kabul/Accepted: 08.02.2010)

ÖZET

Dinamik yükler altında çalışmakta olan yapılarda yorulma hasarlarının oluşması mühendislik uygulamalarında sıklıkla görülmektedir. Askeri uygulamalarda kullanılmakta olan elektronik donanımların sert çalışma koşullarına dayanması gerekmektedir. Bu tip ekipmanların dayanıklılığı içerlerinde bulunan hassas elektronik parçaların dayanıklılığına bağlıdır. Geleneksel olarak, sağlamlaştırılmamış hazır ticari ürünler (HTÜ) bulduran donanımların titreşim yüklerinden korunması titreşim-şok izolatörleri ile sağlanmaktadır. Ancak titreşim izolatörlerinin birtakım dezavantajları bulunmaktadır. Birçok hasar mekanik bağlantılarda, örneğin lehimlerde ve malzeme bacaklarında ortaya çıktığı için bu çalışmada hassas elektronik parçaların baskı devre kart seviyesinde sağlamlaştırılması incelenmiştir. Bu kapsamda baskı devre kartlar üzerine monte edilen eksenel bacaklı alüminyum kapasitörlerde titreşim kaynaklı yorulmaya bağlı oluşan hasarlar analiz edilmiştir. Basamaklandırılmış Gerilme Test (BGT) yöntemi kullanılarak malzemelerin hızlandırılmış ömür testleriyle dayanımları elde edilmiş ve bu değerler sayısal analizlerde girdi olarak kullanılmıştır. Baskı devre kartlara ait çeşitli özelliklerin değiştirilmesi ile yorulma ömrünün nasıl etkilendiğini görmek için örnek bir eksenel bacaklı kapasitör için hassasiyet analizleri yapılmıştır. Ayrıca, elektronik paketlemede özellikle yaygın bir yöntem olarak kullanılmakta olan ekobond (eccobond) ve silikon ile sağlamlaştırma yöntemlerinin elektronik malzemelerin yorulma ömrü üzerine olan etkileri de incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Titreşim kaynaklı yorulma, hasar, baskı devre kart, hızlandırılmış ömür testi, hassasiyet analizi.

MECHANICAL FATIGUE AND SENSITIVITY STUDY OF A PRINTED CIRCUIT BOARD COMPONENT

ABSTRACT

Fatigue failure of structures operating under dynamic loadings is widely seen in engineering applications. Electronic equipment, which is widely used in military applications, must be able to survive harsh environments. The endurance of such equipment is defined by the durability of their internal sensitive components. Traditionally, vibration isolation of equipment having commercial of-the-shelf (COTS) electronics is achieved by means of vibration-shock isolators. However, the use of such vibration isolators has some disadvantages. Since most failures occur at mechanical joints such as solder joints and lead wires, ruggedization of sensitive electronic components mounted on PCB's are investigated in this study. Therefore vibration induced fatigue life analysis of an axial leaded aluminum capacitor is performed. Using Step Stress Testing method (SST) component fatigue capabilities, which are used as inputs in further numerical analysis, are obtained. Furthermore, sensitivity analysis for axial leaded capacitor is done in order to focus on the influence of some design parameters on the fatigue life. Finally, the effect of well-known ruggedization techniques in electronic industry like eccobond and silicone reinforcement on the fatigue life of the component is examined.

Keywords: Vibration fatigue, failure, printed circuit boards, accelerated life testing, sensitivity study.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Askeri cihaz üretici firmalar zor çevre koşulları altında çalışabilecek, ticari baskı devre kartlar ve bunlar üzerinde problemsiz kullanılacak ticari elektronik malzemeler bulduran sistemleri geliştirmek zorunda kalmaktadır. Çalışma şartları altında titreşim araziden, elektronik sistemlerin üzerinde buldukları platformların motorlarından, mühimmat atımı, yapısal rezonanslar vb. nedenlerden kaynaklanabilmektedir. Bu durumda, hedef sisteme aktarılan enerjinin aktığı hat boyunca, sistemi koruyacak titreşim izolatörlerinin bulunması ve/veya bu hattın hedef sistemin kütle ve direngenliğinin eniyilmesi sağlanarak değiştirilmesi gerekmektedir. Sürekli geliştirilmelerine karşılık hazır ticari ürünler (HTÜ) bazen zor çevre koşullarında çalışabilecek sağlamlığa sahip olamamaktadır. HTÜ'lerin tipik ömür süreleri 7-10 yıl kadar iken bunların askeri sürümlerinin ömrü yaklaşık 20 yıl kadardır. Sağlamlaştırılmamış hazır ticari baskı devre kartlara titreşim yalıtım prensiplerini uygulamak için önemli çalışmalar yapılmaktadır [1]. Genel olarak cihazlar, iç ve/veya dış şok-titreşim izolatörleri kullanımı ile sağlamlaştırılmaktadır [2].

Titreşim izolatörleri üreticileri tarafından savunulan yaygın bir görüş, elektronik cihazların yeterli bir biçimde korunması için tek çözümün yüksek sönümlemeli izolatörler kullanmak olduğudur. Ancak titreşim izolatörü kullanmanın, izolatör rezonans frekansının rastsal titreşim yüklemesinin baskın tahrik frekansı ile çakışma ihtimali, sınırlı kullanılabilen alan, yüksek maliyet ve sınırlı servis ömrü vb. gibi dezavantajları vardır. Tipik olarak, uzun izolatör ömrü için izolatörün pahalı malzemeden üretilmesi ve nispeten büyük olması gerekmektedir [3]. Hassas elektronik malzemelerin tipik rezonans frekansları rastsal titreşimin yüksek frekans bandında yer almaktadır. Bu frekans bandını sönümlemekte zayıf kalan titreşim izolatörleri hasarsız bir titreşim çalışma koşulu sağlamakta yetersiz kalmaktadır. Bu çalışmanın amacı baskı devre kartları titreşim izolatörleri kullanmadan, herhangi bir mukavemet amaçlı yapıştırıcı kullanmadan sağlamlaştırılacak bir yöntem geliştirmektir. Son yıllarda uluslararası askeri sistem üreten firmaların bu konularda araştırma çalışmalarına büyük bütçeler ayırdıkları bilinmektedir. Sağlamlaştırma yapıldıktan sonra aynı operasyonel fonksiyonu yerine getiren ve güvenilirlik kriterlerini sağlayan bir ürünün fiyatı 10 kat civarında artış gösterebilmektedir.

Baskı devre kart yapısal tasarımında kartın sert koşullar altında sorunsuz çalışma başarısı gösterebilmesi için kart üzerine etki eden yüklerin öncelikle tespit edilmesi gerekmektedir. Baskı devre kartların hasar görmesine neden olan yüklerin başında ısı yükleri gelmektedir. Bununla birlikte elektronik malzemeler ısı gerilmelerinin yanı sıra çoğu zaman taşıma ve operasyonel koşullarda dinamik yüklere de

maruz kalmaktadır. Bu özellikle otomotiv, askeri ve ticari aviyonik sistemler için önem taşımaktadır. Bu kapsamda dinamik yükler, elektronik malzeme bacalarında yüksek genlikli dinamik gerilmeler oluşturmakta ve yorulma hasarına neden olmaktadır. Elektronik parçanın geometrik boyutları, malzeme özellikleri vb. faktörler malzemenin dayanımını etkilemektedir. Ayrıca, malzeme dayanımındaki dağılım aynı malzeme içinde ve farklı malzemeler arasında da beklenen bir durumdur.

Elektronik malzemelerde rastsal titreşim altında görülen hasarlar çoğu zaman baskı devre kartın eğilmesinden (kapasitör ve resistörlerin genellikle bacalarından ve/veya lehim yerlerinin bükülmesinden) kaynaklanmaktadır. Bu tip hasarlar malzemenin gövdesi, bacaları ve baskı devre kart arasındaki bağıll hareketten kaynaklanmaktadır [4].

Bağıll hareket rezonans durumunda en şiddetli olmaktadır. Eğer gerilme seviyeleri yeterince yüksek genlikli ve yükün etki süresi (uygulanan döngü sayısı) yeterince uzun ise malzeme bacalarında ve/veya lehimlerde yorulma hasarı görülebilmektedir. Ancak malzeme kart üzerine yapıştırılırsa bağıll hareket azalmakta ve malzeme bacalarının ve lehimlerin yorulma ömrü artmaktadır.

Bu çalışmada, titreşim kaynaklı yorulma açısından kritik kabul edilen aksel bacaklı alüminyum kapasitörler incelenmiştir. Şekil 2'de Leopard 1 ana muharebe tankının güç baskı devre kartı görülmektedir [5]. Bu baskı devre kart üzerinde aksel bacaklı alüminyum kapasitörler yer almaktadır. Burada amaç, elektronik malzemeler üzerinde biriken titreşim hasarını sayısal olarak ifade edebilmektir. Bu problemin çözümü için sonlu elemanlar yöntemi ile bütünlük testler kullanılmaktadır. Yorulma ömrü tahminine yönelik sonlu elemanlar analiz yöntemi kullanan çeşitli yazılımlar mevcuttur. Bu çalışmada; baskı devre kartlara özel CirVibe [6] yazılımı kullanılmıştır. CirVibe yazılımı malzeme hasar hesapları için Palmgren-Miner lineer hasar teorisini kullanmaktadır. Palmgren-Miner teorisinde malzeme ömrünün ne kadarının kullanıldığına yönelik hasar kesiri, D , kullanılmaktadır. Bu kesir, belirli bir değişken yük altında malzemeye uygulanan döngü sayısı ile yine aynı yük için malzemeyi hasara



Şekil 1. Titreşim yükü altında aksel bacaklı kapasitörün bacalarındaki bükülme (Bending of lead wires of axial leaded capacitor under vibration) [4].



(a)



(b)

Şekil 2. (a) Güç dağıtım birimi güç baskı devre kartı (Power circuit board of power distribution unit) (b) Leopard 1 ana muharebe tankı (Leopard 1 main battle tank)

uğratan döngü sayısını karşılaştırmaktadır.

2. BASKI DEVRE KARTLARIN DENEYSEL ANALİZLERİ (EXPERIMENTAL ANALYSIS OF PRINTED CIRCUIT BOARDS)

Geniş bir yorulma ömrü dağılımına sahip olan elektronik malzemelerin yorulma ömrü tahminine yönelik analizlerinde deneysel yöntemleri kullanmak gerekmektedir. Baskı devre kart analizlerinde ihtiyaç duyulan ana girdiler rezonans frekansları ve geçirgenlikleridir. Ayrıca, kompozit baskı devre kart malzemesinin büküm elastiklik katsayılarına da sayısal yorulma analizlerinde ihtiyaç duyulmaktadır. Büküm elastiklik katsayısı üreticiden üreticiye çok değişen bir mekanik malzeme özelliğidir. Bu değer 12–25 GPa arasında değişmektedir. Bu yüzden elastiklik katsayısı 3 veya 4 nokta bükme testleri vasıtasıyla elde edilerek analizlerde girdi olarak kullanılmaktadır.

Analizlerin önemli bir kritik noktası da baskı devre kartın rezonans frekanslarında üzerinde oluşan dinamik yüklerdir. Bu yükler direk olarak kartın rezonans frekanslarında sahip olduğu geçirgenlik değerleri ile ilişkilidir. Baskı devre kartın rezonans geçirgenliği kart malzemesi, kart katman tipi ve sayısı, doğal frekans değeri, sınır koşulları, kart üzerindeki malzeme tipleri, yük genliği, kart geometrisi vb. parametrelere bağlıdır. Test ölçümleri geçirgenlik değerlerinin elde edilmesinde en iyi yöntemdir. Şekil 3'te baskı devre kartların rezonans geçirgenliğini tespit etmek için kullanılmakta olan test altyapısı görülmektedir.

Baskı devre kartın rezonans frekansı, kompozit malzemeden üretilen baskı devre kartın elastiklik



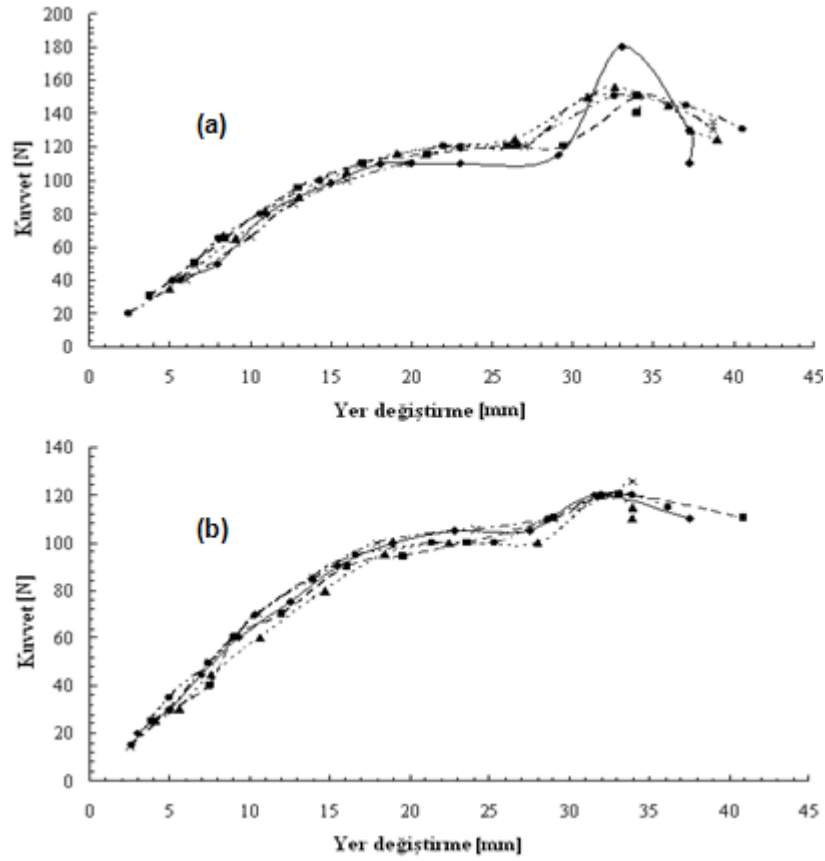
Şekil 3. Baskı devre kart rezonans geçirgenliği testi altyapısı (Printed circuit board transmissibility test setup)

katsayısına bağlıdır. Elastiklik katsayısı, kompozitin katman yapısına bağlıdır. Sayısal analizlerde, baskı devre kartın boylamasına (x) ve enlemesine (y) yönlerindeki 3 nokta bükme testlerinden elde edilen elastiklik katsayısının ortalama değerleri kullanılmıştır. Bu değerlerin elde edilmesinde ASTM D790 test yöntemi kullanılmıştır [7]. Üç nokta bükme testlerinde INSTRON 1175 test cihazı kullanılmıştır (Şekil 4).

Şekil 5'te üç nokta bükme testlerinde boylamasına ve enlemesine yönlere test edilen kuponlara ait kuvvet-uzama grafikleri verilmiştir. Boylamasına yönde



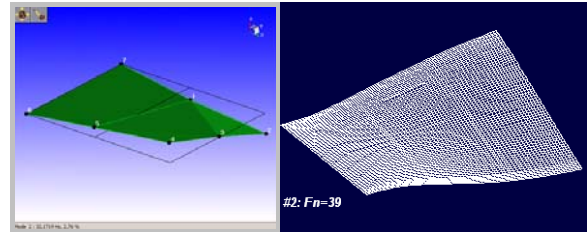
Şekil 4. Üç nokta bükme testleri düzeneği (Three point bending test setup)



Şekil 5. Üç nokta bükme testlerindeki test numunelerine ait kuvvet-uzama grafikleri a) Boylmasına yön b)-Enlemesine yön →: Numune 1 —■—: Numune 2 -▲-: Numune 3 -×-: Numune 4 -◆-: Numune 5 (Load deflection diagrams for test specimens in three –point flexural tests a)-Lengthwise direction b)-Crosswise direction)

kompozit baskı devre kart malzemesinin büküm elastiklik katsayısı 17.634 GPa; enlemesine yönde ise 16.25 GPa olarak elde edilmiştir.

Bu testin ardından, baskı devre kartın sayısal modelini doğrulamak amacıyla deneysel modal testler yapılmaktadır. Deneysel modal analizlerde sarsıcı ile tahrik etme ve modal çekiç ile tahrik etme üzere iki ana yöntem kullanılmaktadır. Modal çekiçler baskı devre kart, sabit disk gibi yapıların tahrik edilmesinde kullanılmaktadır. Değişik boyutlardaki modal çekiçler tahrik edilen yapının büyüklüğüne göre kullanılmaktadır. Modal testler sonucunda frekans tepki fonksiyonları (FTF) elde edilmektedir. Elde edilen FTF fonksiyonlarına yapının rezonans frekansı, sönümlenmesi ve mod şekli için çeşitli algoritmalar kullanılarak eğriler oluşturulmaktadır. Bu çalışmada eğri uydurma (fitting) yöntemi olarak LMS TestLab [8] yazılımının “karmaşık üstel en küçük kareler yöntemi” kullanılmıştır. Burada elde edilen sonuçların doğruluk seviyesi yeterli kabul edilmiş ve baskı devre kartın dinamik davranışının sonlu elemanlar modeli ile temsil edilebildiği görülmüştür. Şekil 6’da baskı devre kartın ankastre-serbest sınır koşullarında sayısal ve deneysel modal analiz sonuçları gösterilmektedir. Tablo 1’de baskı devre kartın ilk üç rezonans frekansları için sayısal ve deneysel modal analiz salınım şekli sonuçlarının karşılaştırması verilmiştir.



Şekil 6. Alüminyum eksenel bacaklı baskı devre kartın ankastre-serbest koşullarında 2. rezonans frekansına ait sayısal ve deneysel modal analiz sonuçları (Experimental and numerical modal analysis results for the 2.mode of the PCB populated with aluminum axial leaded capacitor with fixed-free boundary condition)

Tablo 1. Baskı devre kartın sayısal ve deneysel modal analizleri sonucu elde edilen ilk üç rezonans frekansları (Comparison of the numerical and experimental modal analysis results of the first three resonance frequencies of the PCB)

Eksenel bacaklı alüminyum kapasitör ile dizilmiş BDK			
Mod Numarası	SEY Sonlu Elemanlar Yöntemi(SEY) (Hz)	Deneysel Modal Analiz (Hz)	(SEY-test)/test (%)
1	11.15	11	1.35
2	32.17	39	-17.51
3	58.7	68	-13.68

Tablo 1’de sunulan 2. ve 3. doğal frekans değerleri için sayısal ve deneysel analizlerde elde edilen farklılık temel olarak sayısal modellemeye kaynaklanmaktadır. Elektronik BDK üzerindeki malzemelerin mekanik özelliklerini tam olarak elde edip modellemek mümkün değildir. Ayrıca bu malzemelerin analizlere girdi teşkil eden mekanik özellikleri yüksek derecede dağılım göstermektedir. Bu belirsizliklerin sonucu daha çok yüksek dereceli esnek mod tiplerinde ortaya çıkmaktadır.

3. ELEKTRONİK MALZEMELERİN HIZLANDIRILMIŞ ÖMÜR TESTLERİ (ACCELERATED LIFE TESTING OF ELECTRONIC COMPONENTS)

Elektronik malzemelerin hızlandırılmış ömür testleri, laboratuvar ortamında baskı devre kart üzerinde değişik noktalara monte edilmiş olan malzemelerin hasar sürelerini ve indekslerini tespit etmek için uygulanmaktadır. Güvenilirlik konusu üzerine araştırma yapan uzmanlar ürünlerin hasar mekanizmalarını ve ömür karakteristiklerini daha iyi algılayabilmek için ürünleri normal çalışma şartlarından daha kısa sürede hasara uğratabilecek test yöntemleri geliştirmeye çalışmaktadır. Başka bir deyişle bu yöntem hasarın ortaya çıkışını hızlandırmaktadır.

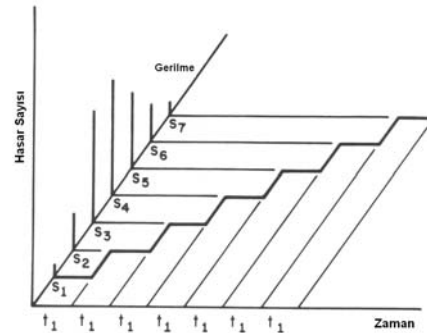
Değişik birçok hızlandırılmış test yöntemleri mevcuttur. Geleneksel olanları tek tip (örneğin sadece sıcaklık veya titreşim gibi) gerilme uygulanmasına dayalıdır. Ancak birçok hasar mekanizmasının çevresel koşulların birleşiminden (örneğin rastsal titreşim ve yüksek sıcaklık gibi) kaynaklandığı ya da bunların birlikte uygulanması ile hızlandırılabilen öngörülmektedir. Aynı anda birden çok çevre koşulunun tatbik edilebildiği test odaları mevcuttur. Bu çalışmada ise baskı devre kart üzerindeki malzemelerin sadece titreşime bağlı mekanik yorulması incelendiğinden sadece rastsal titreşim gerilmesinin uygulandığı basamaklandırılmış gerilme test yöntemi (BGT) kullanılmıştır. Hızlandırılmış bu ömür testlerinin uygulanmasında elektrodinamik titreşim sarsıcılarının kullanılması yeterli olmuştur (Şekil 7).



Şekil 7. Baskı devre kartın elektrodinamik sarsıcısı üzerinde basamaklandırılmış gerilme testleri (Step Stress Testing of the PCB using electrodynamic vibration shaker)

Basamaklandırılmış Gerilme Testleri (BGT) (Step Stress Tests)

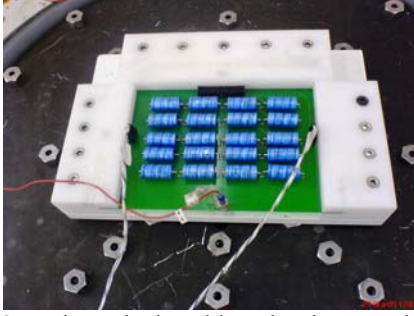
Basamaklandırılmış gerilme test yöntemi, elektronik malzemelerin tasarım limitlerini (kırılma limitlerini) bulmak için uygulanmaktadır [9]. BGT, baskı devre kartın her bir adımda bir önceki adıma göre daha yüksek gerilmelere maruz kaldığı ve her adım sonunda hasar süresi ve adedinin kayıt edildiği bir test yöntemidir (Şekil 8). Bu testin avantajı malzemenin hasara uğrayacağı ivme ve dolayısıyla gerilme seviyeleri hakkında hızlıca bilgi edinebilmeyi sağlamasıdır. Bir diğer avantajı ise testlerin tamamlanması için gereken sürenin makul bir süre olmasıdır.



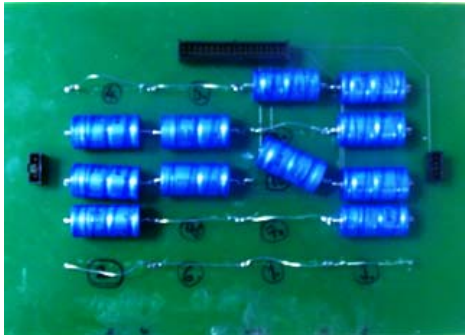
Şekil 8. Basamaklandırılmış gerilme test yöntemi [10] (Step stress tests)

Testler kart üzerindeki bütün malzemelerin ya da yeterli sayıda malzemenin hasara uğramasının ardından veya belirli bir test süresi geçtikten sonra (test altyapısının limitlerine ulaşıncaya kadar) durdurulmaktadır. BGT’de basamaklar arası yükseltme faktörü sabittir ve bu faktör malzeme yorulma eğrisi eğimi olarak alınmaktadır. Malzeme yorulma eğrisi eğimi, elektronik malzemelerin bacakları ve lehimler için ortalama olarak 1.25 olarak alınmaktadır [11,12]. Test basamak süreleri yüksek döngülü yorulmayı sağlayabilmek için 1 saat olarak seçilmiştir [13].

Baskı devre kartlar üzerinde kullanılmakta olan ve yorulma ömrü açısından kritiklik arz eden malzemelerden bir tanesi aksel bacaklı kapasitörlerdir. Bu kapasitörler kendi aralarında tantal, film ve elektrolitik olmak üzere 3 kategoriye ayrılmaktadır. Baskı devre kart üzerindeki hasarı bölgesel olarak belirleyebilmek için test baskı devre kartları üzerine kapasitörler seri şekilde sıralanmıştır. Bu çalışmalar sonucunda hasar açısından riskli bölgelerde bulunan kapasitörler daha düşük hasara maruz kalacakları bölgelere yerleştirilebilecektir. Şekil 9’da aksel bacaklı alüminyum kapasitör dizilmiş baskı devre kart görülmektedir. Test kartlarının basamaklandırılmış gerilme testleri yapılmıştır (Şekil 10). Bu testler sonunda birinci ve ikinci baskı devre kart için 10 adet kapasitörde hasar gözlemlendikten sonra testler 8. basamakta durdurulmuştur. İlk test kartında görülen hasarlar bacaklarda eğilme gerilmelerinden kaynaklanmış; ikinci test kartında ise lehim yerlerinden de



Şekil 9. Eksenel bacaklı alüminyum kapasitör dizilmiş baskı devre kart (Test PCB populated with axial leaded capacitors)



(a)



(b)

Şekil 10. Basamaklandırılmış gerilme testleri a)- 1. test kartı b)- 2. test kartı (Test PCB after Step Stress Tests a)-First PCB b)-Second PCB)

kırılmalar gözlemlenmiştir. Hasar gören kapasitörlerin bulunduğu yerlere test devresini tamamlamak için iletken teller lehimlendikten sonra testlere devam edilmiştir.

Baskı devre kartlar üzerindeki hasar dağılımı incelendiğinde simetrik bir dağılım göze çarpmaktadır (Şekil 10). Bu durum hasar dağılımının iki kart arasında tutarlı olduğunu göstermektedir. Analizlerdeki bu doğruluk seviyesi elektronik malzemeler gibi yorulma ömrü dağılımı fazla olan yapılar için yeterli kabul edilmiştir. Basamaklandırılmış gerilme testlerinde hasara uğrayan kapasitörler ve bunların hasara uğrama süreleri belirlendikten sonra bu kapasitörler için yorulma hasar indeksi sayısal analizler ile (CirVibe yazılımı aracılığıyla) elde edilmiştir. Bu hasar indeksleri aynı zamanda malzeme ömründen ne kadar tükendiğini gösteren ömür kullanım analizlerinde de kullanılabilir.

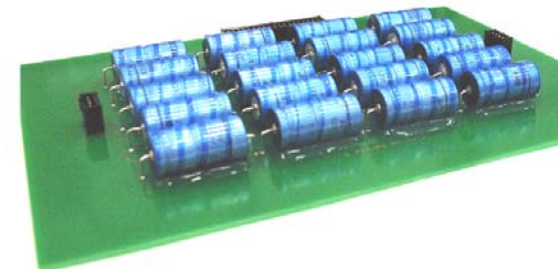
Elektronik Paketlemede "Ekobont" (Eccobond) ve Silikon ile Sağlamaştırma (Eccobond & silicone reinforcement in electronic packaging)

Elektronik endüstrisinde güvenlik endişesiyle çoğu zaman eksenel bacaklı kapasitörler, resistörler, epoksi (ekobont) veya silikon ile baskı devre kart üzerine tutturulmaktadır. Malzemeler baskı devre kart üzerine alt yüzeylerinden epoksi veya silikon ile yapıştırılarak titreşime karşı daha dayanıklı hale getirilmektedir. Ancak bu yapıştırıcıların önemli bazı dezavantajları vardır. Örneğin baskı devre kartın yüksek sıcaklıkta çalıştığı durumlarda silikon kullanılması uygun olmayabilmektedir. Benzer şekilde, baskı devre kartın tamir edilmesi gereken durumlarda, ekobont buna engel olmaktadır. Bu yapışkanlar mekanik bağlayıcılara alternatif olmakta; havacılık, otomotiv, deniz ve elektronik endüstrisinde yaygın olarak üretim metodu olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle epoksi ve silikon ile sağlamaştırmanın eksenel bacaklı alüminyum kapasitörlerin yorulma ömrü üzerine olan etkisinin araştırılması önem taşımaktadır. Şekil 11'de epoksi ve silikon ile sağlamaştırılmış alüminyum eksenel bacaklı kapasitörler gösterilmiştir.

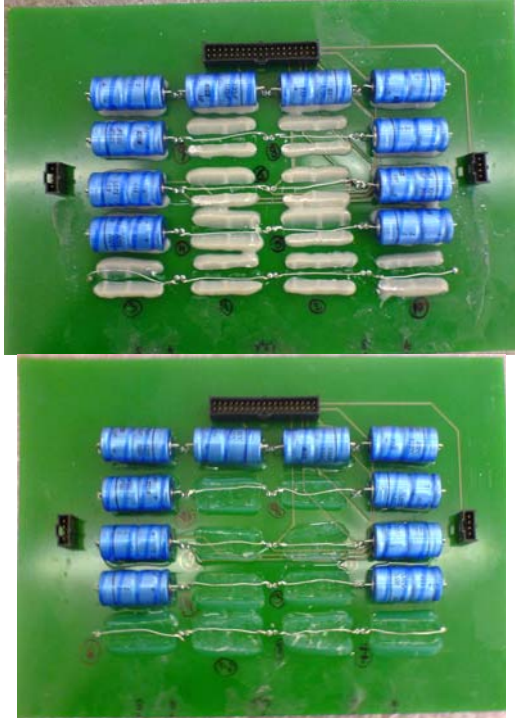
Ekobont veya silikon baskı devre kartın ağırlığını ve direngenliğini değiştirdiği için kart üzerinde hasara uğrayacak kapasitörleri doğrudan etkilemektedir (Şekil 12).

Saçılımı fazla olan yorulma test verisi istatistikî açıdan yorumlanmalıdır. Bu kapsamda Weibull dağılımı, güvenilirlik ve ömür verisi analizlerinde sıklıkla kullanılmaktadır.

Bu dağılım, farklı veri setlerinin, örneğin elektronik malzemeler, rulmanlar vb. özellikle ömürlerinin modellenmesinde ele alınmaktadır [14]. Test verilerinin bu dağılımı takip ettiği varsayılmakta ve MTTF



Şekil 11. Eksenel bacaklı alüminyum elektrolitik kapasitör a) Epoksi (epoxy) ile sağlamaştırılmış b) Silikon ile sağlamaştırılmış (Eccobond and silicone bonding applied to PCB)



Şekil 12. Basamaklandırılmış gerilme testleri sonucu ekobont ve silikon ile sağlamlaştırılmış test kartları üzerindeki hasar dağılımı (Eccobond and silicone reinforced PCBs populated with aluminum capacitors at the end of the step stress tests)

(arıza oluşuncaya kadar geçen ortalama süre) değerleri hesaplanmaktadır.

Çalışmanın sonucu olarak titreşim yükü altındaki kapasitörün ekobont ile sağlamlaştırmanın yapının yorulma ömrünü silikona göre çok daha fazla iyileştirdiği görülmüştür.

4. ELEKTRONİK MALZEMENİN YORULMA ÖMRÜ İÇİN HASSASİYET ANALİZLERİ (SENSITIVITY STUDY FOR ELECTRONIC COMPONENT FATIGUE LIFE)

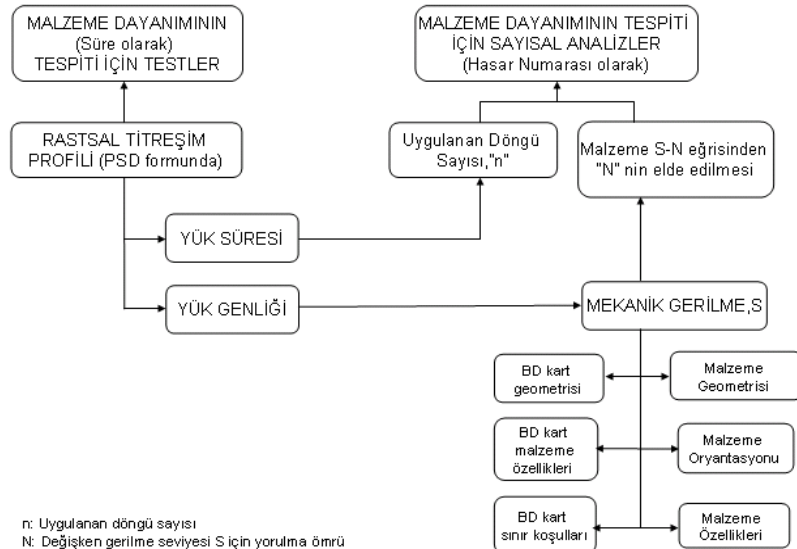
Elektronik malzemelerin yorulma ömrü üzerinde bazı değişkenlerin etkilerini görebilmek için hassasiyet analizleri yapılması gerekmektedir. Şekil 13’te verilen diyagramda baskı devre kart üzerinde yer alan elektronik malzemelerin yorulma ömürleri üzerine etki eden faktörler gösterilmiştir. Bu çalışmada basit mesnetli olarak desteklenmiş, sabit kalınlıktaki baskı devre kartın ortasına yerleştirilen bir adet eksenel bacaklı kapasitör için yorulma ömrünün değişimi incelenmiştir.

Baskı Devre Kart Geometrisi (PCB Geometry)

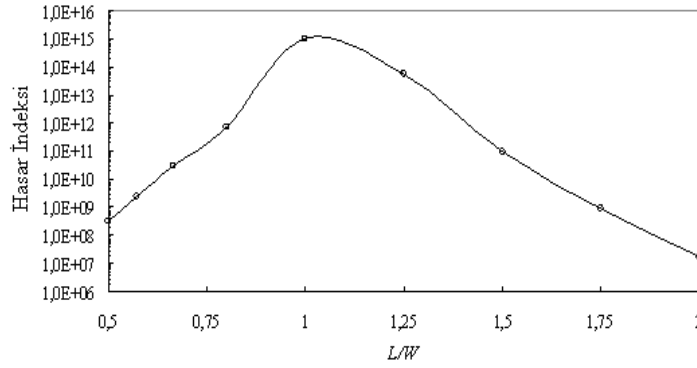
Yorulma ömrünün baskı devre kartın en ve boyuna göre değişimi, aşağıda sırasıyla Şekil 14 ve Şekil 15’te verilmiştir. Ayrıca Şekil 16’da eksenel bacaklı kapasitörün yorulma ömrünün, kartın en ve boyunun aynı anda değişmesi durumundaki eğilimi verilmiştir. Buna göre kare baskı devre kart için yorulma hasarı en fazla elde edilmiştir.

Baskı devre kart geometrisi ile ilgili sayısal analizler sonucunda aşağıdaki yargılara varılmıştır:

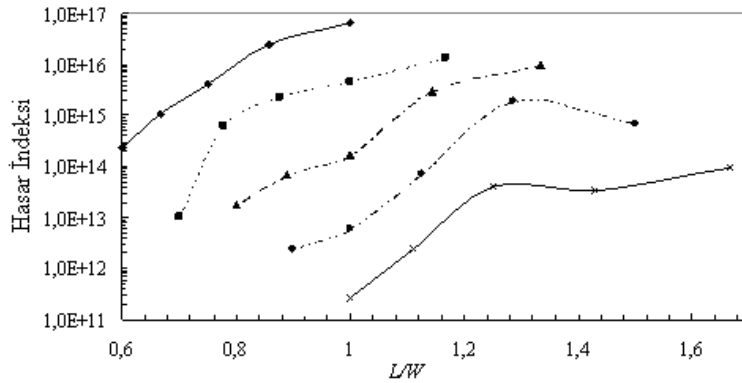
- Şekil 14’e göre, baskı devre kartın boyu sabit tutulup eni küçültüldüğünde (boy/en (L/W) oranının artması) malzeme üzerindeki yorulma hasarı artmaktadır.
- Baskı devre kart üzerindeki malzeme için yorulma hasarı, kart boyunun en küçük olduğu durum için (analizlerde L=120mm durumu için) en fazla elde edilmiştir.
- Şekil 15’e göre, baskı devre kartın eni sabit tutulup boyu arttırıldığında (boy/en (L/W) oranının artması)



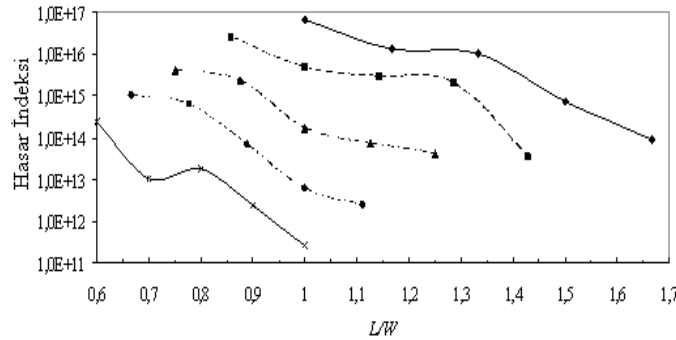
Şekil 13. Baskı devre kart üzerindeki elektronik malzemenin yorulma ömrü üzerine etki eden faktörler (Diagram showing the factors influencing the component life capability)



Şekil 14. Yorulma hasarının, baskı devre kartın en ve boyunun birlikte değişmesi durumuna göre değişimi (Variation of damage with respect to PCB geometry when width & length is changing)



Şekil 15. Yorulma hasarının baskı devre kartın enine göre değişimi, boy (L)=sabit —◆—: L=120 mm —■—: L=140 mm —▲—: L=160 mm —◆—: L=180 mm —*—: L=200 mm (Variation of damage with respect to width of the PCB while the length of the PCB is constant)



Şekil 16. Yorulma hasarının baskı devre kartın boyuna göre değişimi, en (W)=sabit —◆—: W=120 mm —■—: W=140 mm —▲—: W=160 mm —◆—: W=180 mm —*—: W=200 mm (Variation of damage with respect to length of the PCB while width of the PCB is constant)

malzeme üzerindeki yorulma hasarı azalmaktadır.

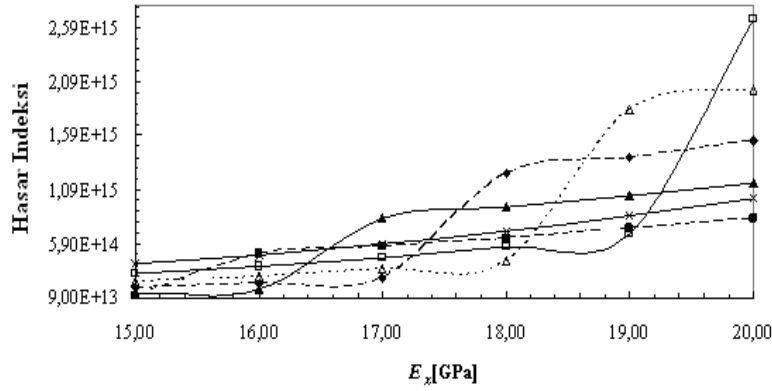
- Baskı devre kart üzerindeki malzeme için yorulma hasarı kart eninin büyük olduğu durum için (analizlerde W=200mm durumu için) en az elde edilmiştir.
- 1. ve 3. yargılar göz önüne alındığında; yorulma ömrünün, baskı devre kartın boy/en oranının 1 olduğu (kare baskı devre kart) durum için maksimum olduğu diğer durumlar için ise azaldığı görülmektedir (Şekil 16).

Baskı devre kartın elastiklik katsayısı, malzeme yönü, malzeme bacak çapı, malzeme gövde uzunluğu ve

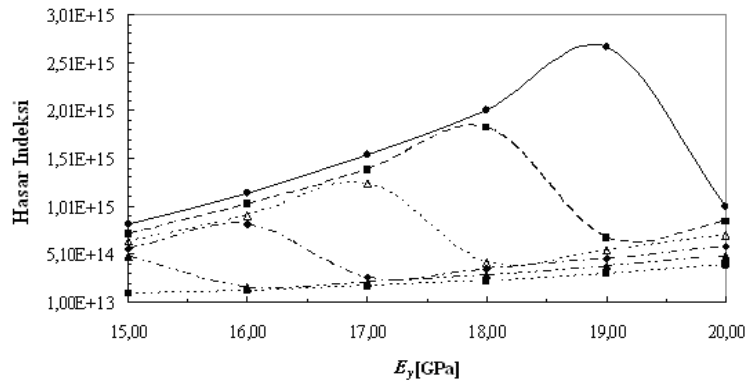
çapı için yapılan hassasiyet analizlerinde L/W oranı 1,5 olarak alınmıştır.

Baskı Devre Kartın Elastiklik Katsayısı (PCB Young Modulus)

Kompozit baskı devre kart malzemesinin aksenal bacaklı kapasitörün yorulma ömrü üzerine olan etkisini görebilmek için kartın x (boylamasına) ve y (enlemesine) yönlerindeki elastiklik katsayıları değiştirilmiştir. Yorulma ömrünün x ve y yönlerindeki elastiklik katsayılarına göre değişimi sırasıyla Şekil 17 ve Şekil 18’de görülmektedir.



Şekil 17. Yorulma hasarının boylamasına yöndeki elastiklik katsayısına, E_x 'e göre değişimi, E_y =sabit, $E_y=15$ GPa $E_y=16$ GPa $E_y=17$ GPa $E_y=18$ GPa $E_y=19$ GPa $E_y=20$ GPa (Variation of damage with respect to E_x of the PCB while E_y of the PCB is held constant)



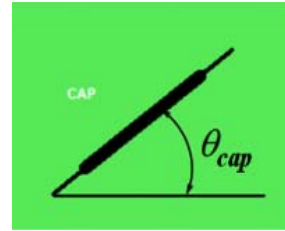
Şekil 18. Yorulma hasarının enlemesine yöndeki elastiklik katsayısına, E_y 'e göre değişimi, E_x =sabit, $E_x=15$ GPa $E_x=16$ GPa $E_x=17$ GPa $E_x=18$ GPa $E_x=19$ GPa $E_x=20$ GPa (Variation of damage with respect to of E_y the PCB while E_x of the PCB is held constant.)

Baskı devre kartın elastiklik katsayısı ile ilgili sayısal analizleri sonucu aşağıdaki yargılara varılmıştır:

- Şekil 17'ye göre, enlemesine yöndeki elastiklik katsayısı, E_y , sabit iken $E_y = E_x$ durumunda yorulma hasarı en küçük; $E_y = (E_x - 1)$ durumunda ise yorulma hasarı en yüksek olmaktadır. Yorulma hasarının artış hızı $E_y = E_x$ noktasında maksimumdur.
- Şekil 18'e göre, boylamasına yöndeki elastiklik katsayısı, E_x , sabit iken ise E_y 'in artması ile yorulma hasarı artmaktadır. Yorulma hasarı bir noktaya kadar artmakta, ardından azalmakta, ardından tekrar artmaya başlamaktadır.

Malzeme Yönü (Component Orientation)

Malzeme yönünün yorulma ömrü üzerine doğrudan etkisi vardır. Çünkü malzemenin kart üzerindeki konumuna göre bacaklardaki eğilme momentleri ve dolayısıyla eğilme gerilmeleri farklı olmakta bu da yorulma ömrünü etkilemektedir. Şekil 19'da eksenel bacaklı kapasitörün kart üzerindeki yerleşimi

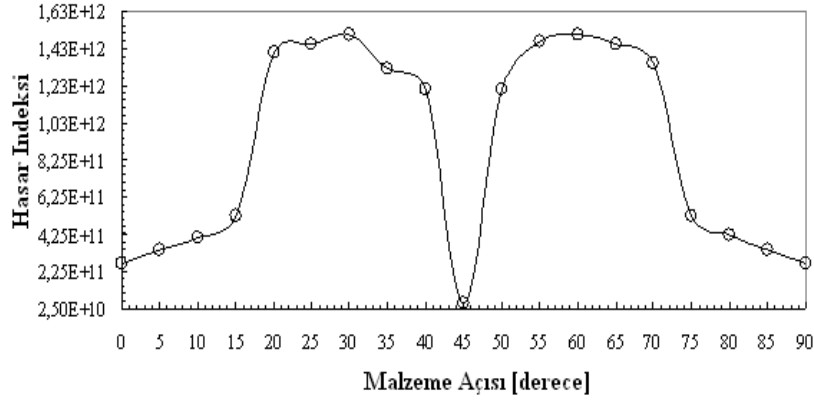


Şekil 19. Eksenel bacaklı kapasitörün kart üzerindeki yerleşimi (Orientation of axial leaded capacitor on the PCB)

görülmektedir. Burada θ_{cap} kapasitörün yatay ile yaptığı açığı temsil etmektedir. Bu çalışmada θ_{cap} açısı $0^\circ - 90^\circ$ arasında değiştirilerek yorulma hasarının değişimi gözlemlenmiştir. Yorulma hasarının θ_{cap} açısına bağlı değişimi Şekil 20'de verilmiştir.

Malzeme yönü için yapılan sayısal analizler sonucu aşağıdaki yargılara varılmıştır:

- Yorulma hasarı θ_{cap} açısının artması ile önce artmakta ve maksimum değerine ulaşmakta daha sonra azalarak 45° 'de minimum değerine ulaşmaktadır. Dolayısıyla yorulma ömrü açısından en



Şekil 20. Yorulma hasarının θ_{cap} açısına bağlı değişimi (Fatigue damage versus orientation angle, θ_{cap})

uygun yerleşim 45° konumu olarak görülmektedir. Ayrıca yorulma hasarı 45° ye göre simetrik elde edilmiştir.

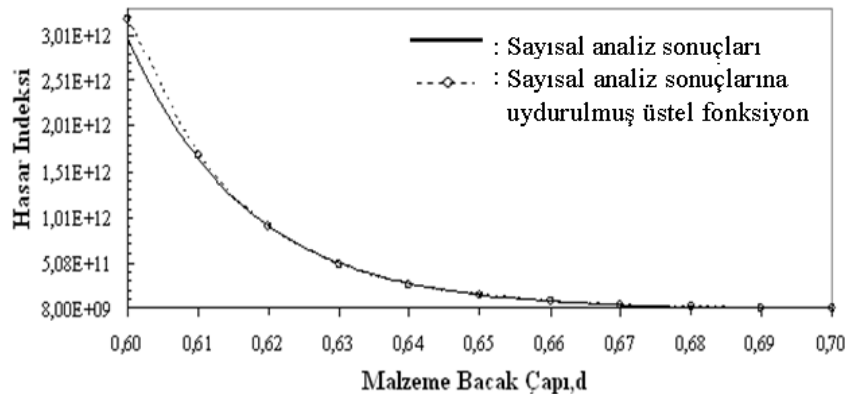
- Yorulma hasarı malzemenin 30° ve 60° konumlarında maksimum olmaktadır. Yorulma hasarı 0° ve 90° konumları için ise aynı olmaktadır.
- Yorulma ömrü açısından en uygun yerleşim 45° gibi görünse de bu yerleşim BDK tasarımında yerleşim problemi nedeniyle pek kullanılmamakta daha çok 0° ve 90° konumları tercih edilmektedir. Bu konumlar için de yorulma hasarı 45° konumuna yakın elde edildiği için emniyetle kullanılabilir. Pratikte de eksenel bacaklı malzemelerin baskı devre kartlar üzerinde açılı olarak yerleşimi gözlemlenmemektedir.

Malzeme Bacak Çapı (Component Lead-wire Diameter)

Bacak çapının artması malzeme direngenliğini arttırmakta ve yorulma hasarını azaltarak yorulma ömrünü arttırmaktadır (Şekil 21). Sayısal analiz sonuçlarına üstel eğri uydurulmuştur.

Buna göre kapasitörün bacak çapı ile yorulma ömrü arasında Şekil 21'e göre;

$$D = \alpha * e^{\beta d_{cap}} \quad (1)$$



Şekil 21. Yorulma hasarının malzeme bacak çapına göre değişimi (Fatigue damage versus component lead-wire diameter)

şeklinde bir ilişki kurulabilmektedir.

Denklemlerde D hasar numarası, d_{cap} ise bacak çapını belirtmektedir. Ancak α ve β katsayıları; farklı sınır koşulları, geometri, kart kalınlığı ve elastiklik katsayıları için farklı elde edilecektir.

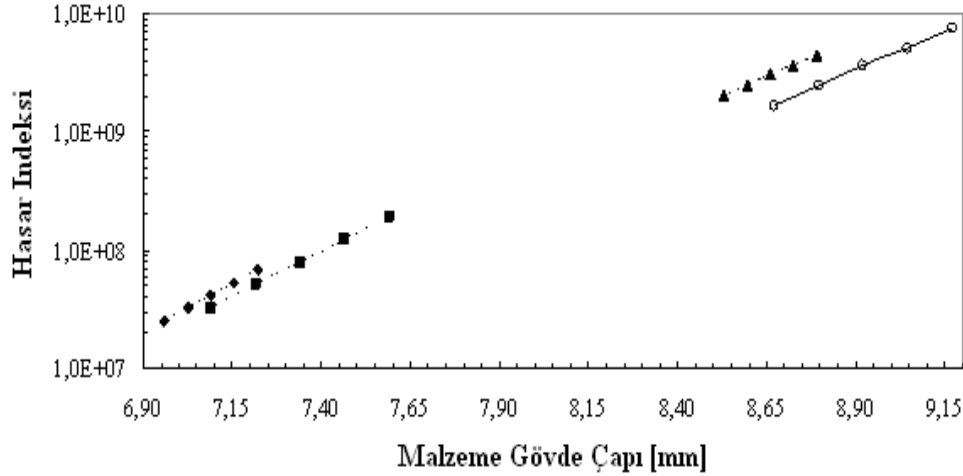
Malzeme Gövde Uzunluğu ve Çapı (Component Body Length & Diameter)

Kapasitör, resistör gibi malzemeler için malzeme gövde uzunluğu ve çapı yorulma hasarını direk etkileyen diğer iki önemli parametredir. Bu parametreler pratikte üç farklı şekilde değiştirilebilmektedir:

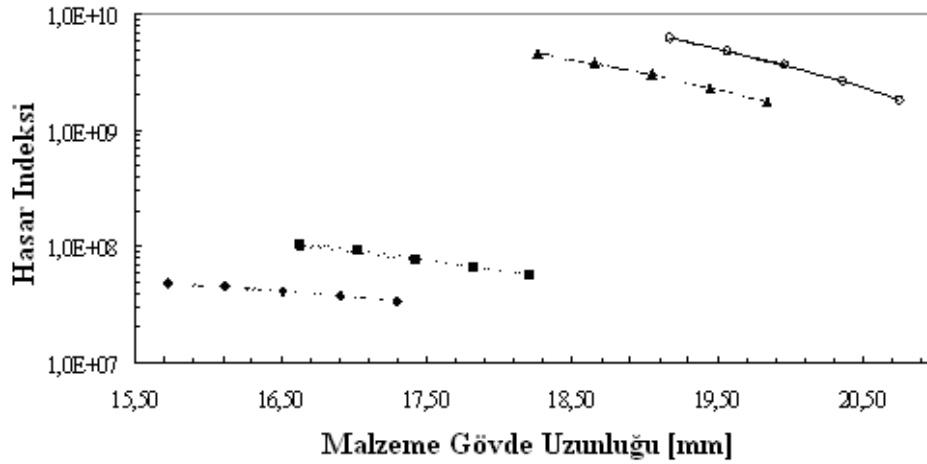
1. L_{cap} =sabit, D_{cap} değişken
2. D_{cap} =sabit, L_{cap} değişken
3. L_{cap} ve D_{cap} değişken

Burada D_{cap} malzeme gövdesinin çapını, L_{cap} ise gövde uzunluğunu temsil etmektedir. Yorulma hasarının malzeme gövde çapına ve boyuna göre değişimleri sırasıyla Şekil 22 ve Şekil 23'te verilmiştir.

Malzeme gövde boyu ve çapı için yapılan sayısal analizler sonucu aşağıdaki yargılara varılmıştır:



Şekil 22. Yorulma hasarının gövde çapına göre değişimi; gövde boyu=sabit, -◆-: $L_{cap}=16.51$ mm -■-: $L_{cap}=17.42$ mm -▲-: $L_{cap}=19.05$ mm -○-: $L_{cap}=19.96$ mm (Variation of damage with respect to component body diameter when body length is held constant)



Şekil 23. Yorulma hasarının gövde boyuna göre değişimi; gövde çapı=sabit, -◆-: $D_{cap}=7.09$ mm -■-: $D_{cap}=7.34$ mm -▲-: $D_{cap}=8.66$ mm -○-: $D_{cap}=8.92$ mm (Variation of damage with respect to component body length when body diameter is held constant)

- Şekil 22'ye göre, malzeme gövde uzunluğu sabit tutulup gövde çapı artırıldığında yorulma hasarı artmaktadır.
- Şekil 23'e göre, malzeme gövde çapı sabit tutulup gövde uzunluğu artırıldığında yorulma hasarı azalmaktadır.
- Şekil 22 ve Şekil 23 birlikte değerlendirildiğinde, malzeme gövde uzunluğu ve çapı birlikte artırıldığında yorulma hasarı artmaktadır. Buna göre gövde çapının gövde uzunluğuna göre yorulma hasarı üzerinde daha baskın unsur olduğu sonucu elde edilmiştir.

5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME (DISCUSSION AND CONCLUSION)

Zor askeri koşullarda çalışacak elektronik sistemlerin titreşim-şok dayanımlarını belirlemede geleneksel olarak arazi tecrübesinden faydalanılmaktadır. Ancak tamamen arazi tecrübesine dayalı yöntemler sistemleri geliştirmek için çok etkin olmamaktadır. Ürünlerin

davranışları anlaşılmasından hızlı gelişen teknoloji sayesinde bu ürünler eskiyebilmektedir. Dolayısıyla ticari ve askeri firmalar özellikle elektronik sistemler için benzeşim ve test yöntemlerini güvenilir ürünler ortaya koyabilmek için kullanılmalıdır.

Baskı devre kartlar titreşim yükleri altında yorulmuş hasara uğramaktadır. Birçok modern malzeme rezonans kaynaklı gerilmelerden ötürü hasara uğradığı için yüksek gerilmelere maruz kalacak bölgelerdeki malzemeler risk altında bulunmaktadır.

Baskı devre kartların tam olarak dinamik modellenmesi çok zordur. Çünkü elektronik malzeme üreticileri analizlerde ihtiyaç duyulan malzeme özelliklerinin tamamını sağlayamamaktadır. Bunun yanında kart malzemesinin gerçek dinamik davranışını elde edebilmek için 3 veya 4 nokta bükme testlerinin yapılması gerekmektedir. Ayrıca benzeşimler ile yorulma testleri arasında uyumluluk sağlanabilmesi

için test kartlarında kullanılan lehimin standart kalitede olması ise çok önemlidir.

Bu kapsamda yapılan çalışmada simülasyon ve testler birlikte, birbirini tamamlayıcı olarak gerçekleştirilmiştir. Baskı devre kart tasarımcılarının daha mukavim kart tasarlayabilmesi için bazı çıkarımlar elde edilmiştir. Eksenel bacaklı alüminyum kapasitör için yapılan hassasiyet analizlerinde, kare baskı devre kart için yorulma hasarının en fazla olduğu elde edilmiştir. Malzemenin 45° konumu için yorulma hasarı en az; 30° ve 60° konumları için ise maksimum olmaktadır. Ayrıca malzeme bacak çapı ile yorulma hasarı arasında üstel bir ilişki bulunmaktadır.

Basamaklandırılmış gerilme test yöntemi kullanılarak elde edilen yorulma ömrü veritabanı; üretim kaynaklı hataların ortaya çıkarılmasında kullanılan titreşim ile eleme (ESS) test profilinin elde edilmesinde de kullanılabilir. Çevre koşulları ile elemelerde ürün titreşim, sıcaklık vb. gibi yüklere maruz bırakılarak ürünün bebek ölümü engellenmektedir. Hataların ortaya çıkarılmasında doğru uygulanacak titreşim ile eleme yöntemi çok etkilidir. Ancak ürünün yaşlandırılmaması için uygulanacak genlik ve süreyi doğru tespit edebilmek için detaylı analizler yapılması gerekmektedir. Eğer uygulanan titreşim test profili etkin olursa ürünün güvenilirliği artacaktır. Çünkü müşteriye ürün teslim edilmeden üretim kaynaklı hatalar ortaya çıkarılabilecek ve bunları düzeltecek önemler önceden alınabilecektir. Bunun yanı sıra elektronik malzemelerin hasar oluşum hızlarını ampirik formüller vasıtasıyla tahmin eden MIL-HDBK-217 gibi kaynakları kullanmaktansa testler ile bütünlük sayısal yorulma analizlerini kullanmak çok daha doğru bir yaklaşım olacaktır.

SEMBOLLER (NOMENCLATURE)

- D : Hasar indeksi
 L : Baskı devre kart boyu
 W : Baskı devre kart eni
 E_x : Baskı devre kartın boylamasına (x) yöndeki büküm elastiklik katsayısı
 E_y : Baskı devre kartın enlemesine (y) yöndeki büküm elastiklik katsayısı
 θ_{cap} : Kapasitörün yatay ile yaptığı açı
 α : Yorulma ömrü bacak çapı arasındaki üstel ilişkiye ait sabit
 β : Yorulma ömrü bacak çapı arasındaki üstel ilişkiye ait sabit
 d_{cap} : Kapasitör bacak çapı
 L_{cap} : Kapasitörün gövde uzunluğu
 D_{cap} : Kapasitörün gövde çapı

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Veprik, A.M., Vibration Protection of Critical Components of Electronic Equipment in Harsh Environmental Conditions, **Journal of Shock and Vibration**, Volume 259(1), pp. 161-175, 2003.
2. Çelik, M., Ruggedization of the gunner display unit for a self propelled howitzer, **NATO Functional and Mechanical Integration of Weapons with Land and Air Vehicles Symposium**, RPO-MP-AVT-108, Williamsburg VA, USA, 2004.
3. Considerations in Selecting a Vibration Isolator, <http://www.lordmpd.com>, visited on April 2006.
4. Wang, H., Zhao, M., Guo, G., Vibration fatigue experiments of SMT solder joint, **Microelectronics and Reliability**, Volume 44, Issue 7, pages 1143-1156, July 2004.
5. Genç, C., **Fatigue and Life Estimation Analysis of Printed Circuit Board Components**, MSc. Thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2006.
6. **CirVibe Version 3.0 User's Manual and Training Notes**, CirVibe Inc, USA, 2003.
7. American Society for Testing and Materials ASTM D790-99, **Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials**, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, USA, 1999.
8. **Test Lab Rev. 4A User's Manual and Training Notes**, LMS International, Leuven, Belgium, 2003.
9. Institute of Environmental Sciences and Technology IEST-RP-PR001.1, Appendix A: **Vibration Stress Screening Development Characteristics**, 5005 Newport Drive, Suite 506 Rolling Meadows, IL 60008-3841, USA, 1999.
10. Peck, D.S., Trapp, O.D., **Accelerated Testing Handbook**, Technology Associates & D.S. Peck Consulting Corp., California: Technology Associates, 1987.
11. Steinberg, D.S., **Vibration Analysis for Electronic Equipments**, Second edition, John Wiley & Sons, New York, USA, 1988.
12. Hobbs, G.K., **Highly Accelerated Life Tests, Proceedings of Institute of Environmental Sciences**, 5005 Newport Drive, Suite 506 Rolling Meadows, IL 60008-3841, USA, 1992.
13. Starr, J., **Optimizing HALT, ESS and HASS of Electronic Circuit Cards**, CirVibe Inc., Plymouth, USA, 2003.
14. Nelson, W., **Applied Life Data Analysis**, Wiley series in probability and mathematical statistics", ISSN 0271-6356, New York, USA, 1982.