

ÇOK FONKSİYONLU YAPILARIN KÜÇÜK UYDULARDA UYGULANMASI

Zana Eren¹, Melike Nikbay², A. Rüstem Aslan³

İstanbul Teknik Üniversitesi

ÖZET

Bu çalışmada, çok fonksiyonlu yapıların uydularda uygulanması ele alınmıştır. Bu kapsamda, piko uydu boyutlarında uydu duvarının elektrik devre kartı olarak kullanımı çalışılmıştır. Küp uydu standartlarında karşılaşılabilecek kısıtlar etrafında hem uydu duvarı hem de güç devre kartı fonksiyonu olan tasarım anlatılmıştır ve literatürdeki sınıflandırmalar ışığında bu tasarımın çok fonksiyonlu yapılardaki yeri belirtilmiştir. Çalışma piko uydular için olsa da amaçlanan, görece daha büyük nano uydularda uygulanması için fikir oluşturmaktır. Yapılan analizlerde, ilk olarak önerilen tasarım için dinamik analiz ele alınmıştır, ardından uydularda lehimlerdeki termal etkilerden bağımsız olarak mekanik gerilmelerin durumu incelenmiştir. Yeni alt sistem önerisinde bazı mekanik testler neticesinde sistemin uygunluğu sağlanmıştır. Sonuç olarak PCI 104 soketlerinden birisi boşaltılarak başka bir faydalı yüke yer açılmış ve hacimsel tasarruf sağlanmıştır. Yapılması gereken ilave termal ve mekanik testler yine bu kapsamda anlatılmıştır.

GİRİŞ

Çok fonksiyonlu yapılar birden çok görevi yapabilen alt sistem olması yanısıra hedeflenen parasal tasarruf ise parasal tasarruf sağlayan; hedeflenen mekansal tasarruf ise mekansal tasarruf sağlayan alt sistemlerdir. Bir çok fonksiyonlu malzeme, tipik olarak birden çok malzemenin hibridi şeklindedir. Momoda'ya göre farklı fazlardaki bu bileşenler farklı davranırlar ki bu farklılıklar gerekli fonksiyonu; yapısal, transfer, akıllılık yada enerji depolama gibi özellikler katmaktadır. [Momoda, 2005] Çok fonksiyonlu tasarım konusu bir eniyileme stratejisidir. Çok fonksiyonlu malzemeleri diğer çoklu malzeme sistemlerinden ayıran ağırlık yada hacim tasarrufu vaat eden bir durumda olmalarıdır. Matic'in yaptığı sınıflandırmaya göre 3 grupta toplanabilirler. [Matic, 2003] Konu ile ilgili çalışmalara bakılabilir. [Eren, 2014] Yapılan çalışma Matic'in sınıflandırmasına göre 2. Tip çok fonksiyonlu yapıya örnektir.

Küçük boyutta uzay aracı tasarımları için önemli olan hacim ve ağırlık tasarrufu için birçok bilim adamı hafif kompozitler üzerine çalışmalar yapmıştır. [G.S. Aglietti, 2007] [J.Guerrero, 2001] "RTO-MP-AVT-171 - Multifunctional Structures and Systems Technologies for Small Spacecraft" paneli bu konuda NATO ülkelerinin bilimsel politikaları tartıştığı oturumdur. ABD, Kanada, Japonya, İsveç te bu konularda çok ciddi çalışmalar yapılmaktadır. Uzay ile ilgili yapılan çalışmalarda deneysel olarak ilk gerçekleştirileni NASA'nın "Deep Space 1" programıdır. [Rawal, Barnett, & Martin, 1999] Bu çalışma çerçevesinde panel içine elektronik sistemler gömülmüştür. Birçok araştırmacı ve uygulamacı bu çalışmayı referans göstermiştir.

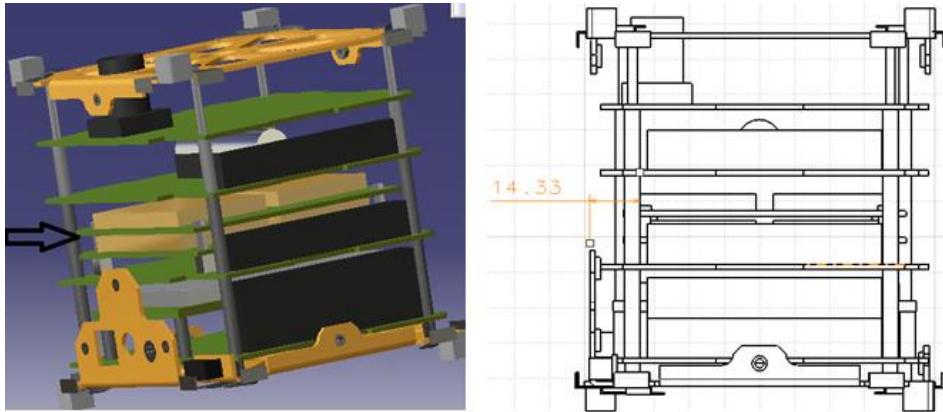
¹ Yüksek Lisans Öğrencisi, Uçak-Uzay Müh. Programı, erenza@itu.edu.tr

² Doç. Dr., Uzay Müh. Bölümü, nikbay@itu.edu.tr

³ Prof Dr., Uzay Müh. Bölümü, aslanr@itu.edu.tr

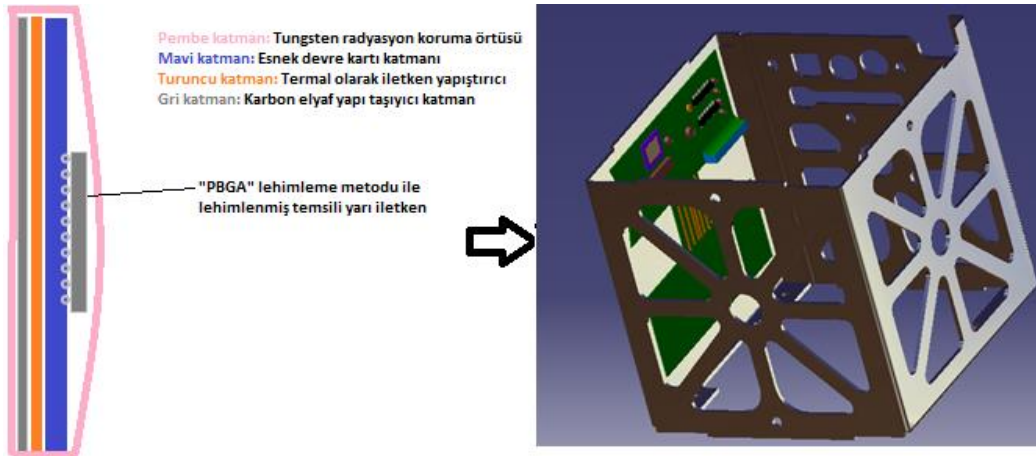
TASARIM

Tasarımda 10 cm*10 cm*10 cm boyutundaki küp uydunun Şekil 1-a'da ok ile gösterilen elektrik güç devre kartı yerinden çıkarılarak duvara gömülmesi amaçlanmaktadır. Bu sayede devre kartının kapladığı standart yuva başka bir faydalı yük kartı için kullanılabilir. Çalışmada, bu tasarımın uygulanabilmesi için gereklilikler belirtilmiş ve özgün bir tasarım uygulanmıştır. Tasarımda devre kartı duvarda konumlanacağından küp uydularda devre kartı yerleştirme standardı PCI 104'te değişiklik yapmadan yerleşim sağlanabilmesi ile ilgili geometrik kısıtlar Şekil 1-b'de gösterilmiştir.



Şekil 1: a) Yan duvarları olmadan küp uydunun standart PCI soketlerinin görüntüsü (İTÜ P-Sat1) b) PCI 104 soketleri ile duvar arasındaki mesafenin gösterimi

Standart devre kartları FR4 isimli cam elyaf takviyeli kompozittir. Duvara bu kartın gömülmesi yerine esnek uygulamalar için kullanılan bakır polyimid ince filminin gömülmesi sağlanır. Duvar malzemesi standart küp uydularda alüminyum malzemelerden yapılır. Mekanik dayanım, yapıştırma için yüzey oluşturma, termal iletkenlik koşulları göz önüne alınarak karbon elyaf takviyeli plastik kullanılması önerilmiştir. Devre katmanını olarak bakır polyimid, yapısal taşıma görevindeki karbon elyaf plakaya gömülür. Matic'in sınıflandırmasına göre Tip 2 çok fonksiyonlu yapı elde edilir. Şekil 2'de çok fonksiyonlu yapının katmanları görülmektedir.



Şekil 2: Tasarlanan çok fonksiyonlu piko uydu duvar panelinin katmanları ve tek duvarda uygulamasının temsili

Tasarlanan çok fonksiyonlu yapının uydu duvarında görünümü Şekil 2'deki gibidir. İlgili katmanları, malzemeleri ve tercihleri neden kullandıklarını sıralayabiliriz:

- Dupont Pyralux ince film: İletken ve iletken olmayan (dielektrik) tabaka olmak üzere FR4'ten daha üstün özellikleri vardır. Bunun yanında çok fonksiyonlu yapılar

oluşturulmasında uygulamada sağladığı boyutsal ve davranış kolaylıkları sayesinde tercih edilmektedir. [G.S. Aglietti, 2007] Örneğin NASA Mars görevlerinde; MER03, Spirit, Opportunity robotlarında esnek devre kartları kullanılmıştır. [Dupont , 2013] İlgili konuda NASA teknoloji özetleri sitesinden bilgi alınabilir. [NASA , 2013]

- Karbon elyaf plaka: Tasarlanacak model yerine yerleştirmeyi önerdiğimiz alüminyum plakadan daha mukavim olmalı ve duvarda üzerine konumlanacak ince film ve devre elemanları için mümkün olduğunca ince olmalıdır. 1 mm kalınlıktaki plakanın kupon test sonuçları elde edilmiştir.
- Epoksi: Türkiye’de termal olarak iletkenliği ölçülen epoksi bazlı yapıştırıcı olmadığından performans yapıştırıcıları ile deneme yapılabilir. “NASA Outgassing” standartlarını karşılayan termal iletken yapıştırıcılar kullanılabilir. Deneysel olarak emin olmak için oluşturulan sistem lazer flanş ile test edilebilir.
- Yüzey monte PBGA lehim hattı: Yarı iletkenlerin ve paketlemelerin daha da küçüldüğü günümüzde devre kartları için top şeklinde plastik lehim hatları devre kartında lehimleme metodu olarak kullanılmaktadır. Endüstriye cep telefonlarında kullanılmak üzere giren “PBGA” lehimleme metodu boyutsal, termal avantajlar getirmiştir. [Ho, Lee, Lee, & Lin, 1995] Özellikle uzay uygulamalarında, bu plastik lehim hatları boyutları daha da küçük olduğundan tercih edilmektedirler. Çalışmada statik yük analizleri için Texas Instruments’ın S-PBGA-100 lehim ürün geometrileri kullanılmıştır.
- Tungsten ince film kaplama: İnce film kaplama yöntemi ile tungstenin radyasyon ve termal iletkenlik özelliklerinden faydalanılır. Tungstenin çok kısa mesafede radyasyon kesmesi ve uygulanabilirliği önemlidir. Kaplama için uygun olan deneysel yöntem daldırarak ve döndürerek kaplamalardır. İTÜ’de bu imkanlar mevcuttur. [Tepehan, Ghodsi, Nilgun, & Tepehan, 1997]

FR4’e göre polyimidin ve alüminyuma göre karbon kompozitin yoğunluğunun daha az olduğunu görmek önemlidir. [Mangroli & Vasoya, 2007] Ağırlık tasarrufu uygun seçim ile sağlanabilir. Aşağıda Tablo 1’de yoğunluklar gösterilmiştir.

PCB Malzeme(Lamine)	Yoğunluk(g/cm ³)
FR4	1.8
Polyimid	1.7
Karbon kompozit	1.65
Alüminyum	2.7
Bakır	8.92
CIC	9.9

Tablo 1:Bazı malzemelerin yoğunluk tablosu [Mangroli & Vasoya, 2007]

Tablo 2’de duvar ve iç kısımdaki PCI 104 soketi arasındaki mesafeye göre geometrik kısıtları ve tasarımın olası kalınlıkları verilmiştir. Tasarım geometri aralıkları burada verilmiştir.

Kompozit kalınlığı	plaka	Esnek devre kartı kalınlığı	İzin verilen toplam kalınlık	Yarı iletkenler için kalan boyut
Max 3 mm		Max 3 mm	Max 14 mm	Max 8 mm
Tasarlanan 1mm		Tasarlanan 1 mm		

Tablo 2:Geometrik kısıtlar altında tasarım ölçüleri

TESTLER VE ÜRETİM

1. Üretim: Karbon elyaf plaka için 1 m kalınlıkta üretim yapıp kupon testleri ile çekme gerilmesi ve elastisite modülü ölçülmüştür. Böylece Alüminyum ile eşdeğer ya da daha yüksek dayanımı elde edilebileceğimiz görülmüştür.
2. Analiz-1: Abaqus programında, önerilen çok fonksiyonlu tasarım için doğal frekans analizleri yapılmıştır ve normal konumdaki devre kartı analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır.
3. Analiz-2: Çok fonksiyonlu yapıda devre kartındaki elektronik ekipmanın konumu dikey olacağından lehimlerdeki mekanik gerilmeler termal etkiler olmadan bulunmuştur.

Üretim

Kullanılan karbon kumaş AKSA Akrilik Elyaf firmasının A-38 ve A-42 kodlu ürünleridir. Yapıştırıcı katman DURATEK 1200 serisi epoksi üründür. Tablo 3'teki şekli ile numuneler hazırlanıp çekme testleri yapılmıştır. Tablo 4'te sonuçlar gösterilmiştir.

	3k-3 kat çift yönlü düz kesim	3k-3 kat çift yönlü 45 derece kesim	12k-2 kat çift yönlü düz kesim	12k-2 kat çift yönlü 45 derece kesim
	2 tane	2 tane	2 tane	2 tane
	Gerinim ve çekme deneyleri	Gerinim ve çekme deneyleri	Gerinim ve çekme deneyleri	Gerinim ve çekme deneyleri
Kesit Alanı	25mm*1mm	25 mm*1 mm	25 mm*1mm	25 mm*1 mm

Tablo 3:Kupon testi numunelerinin sınıflandırılması

TEST SONUÇLARI			Elastisite Modülü	Maksimum Çekme
1A	12k-2kat-45°	1 mm kalınlık	21.36 GPa	113 MPa
1B	12k-2kat-45°	1 mm kalınlık	28.55 GPa	146.6 MPa
2A	12k-2kat-0°	1 mm kalınlık	60 GPa	527.77 MPa
2B	12k-2kat-0°	1 mm kalınlık	90 GPa	584.89 MPa
3A	3k-3kat-0°	1 mm kalınlık	227 GPa	440.89 MPa
3B	3k-3kat-0°	1 mm kalınlık	233 GPa	440.58 MPa
4A	3k-3kat-45°	1 mm kalınlık	44 GPa	130.6 MPa
4B	3k-3kat-45°	1 mm kalınlık	41.8 GPa	130.2MPa

Tablo 4:Çekme testi sonuçları

Analiz-1

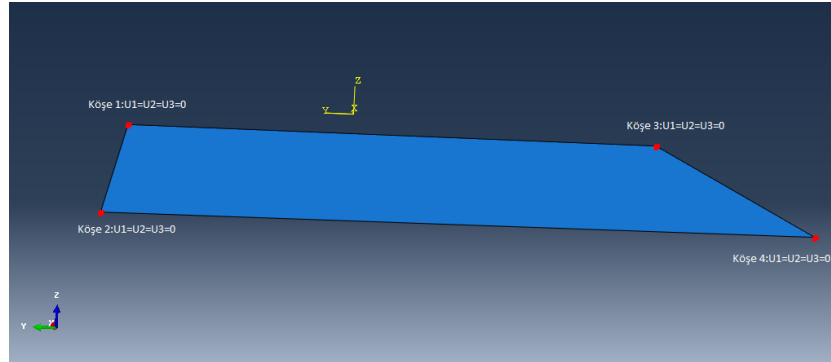
Fırlatma sırasında yoğun olarak mekanik yükler oluşmaktadır. Fırlatma aracına göre karşılanması gereken sınırlar farklı olmakla birlikte genel olarak kullanılabilir yükler Tablo 5'te gösterilmiştir.

Gereklilik	Tanım		
Mukavemet	Dizayn Limit Yüğü	Boylamsal	Enlemsel
	İvmelenme(g)	-7.5g/+5.5g	±6g
Katılık	Temel Frekans(Boylamsal)	≥90 Hz	
	Temel Frekans(Enlemsel)	≥45 Hz	

Tablo 5:Fırlatma aracına göre temel frekans ve çekim kuvveti gereklilikleri

FR4 standart devre kartı titreşim analizi: Genel olarak kullanılan devre kartı FR4 malzemesindedir ve kartların yerleşiminde şu an PCI-104 standardı kullanılmaktadır. Dört

tarafı pinli olarak sınır şartları şekil 3'teki gibi oluşturulur. Malzeme özellikleri Tablo 6'da verilmiştir.



Şekil 3: Analize sokulacak devre kartının sınır şartlarının gösterimi: $U1=U2=U3=0$

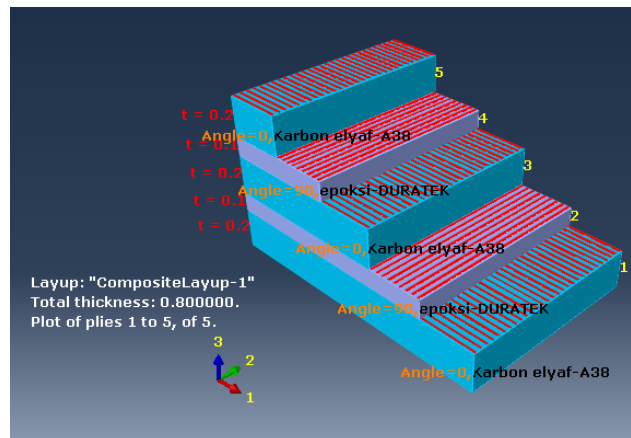
PCB Malzeme özellikleri	Elastisite modülü	Yoğunluk	Poisson
FR4	24.9 GPa	$2286 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	0.39

Tablo 6: FR4 baskı devre kartı malzeme özellikleri

Mod	Frekans(döngü/zaman) Hz
1	668.53
2	668.53
3	1143.1
4	4286.7
5	4934.3

Tablo 7: FR4 baskı devre kartının titreşim analizi sonucundaki doğal frekans değerleri(0.8 mm kalınlıkta)

Çok fonksiyonlu yapı için titreşim analizi: Çok fonksiyonlu yapıyı oluşturan yeni sistemde bakır poliyimid devre kartı katmanı karbon elyaf katman ile bir arada düşünülerek titreşim analizi yapılır. Burada karbon elyafın taşıyıcı katman bakır poliyimidin devre kartı katmanı olduğu hatırlanmalıdır. Modellemede, bakır poliyimid katmanın viskoelastik etkileri hesaba katılmadığından yapı taşıyıcı katman modellemesi yeterli olur. Bu sistemde viskoelastik etkiler elde edilen değerlerde çok büyük değişiklik yapmaz. Tablo 7 ve Tablo 8'den frekans değerlerinin karşılaştırması yapılmıştır. Sonuçta, yeni sistemde de Tablo 5'te görülen 90 Hz üzerinde titreşim frekansı elde edilmiştir.



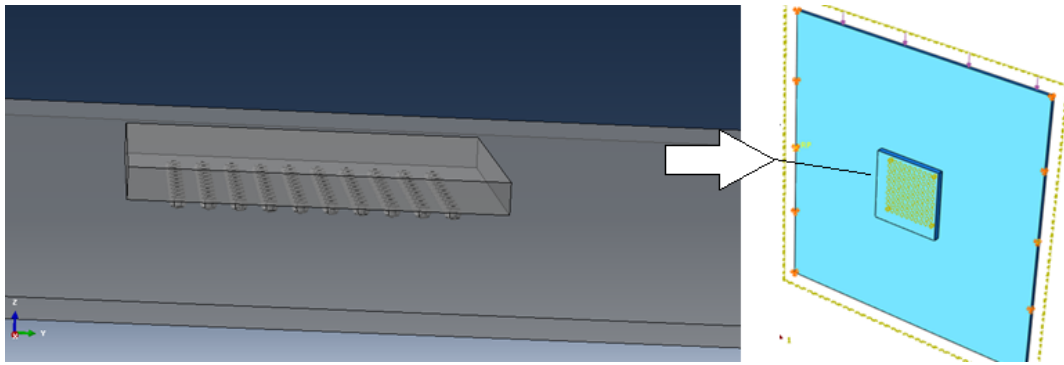
Şekil 4: Karbon elyaf plaka (Çok fonksiyonlu yapının taşıyıcı kısmı)

Mod	Frekans(döngü/zaman) Hz
1	434.085
2	434.085
3	742.012
4	2864.81
5	5024.57

Tablo 8: Çok fonksiyonlu yapı taşıyıcı kısmı doğal frekans analiz sonuçları

Analiz-2

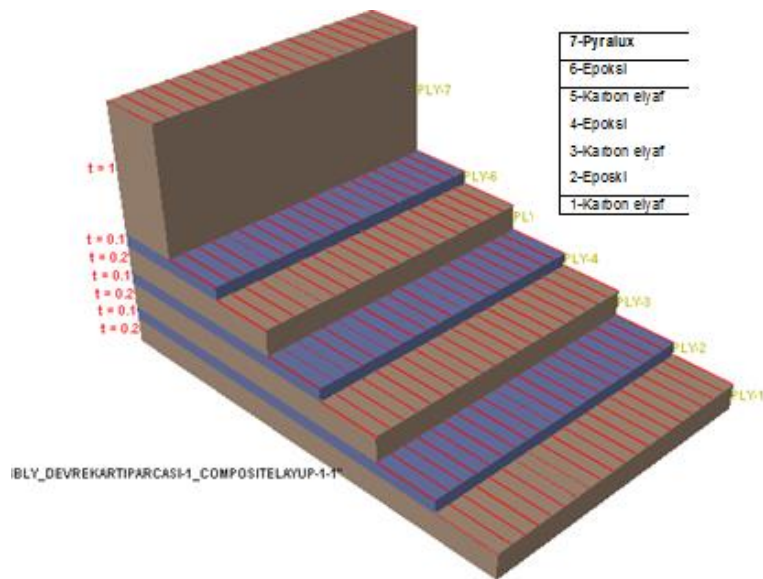
Bu kısımda lehimler modellenerek üstte yarı iletken altta çok fonksiyonlu duvar yapısı ile statik analize sokulur. Termal etkilerden bağımsız olacak öncül analiz bu çalışma kapsamında gösterilmiştir. Şekil 5'te ilgili Abaqus modeli gösterilmiştir. Tablo 9'da ise fırlatma anında gelecek yükler belirtilmiştir. Uydu duvarının ek olarak üstten bir basınca maruz kalacağı da hesaba katılmıştır.



Şekil 5: a) PPGA lehim hattı ve yarı iletkenin görünümü b) Ortasına yarı iletken montelenmiş çok fonksiyonlu yapının sınır şartlarının gösterimi

Statik yükleme	Yerçekimi etkisi(x/y/z)	Üst kısımdan gelen basınç
	10/10/10 g	5 MPa

Tablo 9: Fırlatma sırasındaki maruz kalınacak yükler için kullanılan değerler

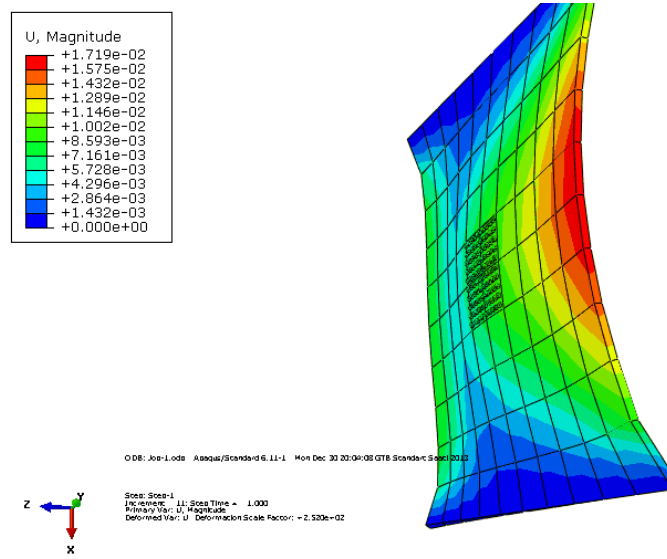


Şekil 6: Abaqus'te modellenen çok fonksiyonlu yapının katmanlarının gösterimi

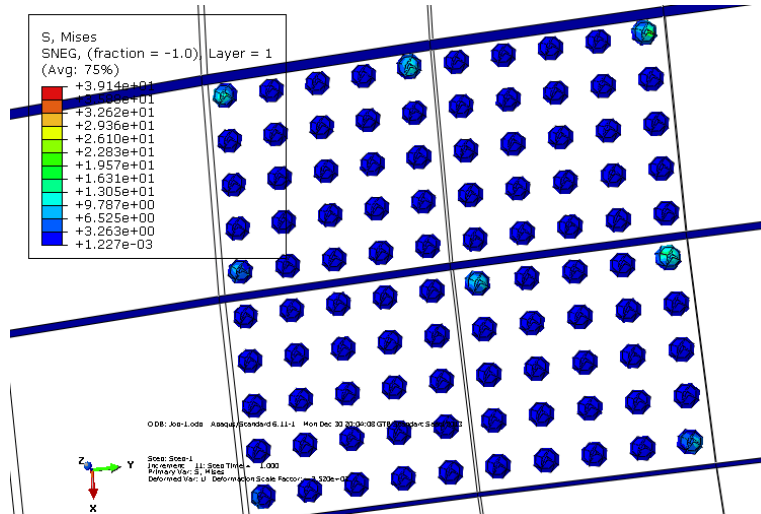
	Abaqus element türü	Abaqus element ismi	Örgü sayısı
Tek bir lehim topu	C3D10	3D Stress	542
Plaka	SC8R	Continuum Shell	1600
Yarıiletken	C3D8/C3D8R	3D Stress	1250
Malzeme özellikleri	Elastisite modülü(Mpa)	Poisson oranı	Yoğunluk(ton/mm ³)
Lehim	1000	0.3	2×10^{-9}

Tablo 10: Abaqus programında modelleme elemanları

Şekil 6'da çok fonksiyonlu yapının katmanları gösterilmiştir. Şekil 7'de ise fırlatma sırasında üst kısımdan gelecek basınç ve üç ekseninde yer çekim ivmesi uygulanması sonucu yer değiştirme gösterilmiştir.



Şekil 7: Çok fonksiyonlu yapının statik yükleme sonucu yer değiştirme grafiği



Şekil 8: Çok fonksiyonlu yapının üzerinde elektronik paketin altında yer alan lehim topları üzerindeki gerilmelerin gösterimi

Şekil 8'de termal değişiklikler düşünülmeden gerilmeler gösterilmiştir. Yarı iletken görünmez yapılarak bu görüntü sağlanır. Şekil 7'deki sistemin lehimlerinin yakından görüntüsüdür.

Literatür ile uyumlu olarak kenar lehimlerde en yüksek gerilmeler gözlemlenmiştir. [Chen, Wang, & Yang, 2008] [Ghaffarian, 2010] [Ho, Lee, Lee, & Lin, 1995] Bu değerler emniyet sınırları içerisinde.

SONUÇ

Bu çalışma kapsamında bir tasarım metodu anlatılmıştır. Farklı büyüklükteki uydular için aynı amacın izlendiği çalışmalar göz önüne alınarak özgün bir tasarım mantığı ile uzay ortamında kısıtlar hatırlatılarak tasarım hazırlanmıştır. [Jang, ve diğerleri, 2011] Yapılması gerekli olan testlerden bazıları çalışma kapsamında sunulmuştur. Bunlar; uygun kompozit malzemenin üretimi-çekme testi, doğal frekans analizi ve uydu baskı devre kartında lehimlere etki eden gerilmelerdir.

Tasarım sürecinde küp uyduda PCI 104 soketlerine yerleştirilen FR4 malzemedeki yapılan standart güç devre kartının bakır polyimid esnek devre kartı ile değiştirilerek duvara gömüldüğü hem devre kartı hem de yapısal olarak davrandığı tasarım oluşturulmuştur. Uzay ortamında radyasyon, sıcaklık değişiklikleri, mekanik bozulmalar gibi etkenler göz önüne alınarak tasarım döngüsü oluşturulmuştur. Bunun için ürün özellikleri, uygun malzemeler tasarım önerisi için sunulmuştur. Ancak, sıcaklık ve radyasyon testleri çalışma kapsamında sunulmamıştır. Tasarımda FR4 baskı devre kartı yerine uzay için geliştirilen ticari ürün olan ince film devre kartları ve mekanik özellikleri hesaba katılmış minimum kalınlık düşünülmüştür. Termal iletkenliği bozmadan karbon elyaf plaka ile birleştirilmesi düşünülmüş, çiplerdeki ısının dağıtımı için uygun tasarım sağlanmıştır. Radyasyona karşı daha iyi koruma için literatürde daha önce kullanılmış tungsten örtü ile kaplama tasarımda düşünülmüştür. [Jang, ve diğerleri, 2011] Bununla ilgili pratik adımlar tanımlanmış, Türkiye şartlarında yapılabilecek yöntem ve şartlar belirtilmiştir. Tasarlanan sistemin üzerine yerleştirilecek devre elemanlarının “PCI 104” soketlerindeki diğer kartlara değmemesi gerektiği düşünülmüş ve buna dikkat edilmiştir.

Tasarımda alüminyum yerine önerilen karbon elyaf plakalar üretilmiş, çekme testleri yapılarak yoğunluk ve elastisite modülleri belirlenmiştir. Bu testler sonucunda çok ince olarak laminasyonu yapıp üretilen karbon plakaların analizlerde gerekli katılığı ve çekme mukavemetini sağladığı görülmüştür. Deneysel çalışmanın önemi, önerilen plaka inceliklerinde gerekli mukavemeti elde edebildiğimizi deneysel olarak görmemizdir. Altsistemin tasarımı ile uzay ortamının simülasyonu için gereken testlerden dinamik yükleme(doğal frekans ölçümü) testleri sonlu elemanlar analiz programı Abaqus ile yapılmıştır. Fırlatma sırasında rezonans gibi etkilere maruz kalmamak için fırlatma aracının frekans değerinden yukarıda bir temel değer elde edilmiştir. Burada en önemli etkenin kompozitin katılığı-elastisite modülü- yüksek olması gerektiği görülmüştür. Ayrıca uzayda güvenilirliğin önemli bir durum olduğu göz önüne alınarak literatürde sık rastlanmayan bir çalışma ile uzay elektronik kartlarında standart olmayan bu tasarım çözümü için kartlar ve yarı iletken arasında lehim topları modellenerek “Von Mises” gerilmeleri incelenmiştir. Modellemede literatürdeki çalışmalara dikkat edilmiş ancak çalışma kapsamında sıcaklık etkileri çalışılmadığı için sadece basınç etkileri üzerine sonuçlar bildirilmiştir. Sıcaklık etkileri çalışılırsa uzaydaki ısı değişimlerinin gerilme olarak lehimlerde bıraktığı iz çalışma konusu olacaktır. İleride yapılabilecek hem deneysel hem modelleme çalışmaları mevcuttur.

- Tasarlanan çok fonksiyonlu yapı için termal testlerin yapılması,
- Termal olarak iletken ara yüzeyler için daha iyi iletken ara malzeme ya da yapıştırıcıların üretimi,
- Analizi gerçekleştirilen “PBGA” lehimler için termoplastik kısıtlar altında yeni tasarım için analizlerin gerçekleştirilmesi,

- Viskoelastik nüvelerin darbe sönümlenme etkisinin devre elemanları üzerindeki etkisinin incelenmesi,
- Daha büyük ölçekli uydular için benzer tasarımların gerçekleştirilmesi,
- Deneysel olarak yapılacak lehim testleri ile program analiz sonuçlarının karşılaştırılması.

Bu çalışma çok fonksiyonlu yapıların uydularda uygulanması ve esnek devre kartlarının lehim gerilmelerinin uzay sistemleri için uygulamaları açısından önem arz etmektedir.

Kaynaklar

Barnett, D. M., & Rawal, S. P. (1999). Multifunctional Structures Technology Experiment On Deep Space 1 Mission. *IEEE AES Systems Magazine*, 13-18.

Chen, Y., Wang, C., & Yang, Y. (2008). Combining vibration test with finite element analysis for the fatigue life estimation of PBGA components. *Microelectronics Reliability*, 638-644.

Dupont . (2013, 12 08). *Dupont Pyralux*.

http://www2.dupont.com/Packaging_and_Circuits/en_US/assets/downloads/pdf/Pioneer_profile.pdf adresinden alındı

Eren, Z. (2014). *Çok Fonksiyonlu Yapıların Küçük Uydularda Uygulanması. Lisans Bitirme Çalışması*. İstanbul: İTÜ.

G.S. Aglietti, C. S. (2007). Multifunctional structure technologies for satellite applications. *The Shock and Vibration Digest* 39, 381-389.

Ghaffarian, R. (2010). *Reliability of Area Array Packages with 1500–2500 I/Os*. NASA Electronic Parts and Packaging (NEPP) Program Office of Safety and Mission Assurance. NASA.

Ho, T. H., Lee, J. Y., Lee, R. S., & Lin, A. W. (1995). Linear Finite Element Stress Simulation of Solder Joints on 225 I/O Plastic BGA Package Under Thermal Cycling. (pp. 930 - 936). Las Vegas: Electronic Components and Technology Conference.

J.Guerrero, E. (2001). Multifunctionalstructures, In: Proceedings of AIAA Space 2001 Conference and Exposition. Albuquerque, NM: AIAA.

Jang, T. S., Oh, D. S., Kim, J. K., Kang, K. I., Cha, W. H., & Rhee, S. W. (2011). Development of multifunctional composite structures with embedded electronics for space application. *Acta Astronautica*, 240–252.

Mangroli, A., & Vasoya, K. (2007, December). Optimizing thermal and mechanical performance in PCBs. *Global SMT & Packaging*, s. 10-12.

Matic, P. (2003). Overview of Multifunctional Materials. *Smart Structures and Materials 2003: Active Materials: Behavior and Mechanics* (s. 61-69). SPIE .

Momoda, L. (2005). The Future of Engineering Materials: Multifunction for Tailored Structures. *Frontiers of Engineering: Reports on Leading-edge engineering*.

NASA . (2013, 12 08). *NASA Technology Brief*.

<http://www.techbriefs.com/component/content/article/14762> adresinden alındı

Rawal, S. P., Barnett, D. M., & Martin, D. E. (1999). Thermal Management for Multifunctional Structures. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 379-383.

Tepehan, F. Z., Ghodsi, F. E., Nilgun, O., & Tepehan, G. G. (1997). Determination of optical properties of amorphous Ta₂O₅ films deposited by spin and dip-coating methods. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 311-321.