

3 BİRİMLİK BİR KÜP UYDU İÇİN GÖVDE YAPISI TASARIMI

Batuhan Topcu¹, Ceren Cansu Güvenç² ve Ceyhun Tola³
Türk Hava Kurumu Üniversitesi, Ankara

ÖZET

Çalışma kapsamında, 3 birimlik bir küp uyduya ait alt sistemleri, fırlatma ve uydu görev süresi boyunca yapısal bütünlüğünü kaybetmeden ve plastik deformasyona uğramaksızın muhafaza edecek bir gövde yapısının tasarlanması amaçlanmıştır. Tasarlanan gövde yapısı sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla statik, dinamik ve ısı yükleri altında analiz edilmiş ve bu analizlerin sonuçları göz önüne alınarak mümkün olduğunca hafif ve maliyeti düşük bir yapının geliştirilmesi sağlanmıştır. Bu amaçla, öncelikle görev yapısına en uygun malzemenin seçimi yapılmış daha sonra tasarımın sonlu elemanlar modeli Abaqus ticari yazılımında oluşturularak küp uydunun maruz kaldığı yükler altında oluşan gerilme ve gerinim dağılımları elde edilmiştir. Yapısal analiz sonuçları yardımıyla, tasarlanan geometri güncellenmiş ve uydu gövde prototipinin kavramsal tasarım aşaması tamamlanmıştır.

GİRİŞ

1957 yılında Sputnik-1'in dünya yörüngesine yerleştirilmesinden bu yana uydu sistemleri, iletişim kurma, konum belirleme ve haritalandırma başta olmak üzere pek çok farklı amaçla kullanılmaktadır. Gerek sivil gerekse askeri alanda sağladıkları faydalar sebebiyle yerli uydu sistemlerinin geliştirilmesi birçok ülke açısından kritik öneme sahiptir. Yüksek teknoloji ve ciddi anlamda tecrübe gerektiren uydu tasarım sürecinde karşılaşılan problemlerin üniversiteler bünyesinde canlandırılarak ölçeklendirilmiş şekilde öğrencilere sunulduğu küp uydu projeleri son 15 yılda giderek yaygınlaşmıştır. Küp uydu projeleri kapsamında kazanılan tecrübe ve denenen yeni teknolojiler ticari uyduların gelişimine ivme kazandırmıştır.

Standart küp uydulara ait milli alt sistemleri tasarlamak üretmek ve yörüngeye yerleştirmek ülke ekonomisine birçok fayda sağlamaktadır. Öncelikle sistem tasarımı sırasında kazanılan deneyim uzun vadede ticari uyduların bağımsız olarak tasarlanmasının dolayısıyla teknoloji için harcanan bütçenin ülke sınırları içerisinde kalmasının önünü açacaktır. Buna ek olarak, tasarlanan ve kalifikasyonu tamamlanan küp uydu alt sistemlerinin kısa vadede ihraç edilmesiyle kazanılacak olan gelir de ülke ekonomisine katkı sağlayacaktır.

Literatürde küp uyduların ve alt sistemlerinin geliştirilmesi üzerine hazırlanan pek çok farklı yayın mevcuttur. Aslan ve beraberindekiler, çalışmalarında, Türkiye'nin ilk yerli haberleşme test küp uydusu olan Türksat 3USAT'ın tasarım sürecini özetlemişlerdir [Aslan, Yağcı, Sofyalı ve diğerleri, 2011]. Aynı yıl yayımlanan çalışmada, Cihan ve beraberindekiler 3 birimlik bir küp uydu olan ITU-pSAT II uydusunun tasarım ve analizlerini gerçekleştirmişlerdir [Cihan, Çetin, Kaya ve İnalan, 2011]. Herrera - Arroyave ve beraberindekiler, 2016 yılında hazırladıkları çalışmada, yapısal

¹ Uzay Mühendisi, E-posta: bt.topcu@gmail.com

² Uzay Mühendisi, E-posta: cerencansuguvenc@gmail.com

³ Dr. Öğretim Üyesi, Uzay Müh. Böl., E-posta: ctola@thk.edu.tr

gereksinimleri karşılayan küp uydu yapılarının tasarlanması sürecinde takip edilmesi gereken adımları özetlemiştir [Herrera-Arroyave, Ferrer-Pérez, Colín, ve Bermúdez-Reyes, 2016].

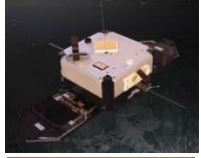
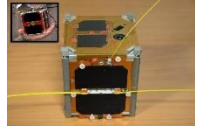
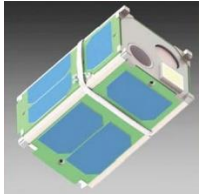
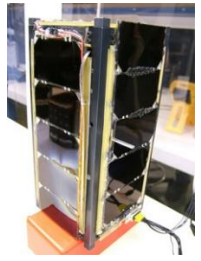
Günümüzde farklı üreticiler tarafından tasarlanan ve test edilen farklı boyutlardaki kalifiye küp uydu gövde yapılarını temin etmek mümkündür. Ancak tasarlanan uyduların üzerinde bulunan alt sistemlerin yük dağılımları ve uydunun maruz kalacağı yükler, uydu görev türü ve fırlatma aracı seçimine göre değişkenlik göstermektedir. Bu durumda görev türüne uygun bir gövde yapısının pratik şekilde geliştirilmesi önem arz etmektedir.

Çalışma kapsamında, boyutları 10 cm x 10 cm x 30 cm olan 3 birimlik bir küp uydunun bütün alt sistemlerini muhafaza ederek, fırlatma yükleri ile birlikte uydunun yere yakın yörüngede geçireceği sürede maruz kalacağı öngörülen bütün yüklerle dayanacak; mümkün olduğunca hafif ve ekonomik bir iskelet yapısının geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu sayede, tasarlanan nihai iskelet ileriki aşamalarda üretilip test edilerek tatmin edici sonuçlar elde edilirse 3 birimlik küp uydu sistemlerinde kullanılabilir.

Küp Uydu Sistemleri

Küp uydular, tasarım bütçesi ve görev türlerine bağlı olarak farklı kategorilere ayrılır. Tablo 1’de sık kullanılan küp uydu sistemlerine ait maksimum kütle ve geometrik boyut bilgileri özetlenmiştir.

Tablo 1: Küp Uydu Sistemleri Standart Kütle ve Boyutları [Gunter’s Space Page, 2018]

<i>Tür</i>	<i>Boyutları [cm] (En x Boy x Yükseklik)</i>	<i>Maks. Kütle [kg]</i>	<i>Örnek</i>	
0.5U	10 x 10 x 5	0.665	AeroCube 6	
1U	10 x 10 x 10	1.330	İTÜpSAT 1	
1.5U	10 x 10 x 15	1.995	FIREBIRD	
2U	10 x 10 x 20	2.660	ION	
3U	10 x 10 x 30	3.990	TURKSAT-3USAT	

YÖNTEM

Geometri ve Malzeme Özellikleri

Çalışma kapsamında, Şekil 1’de gösterilen 3 birimlik küp uydu iskeleti Solidworks ortamında tasarlanmıştır. Küp uydu panelleri, 3 mm kalınlığa sahiptir.



Şekil 1: 3 Birimlik Küp Uydu Yapısı

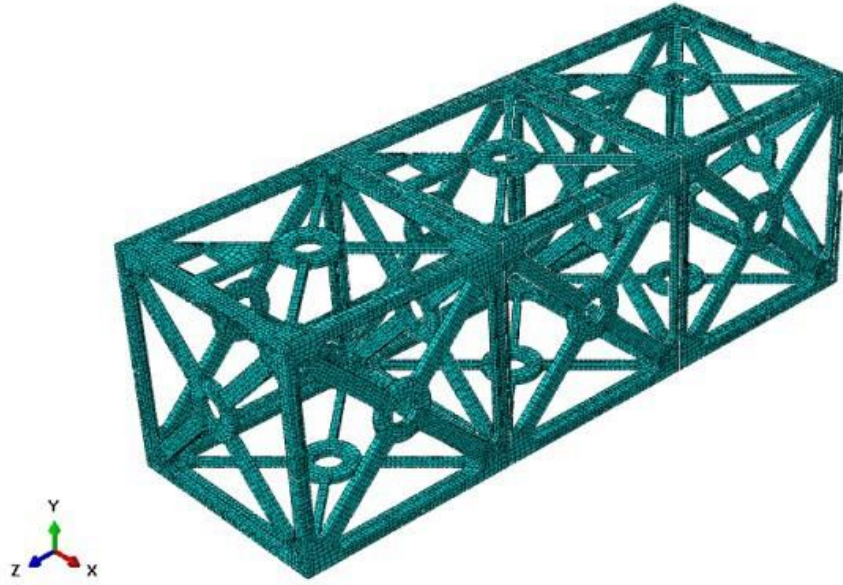
Uydu gövde yapı malzemesinin seçimi sırasında, küp uydu sistemlerinin yapılarında kullanılan malzemeler karşılaştırılarak ağırlık, dayanım ve maliyet unsurları göz önüne alınmıştır. Araştırma sonucunda uydu yapısının Al7075 T651’ten tasarlanması uygun bulunmuştur. Al7075 T651 malzemesinin özellikleri Tablo 2’de özetlenmiştir.

Tablo 2: Al7075 T651’in Mekanik Özellikleri [Matweb, 2018; Khalifa ve Sharaf-Eldin, 2013]

Sembol	Açıklama	Değer	Birim
E	Elastisite Modülü	71.7	GPa
ν	Poisson Oranı	0.33	-
ρ	Yoğunluk	2810	kg/m ³
k	İletkenlik	130	W/(m.K)
α	Isıl Genleşme Katsayısı	25.2	$\mu\text{m}/(\text{m}.\text{°C})$
cp	Özgül Isı	960	J/(kg. °C)
σ_{akma_std}	24 °C’de Akma Dayanımı	503	MPa
$\sigma_{akma_sıcak}$	316 °C’de Akma Dayanımı	45	MPa
ϵ	Soğurganlık	0.81	-

Sonlu Elemanlar Modeli

Farklı panellerin montajından oluşan küp uydu yapısının sonlu elemanlar modeli Abaqus 6.12 ticari yazılımında hazırlanmış olup; bu model 226271 düğüm noktası ve 33764 ikinci mertebeden kübik elemandan oluşturulmuştur (Şekil 2).



Şekil 2: Küp Uydunun Sonlu Elemanlar Modeli

Modal Analizler ve Sonuçları

3 birimlik küp uydu yapısının serbest titreşim davranışı, Polar Satellite Launch Vehicle (PSLV) fırlatma aracının uçuş süresince ürettiği titreşim frekansları göz önüne alınarak tasarlanmıştır. Fırlatma süreci boyunca oluşabilecek rezonansları önlemek amacıyla, küp uydunun doğal frekans değerleri 100 Hz'in üzerinde olmalıdır [Süer, Yakut, Oran ve Aslan, 2014].

Küp uydu yapısına ait doğal titreşim analizleri boş uydu yapısı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Burada amaç, uydu içerisine yerleştirilmesi planlanan kart yapılarının katmış olduğu ek katılığın (rijitliğin) göz ardı edilmesi ve olası en düşük doğal frekans sonuçlarının elde edilmesidir. Boş küp uydu iskeletinin serbest titreşim analizlerinden elde edilen sonuçlar Tablo 3'te özetlenmiştir.

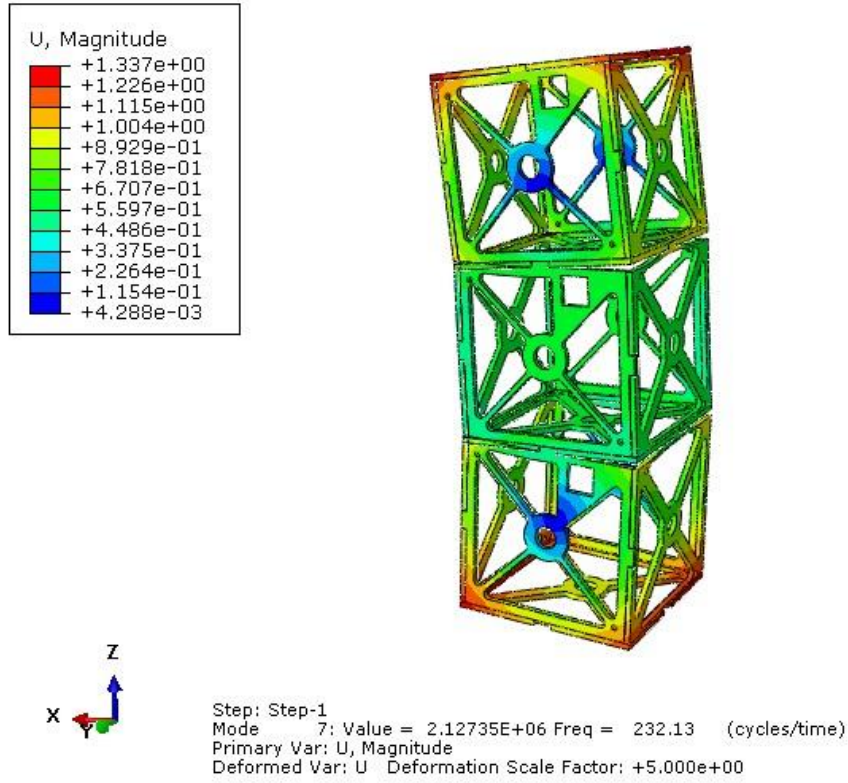
Tablo 3: Modal Analiz Sonuçları

Mod	Frekans [Hz]
1	232.13
2	326.54
3	461.72
4	546.04
5	645.17

Modal analiz sonuçlarına göre, en düşük frekans değeri yaklaşık 232.13 Hz olup (Şekil 3) bu değer kritik eşiğin (100 Hz) üzerindedir.

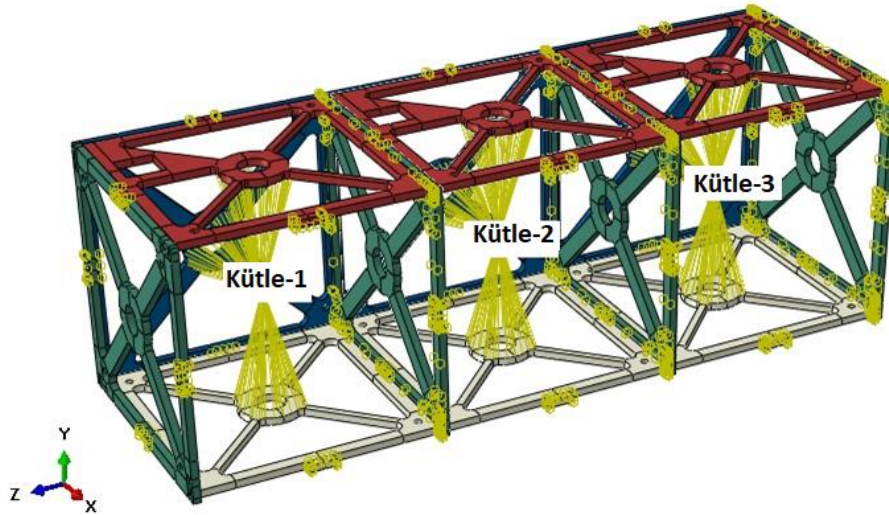
Fırlatma Analizleri ve Sonuçları

Tasarlanan küp uydu yapısı, fırlatma süreci boyunca oluşan ivme yüklerine herhangi bir plastik deformasyona uğramaksızın dayanabilmelidir. Fırlatma yüklerinden kaynaklı uydu yapısı üzerinde oluşan gerilme dağılımını tespit etmek amacıyla statik analizler gerçekleştirilmiştir. PSLV fırlatma aracının verilerine göre ivme yükleri "z" ekseninde 11 g, "x" ve "y" eksenlerinde ise 6 g'dir [Raviprasad ve Nayak, 2015].



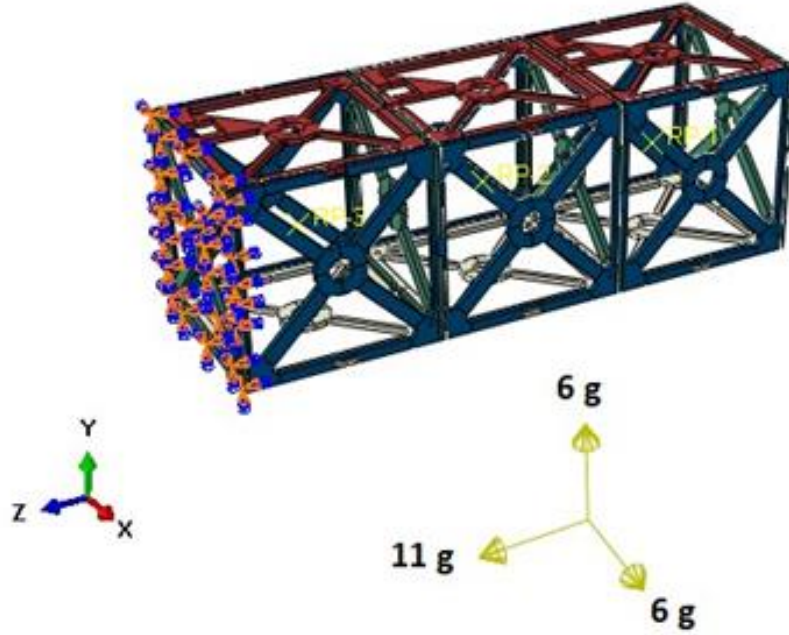
Şekil 3: Mod – 1 (232.13 Hz)

Statik analizler kapsamında, küp uydunun her bir birimine (1U) ait kartların ve ekipmanların kütleleri, uydunun tam yüklü olduğu varsayımı altında noktasal olarak modellenmiş ve uydu yapısının ilgili bölümlerine bağlanmıştır (Şekil 4).



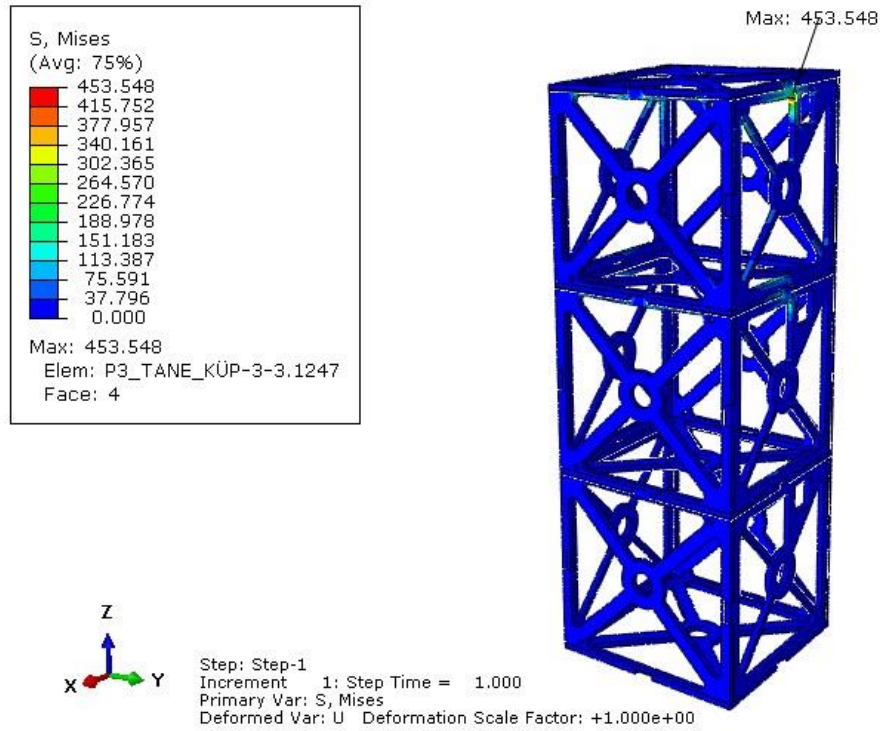
Şekil 4: Uydu Yapısındaki Yüklerin Noktasal Olarak Modellenmesi

En kötü senaryoyu analiz etmek amacıyla yapının üst yüzeyi “z” eksenı yönünde sabitlenerek ivme yükleri sisteme uygulanmıştır (Şekil 5).



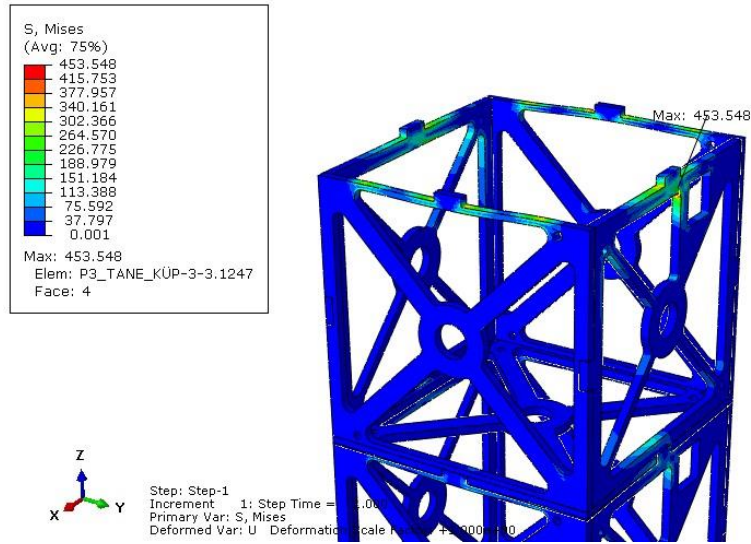
Şekil 5: Statik Analizlerde Kullanılan Sınır Koşulları ve Yükler

Statik analiz sonuçlarına göre uydu yapısı üzerinde fırlatma aracının ivme yüklerinden kaynaklı olarak oluşan en yüksek gerilme değeri 453.548 MPa'dır. Bu analiz sonucunda oluşan gerilme dağılımları Şekil 6, 7 ve 8'den incelenebilir.

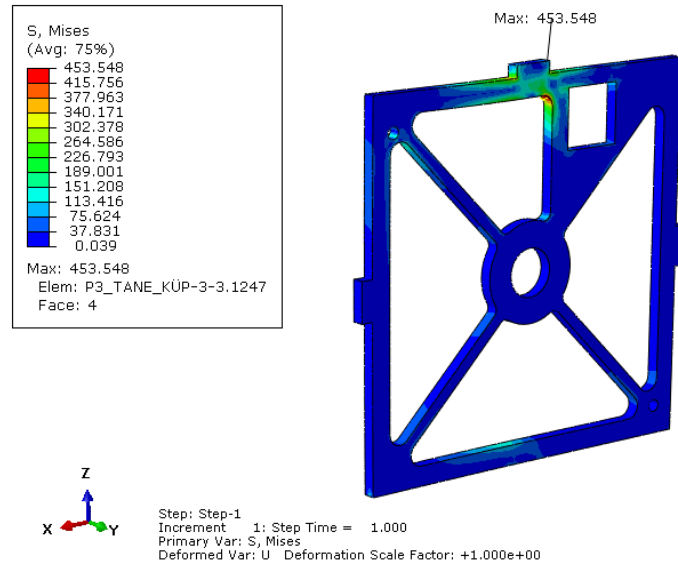


Şekil 6: Fırlatma Yükleri Sonucunda Oluşan Von Mises Gerilmesi Dağılımı [MPa]

Al 7075 T651 malzemesinin akma dayanımının 503 MPa olduğu göz önüne alındığında, fırlatma yükleri altında uydu yapısının sahip olduğu güvenlik toleransının $503/453.548 = 1.1$ olduğu hesaplanmıştır.



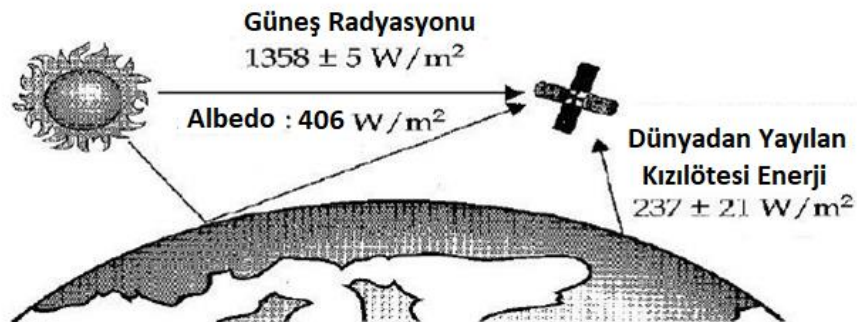
Şekil 7: Fırlatma Yükleri Sonucunda Üst Panellerde Oluşan Von Mises Gerilmesi Dağılımı [MPa]



Şekil 8: Fırlatma Yükleri Sonucunda Kritik Panelde Oluşan Von Mises Gerilmesi Dağılımı [MPa]

Isı Transferi Analizleri ve Sonuçları

Küp uydu yapısı ve alt sistemleri, yörüngede geçirdiği görev süresi boyunca güneşten gelen radyasyon, dünyadan yansıyan albedo ve dünyadan yayılan kızılötesi enerji gibi ısı yüklerine maruz kalmaktadır (Şekil 9).



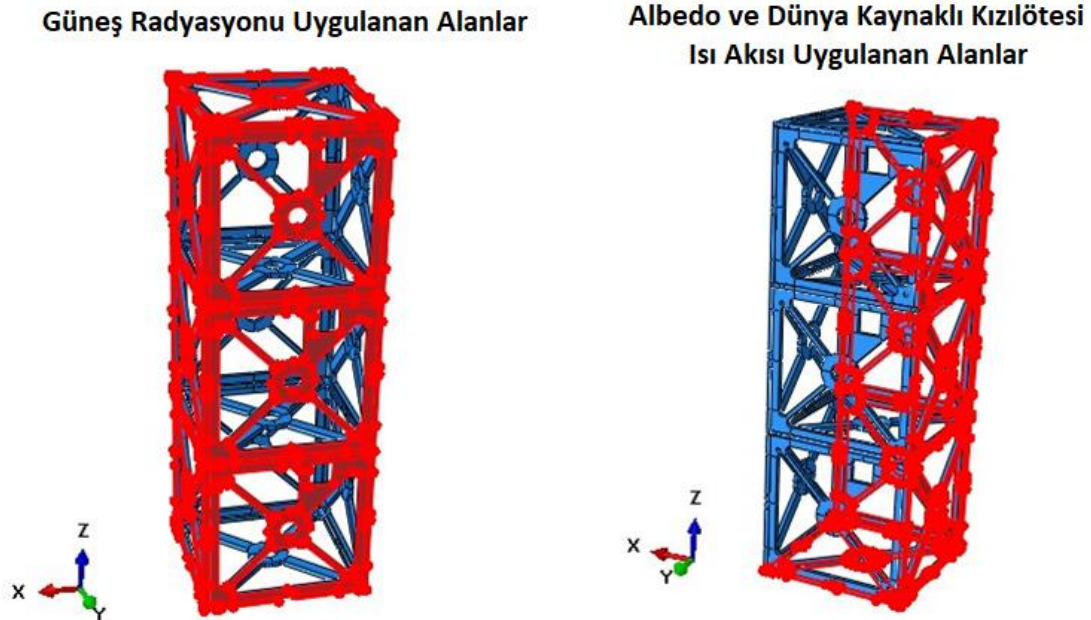
Şekil 9: Yere Yakın Yörüngedeki Isıl Yükler [Lahrachi, 2017]

Isı transferi analizleri kapsamında uydunun dünya yörüngesindeki periyodu boyunca uydu yapısı üzerinde oluşan sıcaklık dağılımının zamanla değişimi en kötü durum senaryosu dikkate alınarak analiz edilmiştir. Küp uydunun 600 km irtifadaki yere yakın yörüngeye yerleştirilmesi planlanmıştır. Bu durumda, küp uydunun periyodu 5801 s olarak belirlenmiş ve bir süre boyunca albedo ve güneş radyasyonu için toplam maruz kalma süresinin 2127 s olduğu hesaplanmıştır [Lahrichi, 2017]. Güneş ışınımına karşılık gelen ısı akıları, albedo ve dünya kızılötesi enerjisi sırasıyla 1363 W / m^2 , 406 W / m^2 ve 237 W / m^2 olarak analizlere dahil edilmiştir. Özetle, küp uyduya uygulanan ısı akısının zamanla değişimi Şekil 10'da gösterildiği gibidir.



Şekil 10: Isı Akılarının Zamanla Değişimi

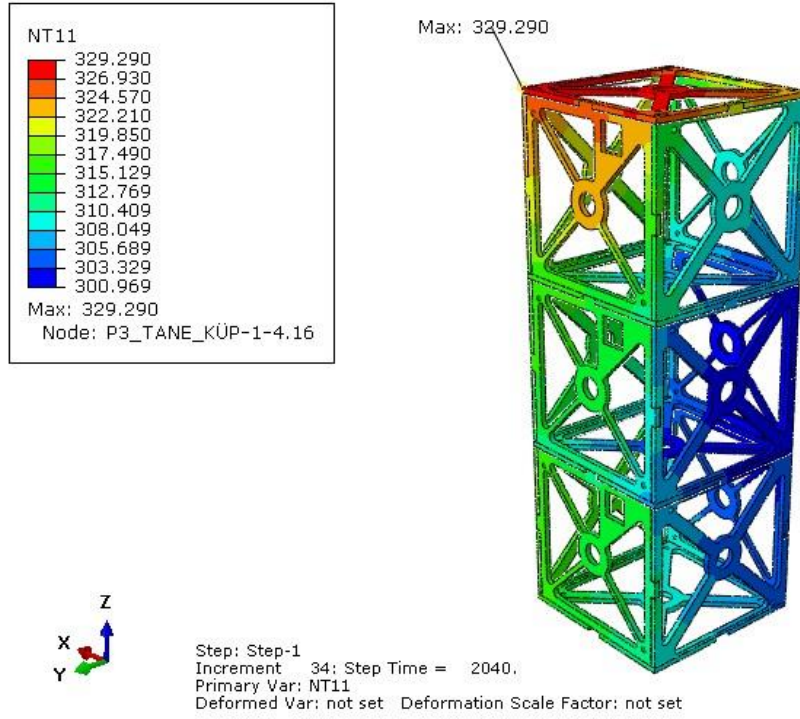
Isı akılarının uygulama bölgeleri, küp uydu için en kötü durumu analiz etmek üzere, Şekil 11'deki gibi seçilmiştir. Ayrıca, küp uydu yapısı, sahip olduğu sıcaklığın bir sonucu olarak ışınlam ile ısı kaybetmektedir.



Şekil 11: Küp Uydu Yüzeylerine Uygulanan Isı Akıları

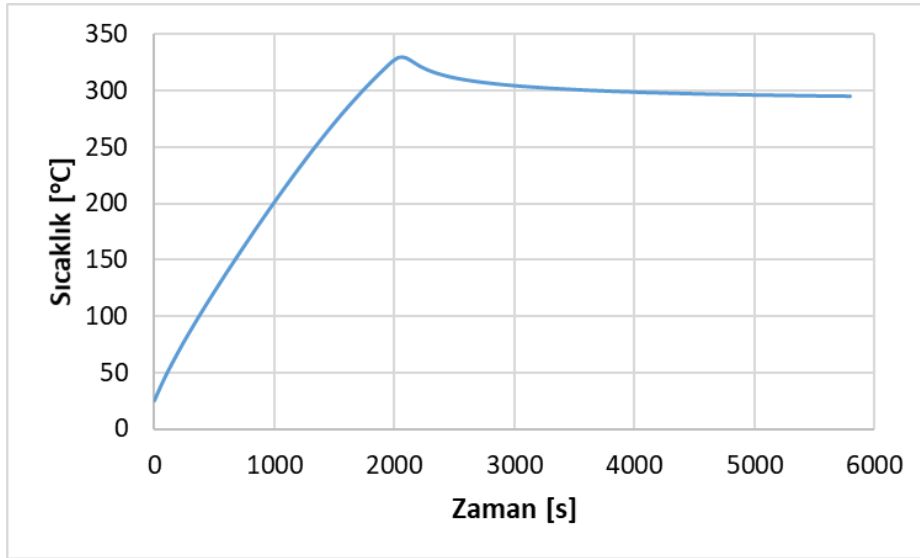
Isı transferi analizleri kapsamında küp uydu yapısının başlangıç sıcaklığının $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ olduğu varsayılmıştır. Yukarıda bahsedilen en kötü durum senaryosundaki ısı yükleri göz önüne alınarak, uydunun yörünge periyodu içerisinde oluşacak en yüksek sıcaklığı bulmak amacıyla 60 saniyelik çözüm hassasiyetine sahip ısı transferi analizleri gerçekleştirilmiştir.

Analiz sonuçlarına göre, uydu üzerindeki en yüksek sıcaklık dağılımı periyodun 2040'ıncı saniyesinde oluşmuş olup bu dağılım Şekil 12'de gösterilmiştir.



Şekil 12: Küp Uydu Üzerinde Sıcaklık Dağılımı (T=2040s) [°C]

Isı transferi analiz sonuçlarına göre uydu yapısı üzerinde en yüksek sıcaklığa sahip düğüm noktası sıcaklığının yörünge periyodu boyunca değişimi Şekil 13'ten incelenebilir.



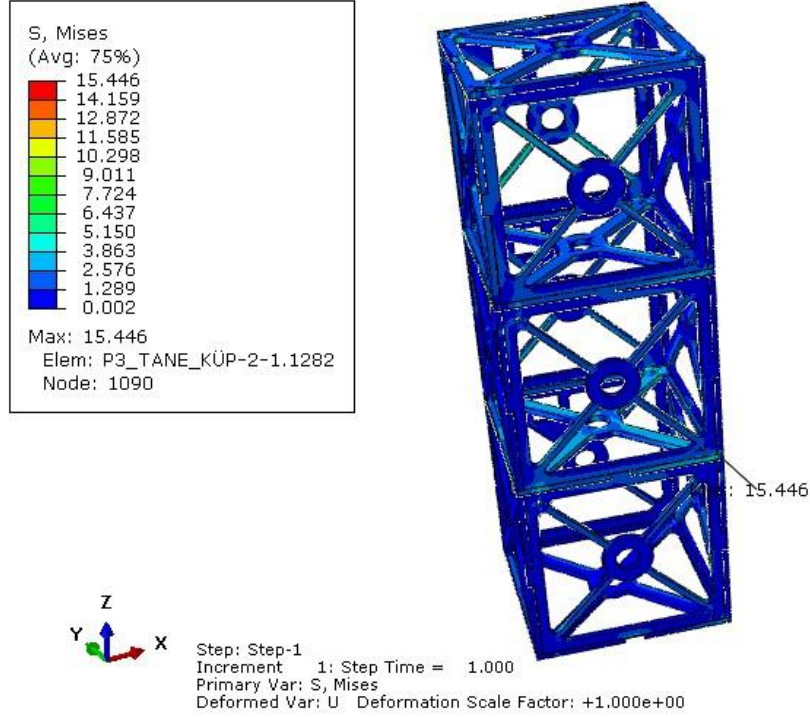
Şekil 13: En Sıcak Düğüm Noktası Sıcaklığının Zamanla Değişimi

Isıl Gerilme Analizleri ve Sonuçları

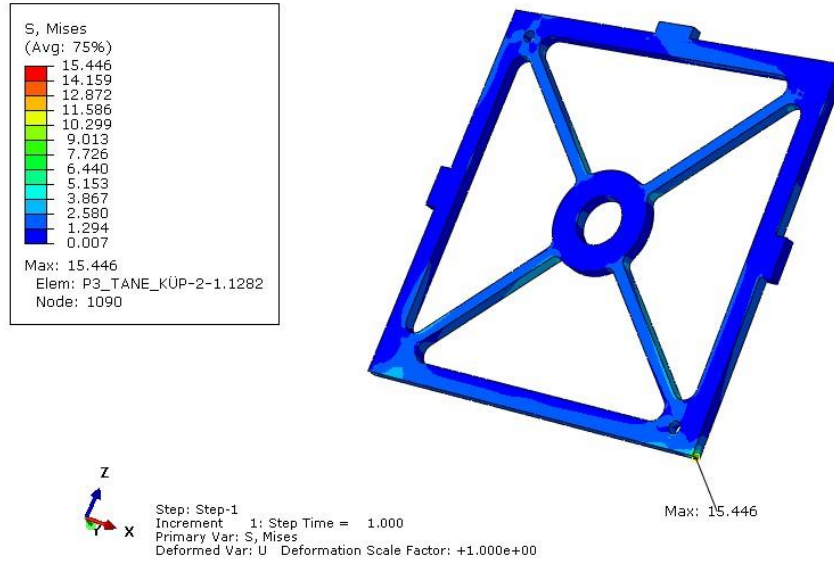
Isıl gerilme analizleri, yörüngede görev yapan uydu yapısının üzerindeki sıcaklık değişiminden kaynaklı gerilme dağılımını elde etmek amacıyla yürütülür. Bu analizlerde yük girdisi olarak ısı transferi analizlerinden elde edilen sıcaklık bilgileri kullanılır.

Küp uydu montajının 25 °C'lik standart koşullarda yapılacağı, bu sebeple montaj anında uydu üzerinde hiçbir ısıl gerilme bulunmayacağı varsayılmıştır. Daha sonra, yörüngedeki görev süresi boyunca uydu üzerindeki sıcaklığın zamana göre göstermiş olduğu değişim bilgisi kullanılarak ısıl gerilme analizleri gerçekleştirilmiştir.

Sıcaklık değişiminden kaynaklanan ısıl gerilmeler Şekil 14 ve Şekil 15'te gösterilmiştir.

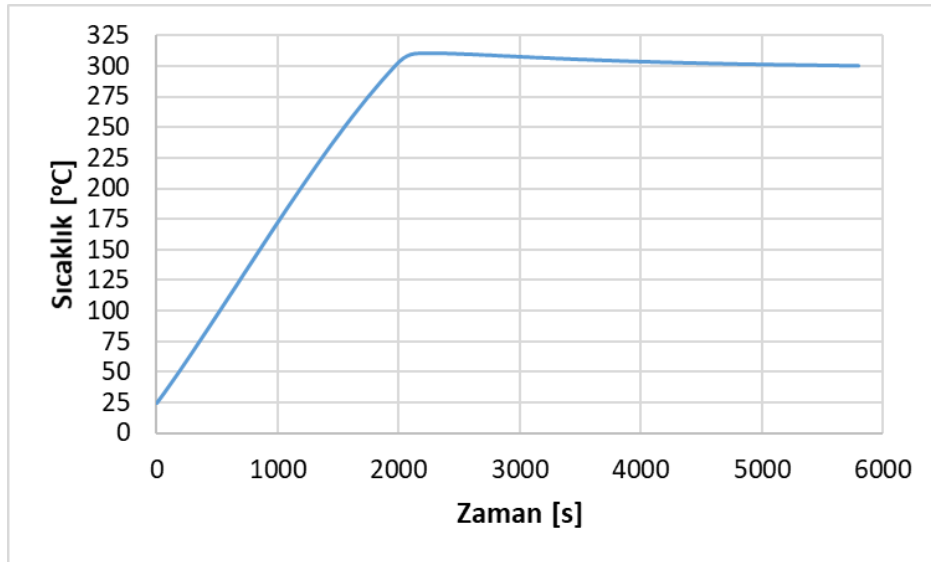


Şekil 14: Isıl Yüklerden Kaynaklı Von Mises Gerilmesi Dağılımı [MPa]



Şekil 15: Kritik Panel Üzerindeki Isıl Yüklerden Kaynaklı Von Mises Gerilmesi Dağılımı [MPa]

Uydu yapısı üzerinde en yüksek ısıl gerilmenin olduğu düğüm noktasındaki sıcaklığın yörünge periyodu boyunca değişimi Şekil 16'da gösterilmiştir. Burada amaç, yapısal güvenlik toleransı hesabını uydu yapısında kullanılan malzemenin sıcaklığa bağlı yapısal dayanım özelliklerini de göz önüne alarak gerçekleştirmektir.



Şekil 16: En Yüksek Isıl Gerilmeye Sahip Düğüm Noktasındaki Sıcaklığın Zamanla Değişimi

Al7075 T651 malzemesinin 316 °C'deki akma dayanımı 45 MPa'dır. Isıl gerilme analizi sonuçlarına göre küp uydu yapısındaki en yüksek von Misses gerilmesi 15.446 MPa olup, bu analizler için yapısal güvenlik toleransı değeri 2.91 olarak hesaplanmıştır.

SONUÇ

Çalışma kapsamında, 3 birimlik bir küp uyduya ait alt sistemleri uydu görev süresi boyunca yapısal bütünlüğünü kaybetmeden ve plastik deformasyona uğramaksızın muhafaza edecek bir gövde iskeletinin tasarımı ve analizleri gerçekleştirilmiştir. Uydu iskeletinin fırlatma yükleri ve ısı yükleri altında yapısal analizleri gerçekleştirilmiş; ayrıca tasarıma ait doğal titreşim frekansları da modal analizler sonucunda elde edilmiştir. Sonlu elemanlar yönteminden faydalanılarak kurgulanan yapısal, termal ve dinamik analizler Abaqus ticari yazılımında modellenerek çözümlenmiştir.

Analiz sonuçlarına göre, küp uydunun modal frekans değerleri fırlatma aracının (PSLV) uyarma frekans değerlerinden yeterince yüksektir. Ayrıca fırlatma yükleri altında uydu yapısının sahip olduğu güvenlik toleransı değeri de 1.1 olarak hesaplanmıştır. En kötü durum senaryosu dikkate alınarak belirlenen ısı transferi analiz sonuçlarına göre, uydu iskeletindeki en yüksek sıcaklık değeri 329 °C'dir. Uydu üzerindeki gerçek sıcaklık dağılımı yörünge parametrelerine ve uydunun kendi eksenini etrafındaki dönüşüne bağlı olarak değişecek ve büyük olasılıkla azalacaktır. Öte yandan, ısı transferi analizlerinden elde edilen sıcaklık dağılımı bilgisi kullanılarak gerçekleştirilen ısı gerilme analiz sonuçlarına göre uydu yapısının sahip olduğu güvenlik toleransı değeri 2.91 olarak hesaplanmıştır. Uydunun ağırlığını en aza indirmek amacıyla mevcut güvenlik toleransı değerlerinin kabul edilebilir seviyede olduğu söylenebilir. Bu koşullar altında, 3 birimlik uydu iskeletinin ön tasarımına ait yapısal analiz sonuçlarının tatmin edici olduğu ve detaylı tasarım sürecine devam edileceği belirtilebilir.

Çalışmanın ileriki aşamalarında, kart yapıları ve diğer uydu alt sistemleri gibi birçok detayın yapısal analiz modellerine dahil edilerek sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen sonuçların detaylandırılması amaçlanmıştır. Buna ilaveten, bir yörünge simülasyon yazılımı kullanılarak uydu yüzeylerindeki ısı akılarının daha gerçekçi şekilde modellenmesi ve bu sayede ısı transferi analizlerinde doğruluğun artırılması faydalı olacaktır.

Kaynaklar

Aslan, A. R., Yagci, H. B., Sofyali, A., Suer, M., Umit, E., Tola, C., Ceylan, O., Durna, A. S., Celik, G., ve Ozturk, D. C., 2011. *Development of a 3Unit CubeSat for LEO Communication*, 2nd Nano-Satellite Symposium, 14-16 Mart, Tokyo, Japonya.

Cihan, M., Çetin, A., Kaya, M. O., ve İnallhan, G., 2011. *Design and Analysis of an Innovative Modular Cubesat Structure for ITU-pSAT II*, 5th International Conference on Recent Advances in Space Technologies, 09-11 Haziran, İstanbul, Türkiye.

Gunter's Space Page, "CubeSat", http://space.skyrocket.de/doc_sat/cubesat.htm adresinden 03.03.2018 tarihinde erişilmiştir.

Herrera-Arroyave, J. E., Ferrer-Pérez, J. A., Colín, A. ve Bermúdez-Reyes, B., 2016. *CubeSat System Structural Design*, 67th International Astronautical Congress (IAC), 26-30 Eylül, Guadalajara, Meksika.

Khalifa N., ve Sharaf-Eldin, T. E., 2013. *Earth Albedo perturbations on Low Earth Orbit Cubesats*, International Journal of Aeronautical and Space Sciences, Cilt.14, No.2, s.193-199.

Lahrichi, A., 2017. *Heat Transfer Modeling and Simulation of MASAT1*, M.Sc. Thesis, Al Akhawayn University.

Matweb Material Property Data, <http://www.matweb.com> adresinden 05.03.2018 tarihinde erişilmiştir.

Raviprasad, S., ve Nayak, N. S., 2015. *Dynamic Analysis and Verification of Structurally Optimized Nano-Satellite Systems*, Journal of Aerospace Science and Technology, Cilt.1, No.2, s.78-90.

Süer, M., Yakut, E., Oran C., ve Aslan, A. R., 2014. *NART – Nano Küp Uydular için Boyutlandırılabilir Modüler Uydu Yapısı Alt Sistemi*, V. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı, 8-10 Eylül, Kayseri, Türkiye.