

SSS-2B KÜP UYDUSUNUN TASARIMI VE YAPISAL ANALİZİ

Sibel Kaçmaz¹ İbrahim Karakaya²
ODTÜ, Ankara

Ceyhun Tola³
THKÜ, Ankara

Ömer Ataş⁴
Tübitak UZAY, Ankara

ÖZET

Bu bildiride APSCO Öğrenci Küçük Uydu Projesi kapsamında Tübitak UZAY'ın yapımını üstlendiği SSS-2B küp uydu yapısının tasarım aşaması, uydunun fırlatma esnasında ve görev süresi boyunca maruz kaldığı yüklere dayanıklılığı açıklanarak SSS-2B tasarım ve yapısal alt sistem grubuna ait bir ön tasarım çalışması sunulması hedeflenmiştir. Sistem ve alt sistem gereksinimleri ve tasarım felsefine göre oluşturulan uyduya ait çözüm ağı sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak ABAQUS ticari yazılımında oluşturulmuştur. İlk olarak uydunun fırlatma yükleri altında sanki-statik ve burkulma analizi sonuçları sunulmuştur. Devamında doğal titreşim analizi yapılarak uydu fırlatma aracı seçiminde referans alınacak frekans sınırı belirlenmiştir. Sonrasında uydunun maruz kaldığı radyasyon altında bağlaç ısı analiz sonuçları sunulmuştur.

GİRİŞ

Uydular haberleşme, gözlem, bilimsel çalışma, eğitim ve hava durumu tahmini ve gözlemi gibi pek çok amaçla kullanılmaktadır. Görevlerine, yörüngelerine ve fırlatma yüklerine bağlı olarak, uydular zorlu çevre koşullarına dayanacak şekilde tasarlanmalı ve üretilmelidir. Uydu tasarımında çevresel koşullardan kaynaklanan gereksinimlerin yanında maliyet, hafiflik ve kolay üretim gibi temel mühendislik gereksinimleri de vardır. Bu unsurlar sebebiyle günümüz uzay görevlerinde küçük uyduların kullanımının arttığı görülmektedir. Elektronik parçalardaki küçülme, artan kapasite ve düşük güç tüketimiyle verimi artan küp uydular aynı zamanda düşük fırlatma bütçesiyle uzay görevlerini daha uygulanabilir hale getirmektedir [Heidt ve diğerleri, 2000]. Farklı görevler için farklı boyut ve kütleye sahip olabilen küçük uydular kütlelerine göre büyükten küçüğe mini, mikro, nano, pico ve femto uydu olarak sınıflandırılabilir. Bu makalenin de odaklandığı küp uydu, nano uydu sınıfındadır. Küp uydu boyut olarak birim (U) ile ifade edilir. Bir birim (1U) 10*10*10 cm boyutunda bir küptür ve ağırlığı maksimum 1.33 kg olacak şekilde tanımlanmıştır [Mehrpavar ve diğerleri, 2014]. Küp uydular ihtiyaca göre 2U, 3U, 6U ve 12U boyutlarında olabilir.

Küp uydu konsepti ilk olarak 1999 yılında Kaliforniya Politeknik Devlet Üniversitesi ve Stanford Üniversitesi iş birliği ile geliştirildi ve küp uydu standardı oluşturuldu [Messier, 2015; Helvajian ve

¹Lisans Öğrencisi, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: sibel.kacmaz@metu.edu.tr

²Lisans Öğrencisi, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: ibrahim.karakaya@metu.edu.tr

³Dr. Öğretim Üyesi, Uzay Müh. Böl., E-posta: ceyhuntola@gmail.com

⁴Uzman Araştırmacı, E-posta: omer.atas@tubitak.gov.tr

Janson, 2008]. Hedefi, üniversitelerdeki uzay araştırmalarını kolaylaştırmak ve eğitime destek olmak olan küp uydular, bugün enstitüler, uzay ajansları ve birçok uzay firması tarafından farklı görevler için kullanılmaktadır [Chin ve diğerleri, 2008]. 2003'te yörüngeye ilk başarılı küp uydunun konuşlandırılmasıyla uzaya ulaşmak kolaylaştı. 2008'e gelindiğinde 60 küp uydunun fırlatılmış olması küp uydu piyasasında hareketlilik oluşturdu ve ticari kullanıma hazır (COTS) uydu parçalarının üretimine başlandı [Deepak ve Twiggs, 2012]. Nisan 2020 itibariyle uzaya fırlatılan küp uydu sayısı 1210'u bulmuş bulunmaktadır [Kulu ve diğerleri, 2020].

Uzay bilimleri alanında donanımlı mühendisler yetiştirmek için çeşitli eğitim projeleri başlatılmıştır. Avrupa Uzay Ajansı'nın Fly Your Satellite projesi, akademi eğitimini tamamlamak ve üniversite öğrencilerine ilham verme ve sektöre hazırlama amacıyla Avrupa Uzay Ajansı Eğitim Ofisi tarafından Avrupa Üniversiteleri ile iş birliği içerisinde tasarlanıp yönetildi [Galeone ve diğerleri, 2000]. NASA bilim, teknoloji, mühendislik ve matematik alanlarına ilgi duyan öğrencilerin dikkatini çekmek için Educational Launch of Nanosatellite (ElaNa) projesini oluşturdu [Skrobot, 2011]. APSCO Öğrenci Küçük Uydu (SSS) Projesi APSCO üye devletlerinden öğretim görevlileri ve öğrenciler arasında uzay bilimi ve uzay teknolojisi alanında deneyim elde etmelerini sağlamak için başlatılmıştır [APSCO, 2016]. Projede öğrencilere uydu teknolojileri hakkında eğitimler verilerek tasarım, analiz ve üretim faaliyetlerine katılmaları sağlanmaktadır. Proje kapsamında 1 adet mikro uydu (SSS-1) ve 2 adet küp uydu (SSS-2A ve SSS-2B) tasarlanıp, üretilip, fırlatılacaktır. SSS-2B uydusu TÜBİTAK Uzay Teknolojileri Araştırma Enstitüsü'ndeki uzman araştırmacılar önderliğinde, üniversite öğrencilerinin çalışmaları sonucunda üretilmektedir. SSS-2B'nin öncelikli amacı alçak yörüngede gözlem yapmak, yörüngede radyasyon ölçümü yapmak ve uydular arası iletişim teknolojilerini denemektir. Küp uydu faydalı yük, yapısal, yönelim ve yörünge kontrol, elektriksel güç, uydu veri toplama, telemetri-telekomut, uçuş yazılımı gibi alt sistemlerden oluşmaktadır. Bu çalışmada SSS-2B uydusunun yapısal alt sistemin sanki-statik yük, modal, burkulma analizi yapılarak uydunun fırlatma yüklerine dayanabileceği gösterilmektedir. Ayrıca, termal analiz yapılarak uydunun yörüngede maruz kalacağı sıcaklık koşullarında ekipmanların çalışma koşullarının sağlandığı gösterilmektedir.

YÖNTEM

Gereksinimler ve Tasarım Felsefesi

SSS-2B küp uydusunun ana gereksinimleri Çizelge 1'de gösterilmiştir [Yağlıoğlu ve diğerleri, 2019].

Çizelge 1: SSS-2B Sistem Gereksinimleri

Parametre	Gereksinim
Görev yörüngesi	Güneş eş zamanlı orbit ve 500-700km yükseklik
Görev süresi	Yörüngede ≥ 6 ay Depolama ≥ 1 yıl
Hacim	100mm (G) x 100mm (U) x 340.5mm (Y)
Kütle	≤ 5 kg
Güç	$> 4W$ (sabit)

SSS-2B küp uydusunun yapısal alt sistem gereksinimleri Çizelge 2'de gösterilmiştir.

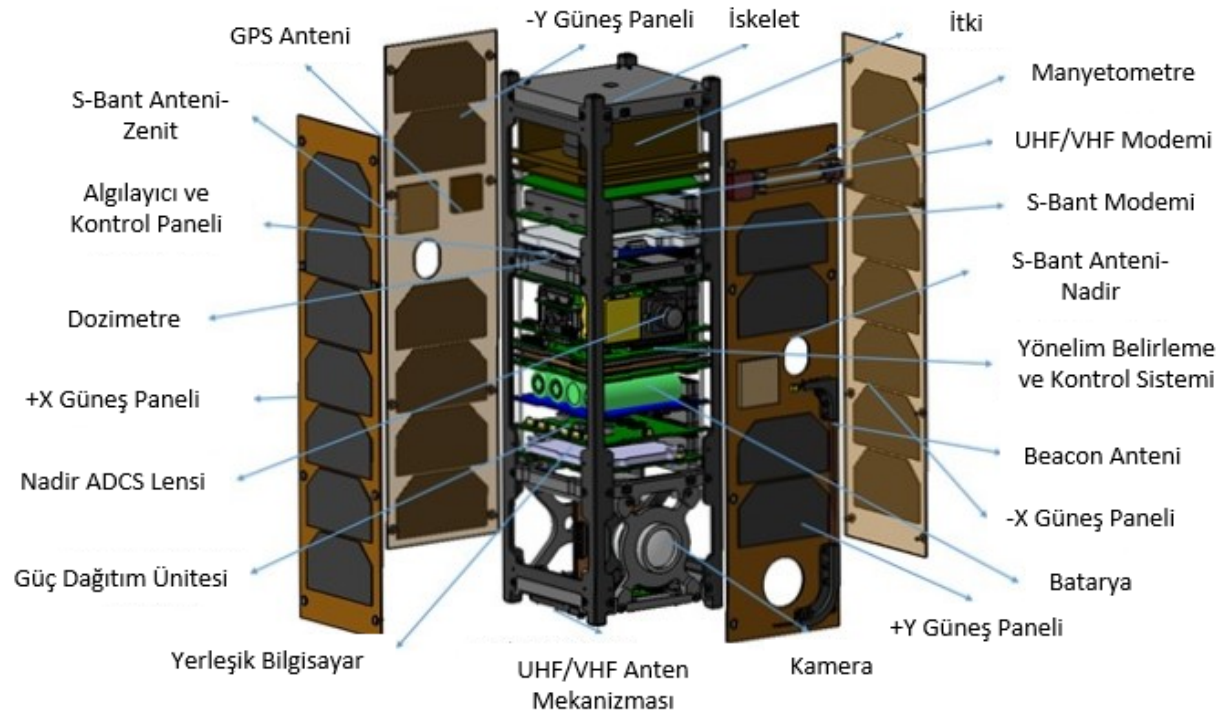
Çizelge 2: SSS-2B Yapısal Alt Sistem Gereksinimleri

Parametre	Gereksinim
Malzeme	Korozyon ve erozyona dayanıklı olmalıdır.
Uydu yapısının kütlesi	$\leq$ Toplam kütle/4
Mekanizma	Fırlatma kutusunda hareket etmemelidir ve fırlatma sırasında kolayca ayrılmalıdır.
Tasarım	Mekanik ve termal yük altında en kötü senaryoya dayanmalıdır.
Dayanıklılık	Fırlatma aracından kaynaklanan kuvvetlere üç ekseninde dayanıklı olmalıdır.
Yerleşim	Uydu yapısı uydu alt sistemlerinin kolay montaj - entegrasyonuna imkan sağlamalıdır.
Yer işleme	Özel (aşırı hassas) ek bir taşıma prosedürüne ihtiyaç duymadan fırlatma aracına taşınabilmelidir.

Uydu tasarımında dikkate alınan ölçütler şu şekilde sıralanabilir: minyatürleştirme, standartlaştırma, modülerize edilebilme, cevap verebilirlik ve düşük maliyet.

Geometri ve Malzeme Seçimi

SSS-2B 100mm*100mm*300mm boyutlarında 3 birimlik bir küp uydudur. Uydunun üç boyutlu çizimi Şekil 1'de gösterilmektedir. SSS-2B küp uydusu faydalı yük, yapısal, yönelim ve yörünge kontrol, elektriksel güç, uydu veri toplama, telemetri-telekomut, uçuş yazılımı gibi alt sistemlerden oluşmaktadır. Uydunun ana faydalı yükleri optik kamera, uydular arası iletişim birimi ve radyasyon dozimetresidir.



Şekil 1: SSS-2B Uydusu

Yapısal alt sistem direngen bir yapı oluşturarak uyduda bulunan diğer alt sistemleri uzay ortamında dış etkilerden olabildiğince korunarak yapısal bütünlüğü sağlamaktır [Süer, 2013]. Diğer bir deyişle yapısal alt sistem diğer alt sistemler için destek görevini üstlenmektedir. Bu nedenle malzeme seçimi büyük önem taşımaktadır. Standartlara göre küp uydunun ana iskeleti ve rayları Alüminyum 5005, Alüminyum 5052, Alüminyum 6061, Alüminyum 7075 veya bunların birleşiminden oluşmalıdır [Mehrpavar ve diğerleri, 2014]. Bu bağlamda, Alüminyum alaşımları arasında karşılaştırmalı karar matrisi oluşturulmuştur. Çizelge 3'te görülen puanlamada 3 numara en iyi seçimi 1 numara en kötü seçimi göstermektedir. Sonuç olarak, Alüminyum 6061'de karar kılınmış olup serinin T6 çeşidi yapıya uygulanmıştır.

Çizelge 3: Ana iskelet ve ray malzemesi için karar matrisi

Alaşım/Özellik	Al 5005	Al 5052	Al 6061	Al 7075
Yoğunluk	2	3	2	1
Maliyet	1	1	3	2
Özgül güç	1	2	2	3
Kullanım sıklığı	2	2	3	3
TOPLAM	6	8	10	9

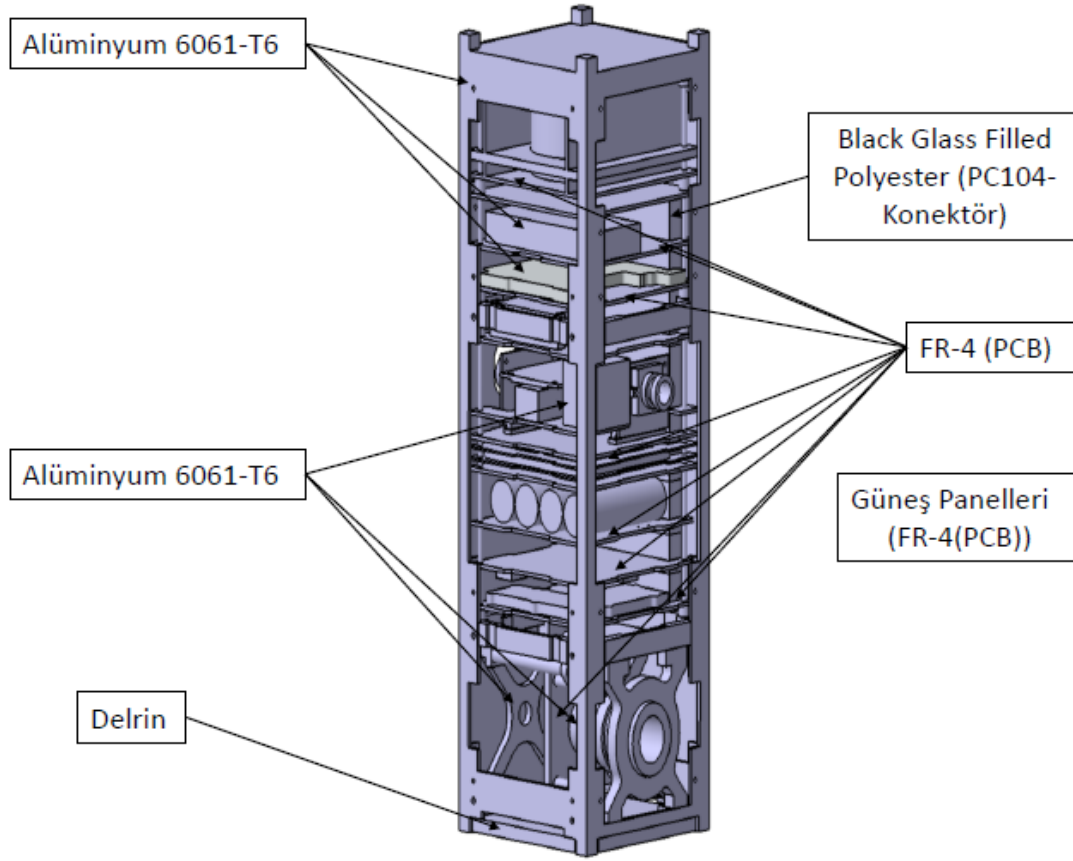
Çizelge 4'te Al6061-T6 alaşımının temel mekanik ve fiziksel özellikleri verilmiştir. Ayrıca uydunun diğer parçalarında kullanılacak olan malzemelerin de özellikleri verilmiştir.

Çizelge 4: Uydu Genel Malzeme Özellikleri

Sembol	Açıklama	Al 6061 T6	PCB FR-4	Delrin	Birim
E	Elastisite Modülü	68900	18615	3102	MPa
ν	Poisson Oranı	0.33	0.13	0.35	-
ρ	Yoğunluk	2700	1850	1420	kg/m ³
k	İletkenlik	155	0.27	0.36	W/(m.K)
α	Isıl Genleşme Katsayısı	25.2	15	14.9	$\mu\text{m}/(\text{m.K})$
cp	Özgül Isı	963	600	1286	J/(kg.K)
σ_{akma_std}	24 ° C'de Akma Dayanımı	276	-	-	MPa
$\sigma_{akma_sıcak}$	149 ° C'de Akma Dayanımı	214	-	-	MPa
ϵ	Soğurganlık	0.15	0.8	0.8	-

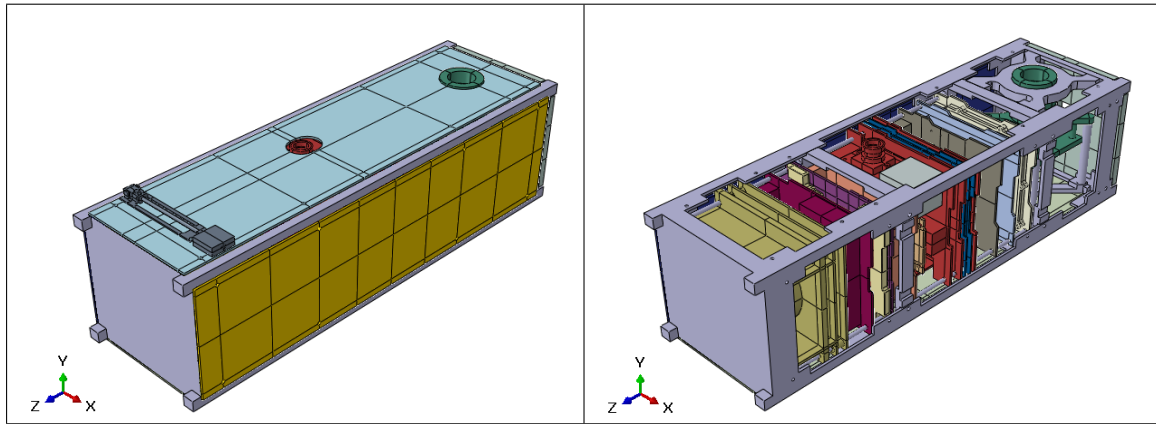
Uyduda kullanılması gereken malzemelerin parçalara göre dağılımı Şekil 2'de verilmiştir. Ancak analiz sırasında kolaylık sağlaması açısından sonuçları çok etkilemeyecek bazı varsayımlar yapılmıştır. Bu varsayımlar şu şekilde listelenebilir.

- Baskılı devre kartları üzerinde bulunan işlemciler küçük bir kısmı ifade ettikleri için bütün baskılı devre kartı PCB FR-4'den oluştuğu varsayılmıştır.
- Uydu kapaklarının çoğunluğu PCB FR-4'den oluştuğundan ve güneş panellerinin kalınlığının çok az olmasından dolayı güneş panelleri için ayrı bir materyal atanmamıştır.
- Batarya pillerine materyal atama yapılmamıştır ve piller birim kütle olarak sisteme eklenmiştir.



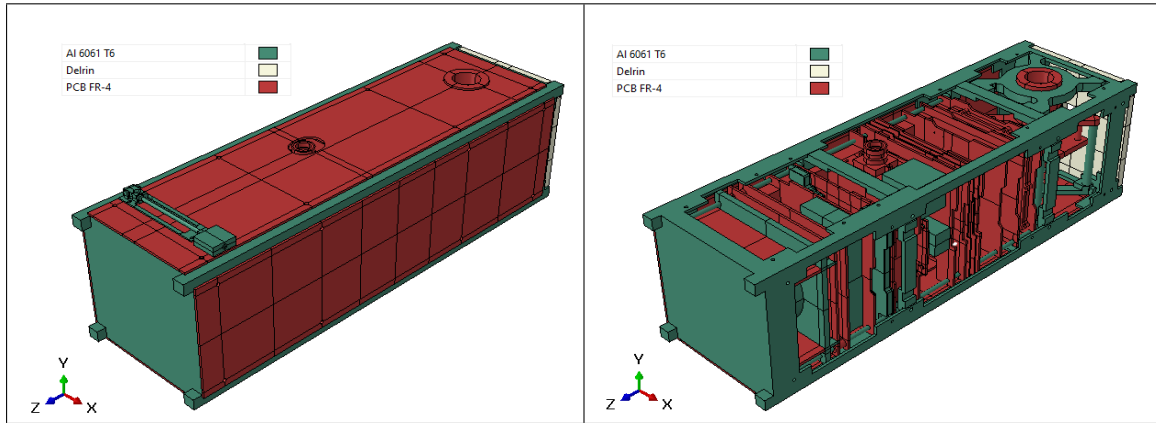
Şekil 2: Uydu Üzerindeki Malzeme Dağılımı

Yapılan varsayımlar dahilinde ABAQUS'te oluşturulan uydu geometrisi Şekil 3'te görülmektedir. Uyduya ait sonlu elemanlar modeli 20 bağımsız parçanın monte edilmesiyle oluşmuştur.



Şekil 3: Uydu Geometrisi

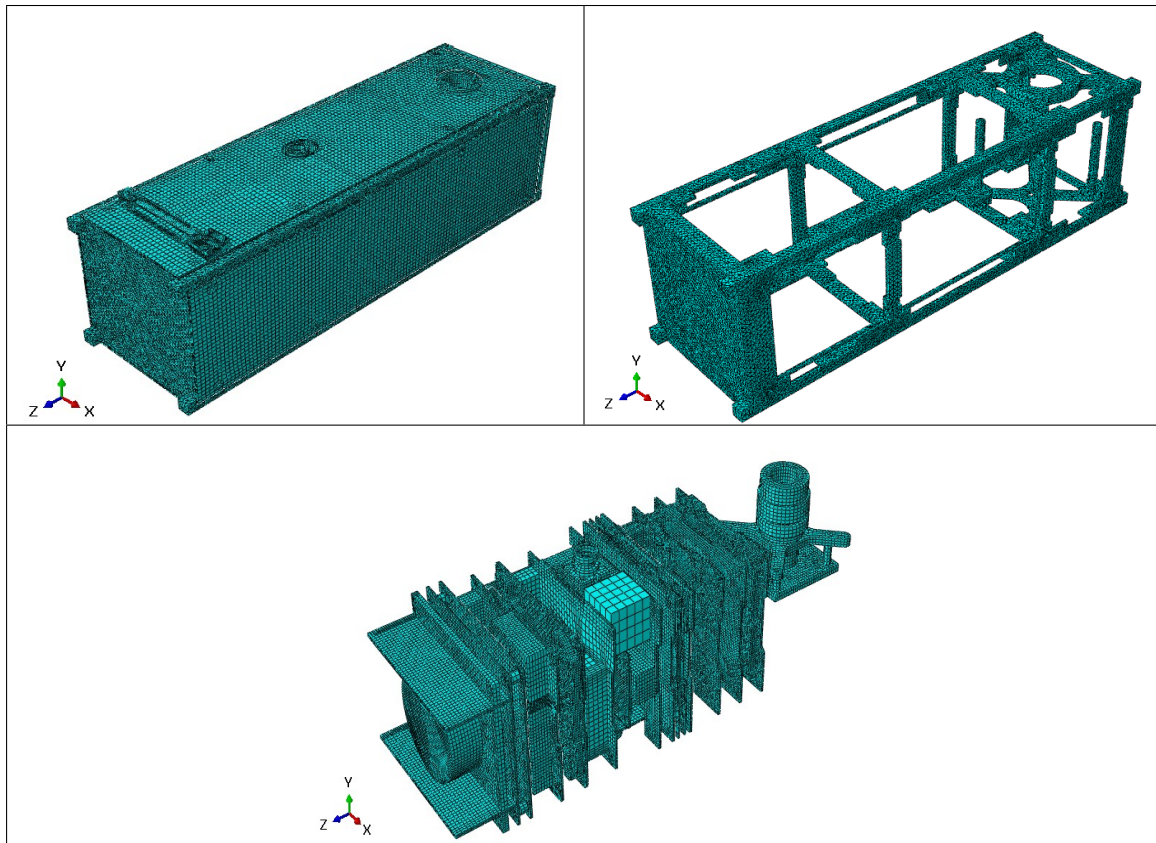
Sonlu elemanlar modelinde Çizelge 4'te özellikleri verilen Al-6061 T6, PCB FR-4 ve Delrin malzemesi kullanılmıştır. Şekil 4'te uydu modeli üzerindeki malzemelerin dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 4: Varsayımlar Dahilinde Malzemelerin Uydu Montajı Üzerindeki Dağılımı

Çözüm Ağı, Sınır Koşulları ve Maruz Kalınan Yükler

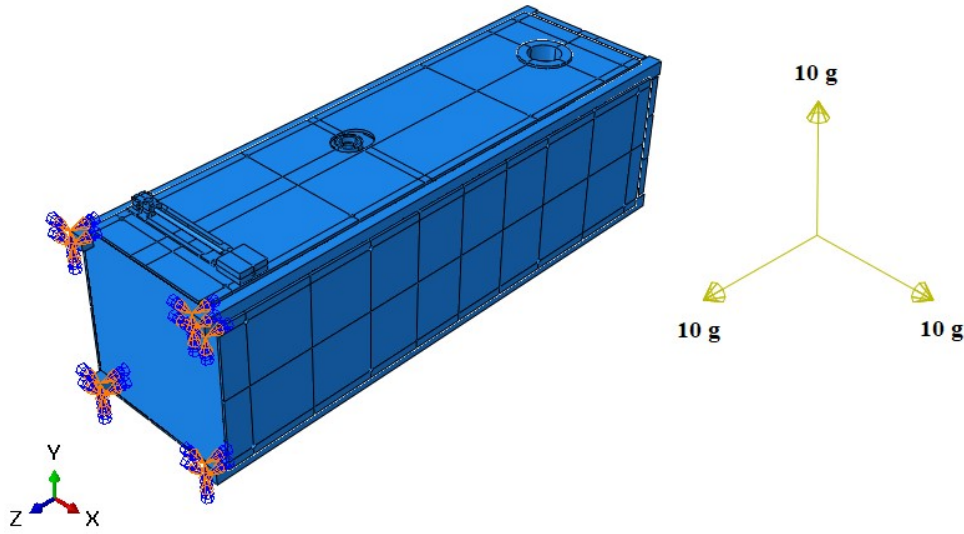
Sonlu elemanlar modeline ait çözüm ağı Şekil 5'te gösterilmiştir. Çözüm ağı 533845 düğüm noktası ve 345220 elemandan oluşturulmuştur. Bu elemanların 213008'i lineer kübik (C3D8), 132212'si kuadratik tetragonaldır. (C3D10M)



Şekil 5: Uydu Modeline ait Çözüm Ağı

Uydunun fırlatma aracına hangi yönde yerleştirileceği bilinmediği için olası en kötü senaryoyu analiz ederek sonuçları değerlendirmek amacıyla uydu yapısına x, y ve z eksenleri yönünde 10 g'lık ivme yükü uygulanmış ve uydu üst yüzeyindeki 4 yüzeyden (POD'a bu bölgeden sabitlendiği varsayımı altında) ankastre olarak sabitlenmiştir. Sonlu eleman modeline ait sınır koşulları ve uygulanan

yükler Şekil 6'da gösterildiği gibidir. Şekil 6'da görüldüğü gibi uydunun ortasından sabitlenmemiş olması da olası en kötü senaryoyu destekleyen başka bir unsurdur.



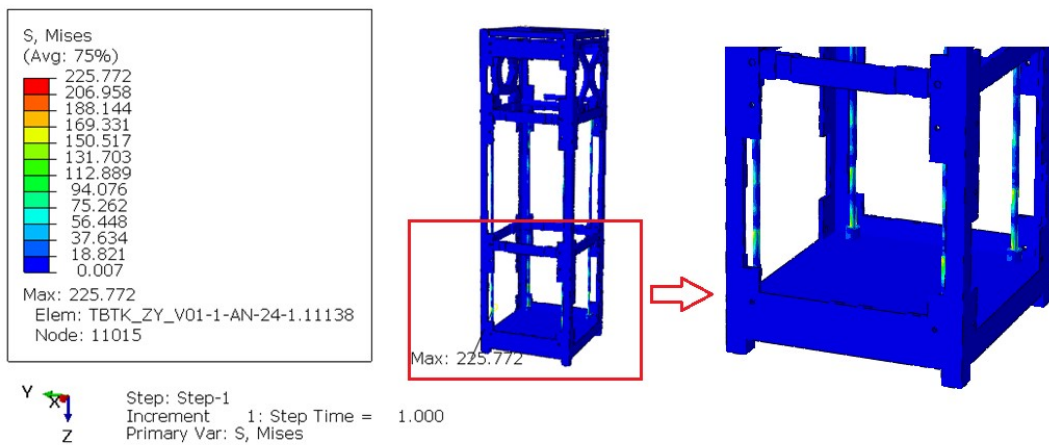
Şekil 6: Sanki-Statik Analiz ve Burkulma Analizinde Uygulanan Yükler ve Sınır Koşulları

UYGULAMALAR

Küp uydunun görevi boyunca deneyimlediği üç farklı mekanik yüklenme türü vardır: sanki-statik, statik ve dinamik yükler [Athirah ve diğerleri, 2014]. Giriş kısmında da bahsedildiği üzere uydunun fırlatma esnasında ve devamında bütünlüğünü koruması ve aktif olarak görevini tamamlayabilmesi için uydu yapısının oluşacak yüklenmelere dayandığını test etmek büyük önem taşımaktadır.

Sanki-Statik Analizi

Küp uydunun fırlatma sırasında her yönden 10 g'lık yüke maruz kalması durumunda uydu gövdesinde oluşan maksimum Von Mises gerilmesi değeri 225.772 MPa olarak bulunmuştur. Bu gerilme değeri Şekil 7'de gösterildiği gibi kartların bağlandığı dairesel kesite sahip taşıyıcı sütunlarda oluşmuştur.

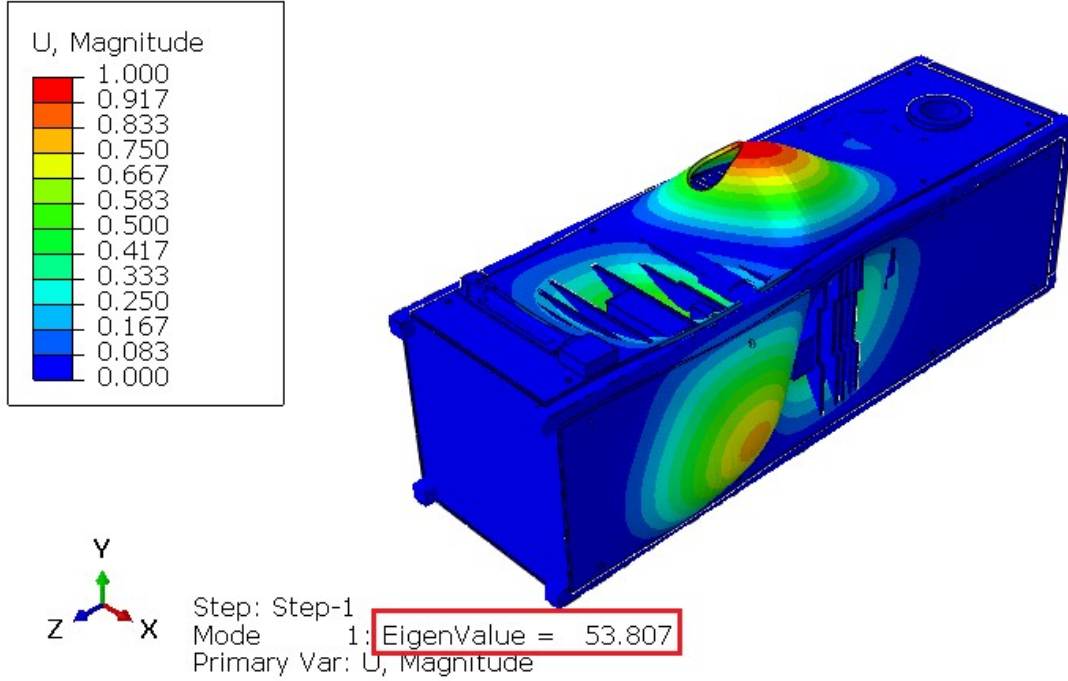


Şekil 7: Sanki-Statik Analiz Sonucunda Uydu Gövde Yapısındaki Von Mises Gerilmesi Dağılımı [MPa]

Al 6061-T6 malzemesinin 24°'deki akma dayanımı göz önünde bulundurulduğunda, fırlatma esnasında küp uydunun yapısına ait güvenlik toleransının $276/225.772 = 1.2$ olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Burkulma Analizi

Sanki-statik analizde belirtilen yükleme senaryosu ve sınır koşulları için uyduda herhangi bir burkulma olup olmadığını tespit etmek amacıyla burkulma analizleri yürütülmüştür. Burkulma analizi sonucunda elde edilen ilk mod şekli ve özdeğeri Şekil 8'de gösterilmiştir. Gösterim 34 kat büyütülerek ölçeklendirilmiştir.



Şekil 8: Birinci Burkulma Modu [Özdeğer=53.807]

Burkulma analizi sonucunda elde edilen ilk özdeğer 53.807 olarak bulunmuştur. Buna göre sistemin fırlatma sırasında her yönden 10 g'lık yüke maruz kalması durumuna dahi burkulma oluşmadığı gözlenmiştir, burkulmanın mevcut yüklemenin 53.8 katına çıkartılması durumunda Şekil 8'de gösterildiği şekilde olacağı sonucuna ulaşılmıştır.

Doğal Titreşim Analizi

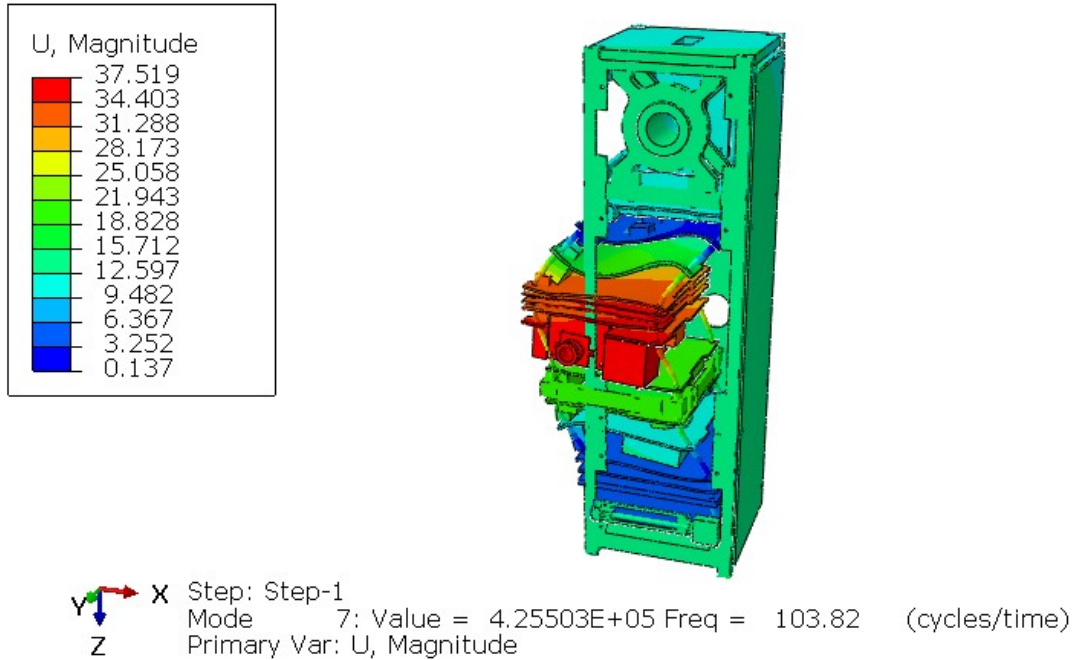
Sonlu eleman modelinin doğrulanması için sonlu eleman modeli aşağıdaki ölçütleri sağlamalıdır.

- İlk 6 mod, üçü öteleme ve üçü dönme olmak üzere rijid olmalıdır.
- İlk 6 modun frekansı 0.005 Hz'den düşük olmalıdır.
- İlk 6 rijid moddaki en yüksek frekans değerinin ilk elastik mod frekans değerine oranının 0.0001'den küçük olması beklenmektedir.
- Standartlara göre, uydunun yapısının yapısal sertliği, yapının doğal frekans değerinin yatay ve dikey ekseninde sırasıyla 45 Hz ve 90 Hz'den büyük olmasını sağlamalıdır [Mehrparvar ve diğerleri, 2014].

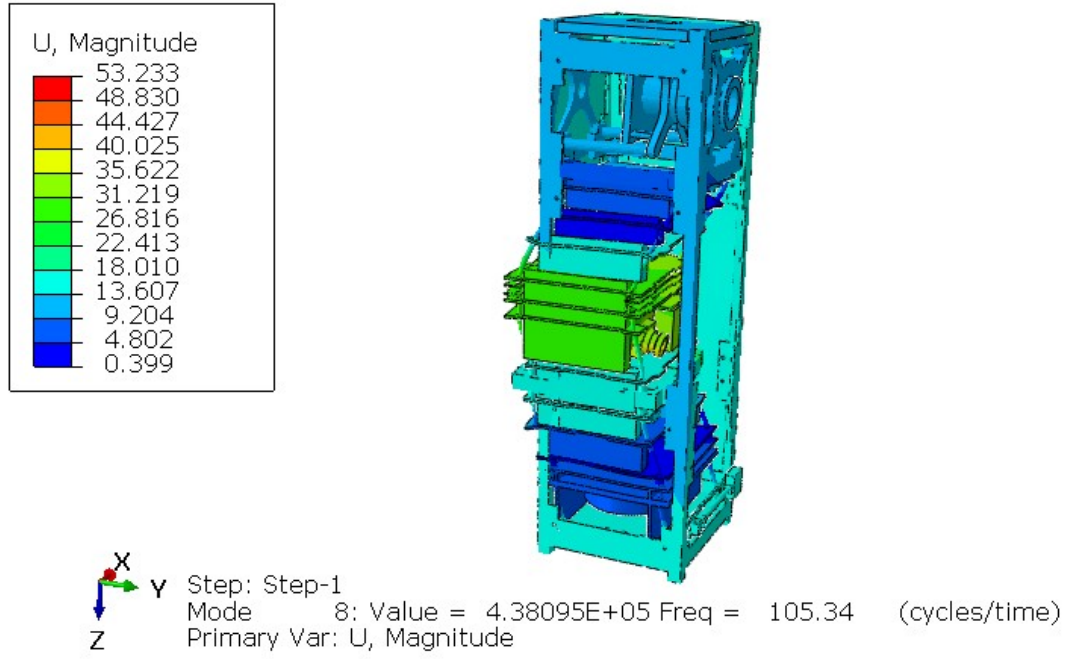
Serbest titreşim analizlerinde uydu herhangi bir bölgesinden sabitlenmediği için ilk 6 mod x, y ve z eksenleri yönündeki öteleme ve bu eksenlerin etrafında dönme modlarına karşılık gelmekte olup elde edilen doğal frekans değerleri yaklaşık olarak sıfırdır. Takip eden modlara ait frekans değerleri Çizelge 5'te özetlenmiş olup ilgili modlara ait mod şekilleri sırasıyla Şekil 9, 10, 11, 12, 13 ve 14'te gösterilmiştir. Böylelikle, yukarıda verilen üç madde doğrulanmış bulunmaktadır.

Çizelge 5: Doğal Titreşim Analizi Sonuçları

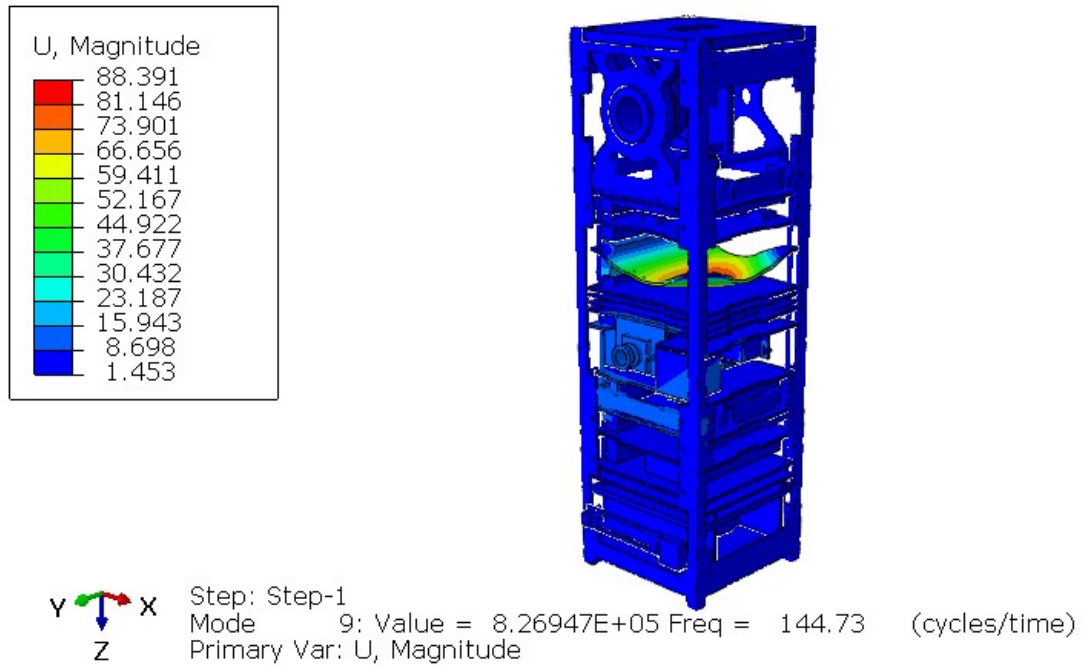
Mod	Doğal Frekans Değeri [Hz]
1	0.0000
2	$1.00797 \cdot 10^{-3}$
3	$1.10633 \cdot 10^{-3}$
4	$1.27194 \cdot 10^{-3}$
5	$1.33806 \cdot 10^{-3}$
6	$1.52386 \cdot 10^{-3}$
7	103.82
8	105.34
9	144.73
10	151.82
11	166.89
12	175.58
13	180.71
14	201.92
15	253.94



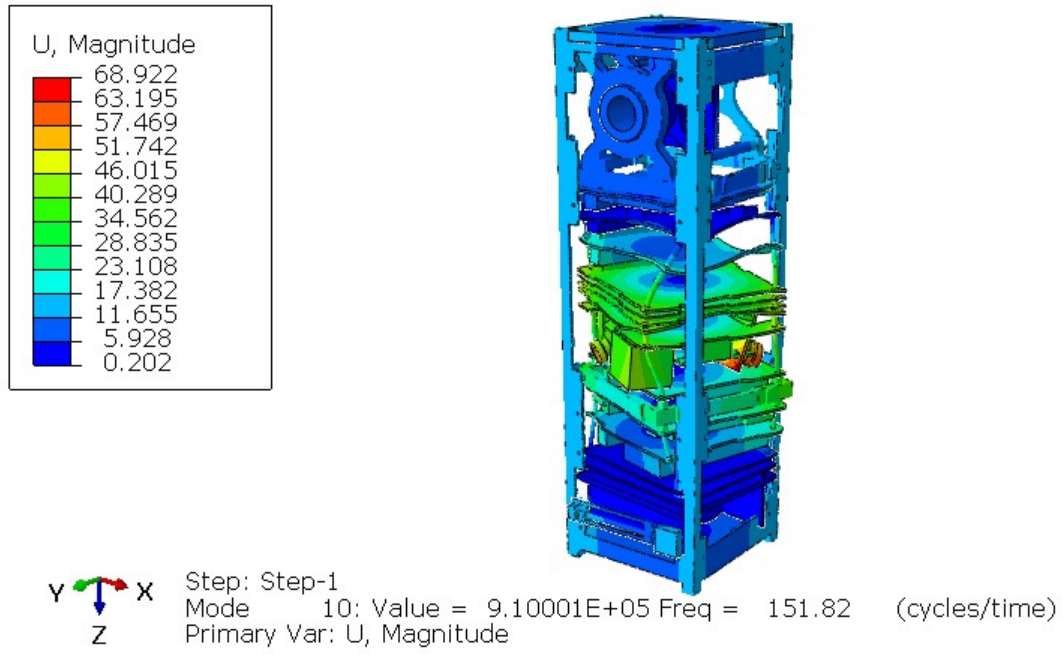
Şekil 9: Mode 7 (103.82 Hz)



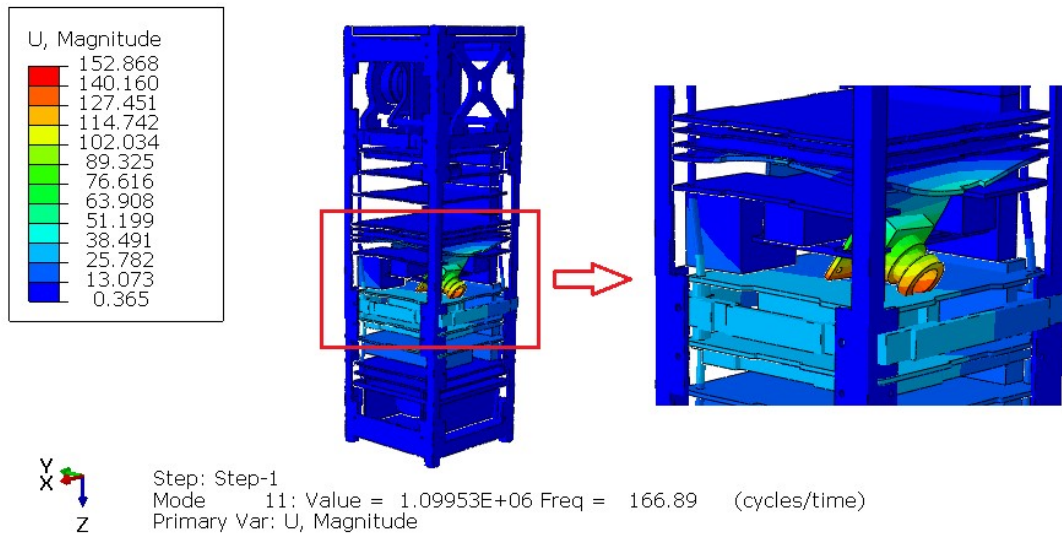
Şekil 10: Mode 8 (105.34 Hz)



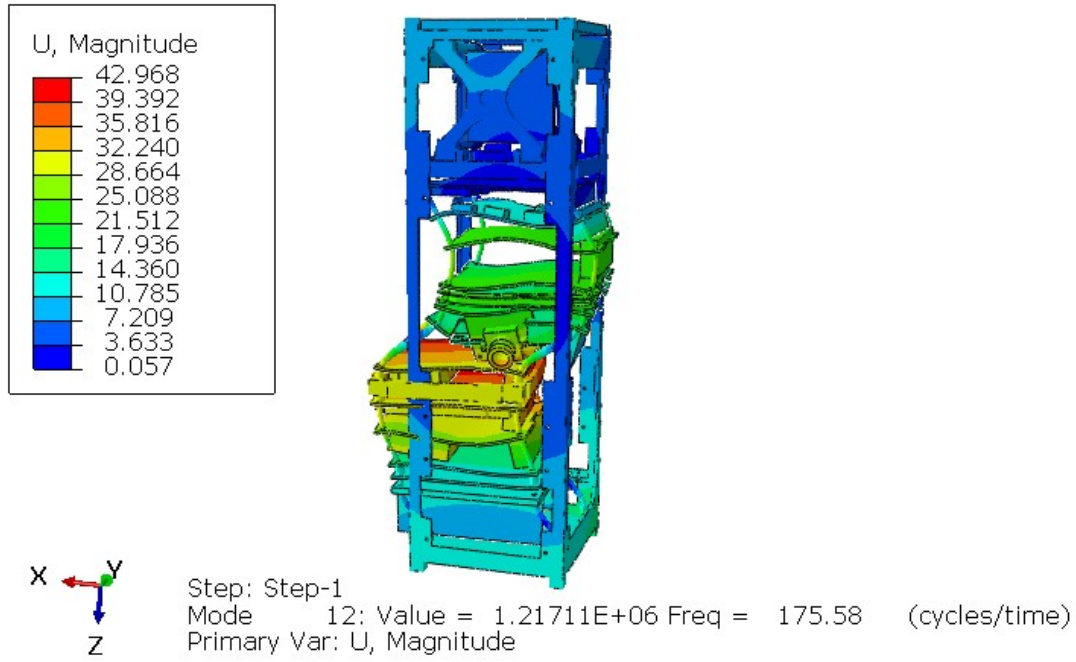
Şekil 11: Mode 9 (144.73 Hz)



Şekil 12: Mode 10 (151.82 Hz)



Şekil 13: Mode 11 (166.89 Hz)

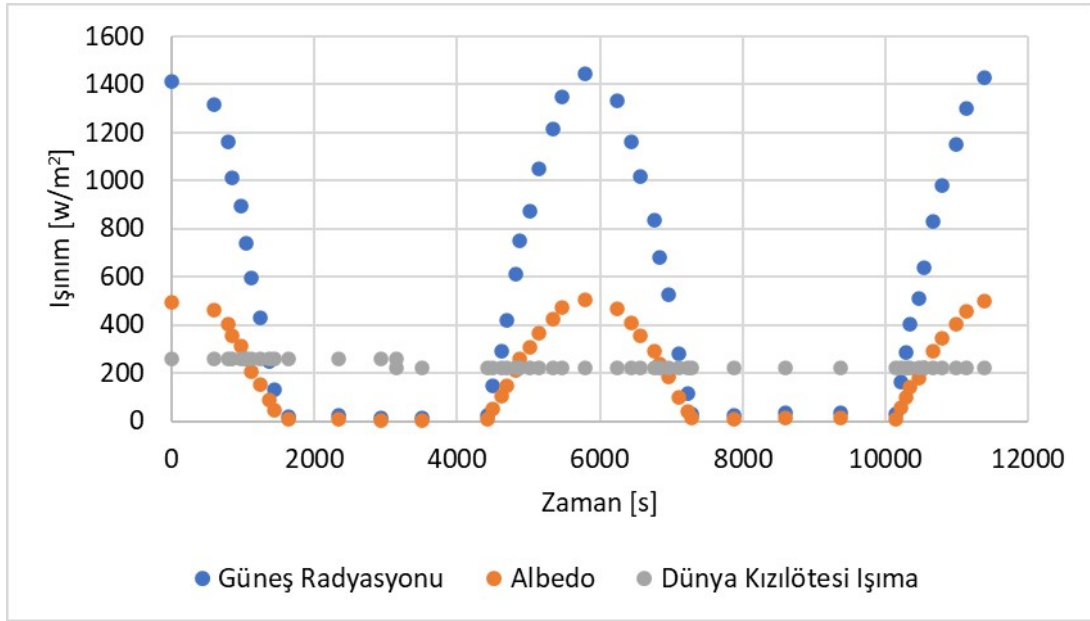


Şekil 14: Mode 12 (175.58 Hz)

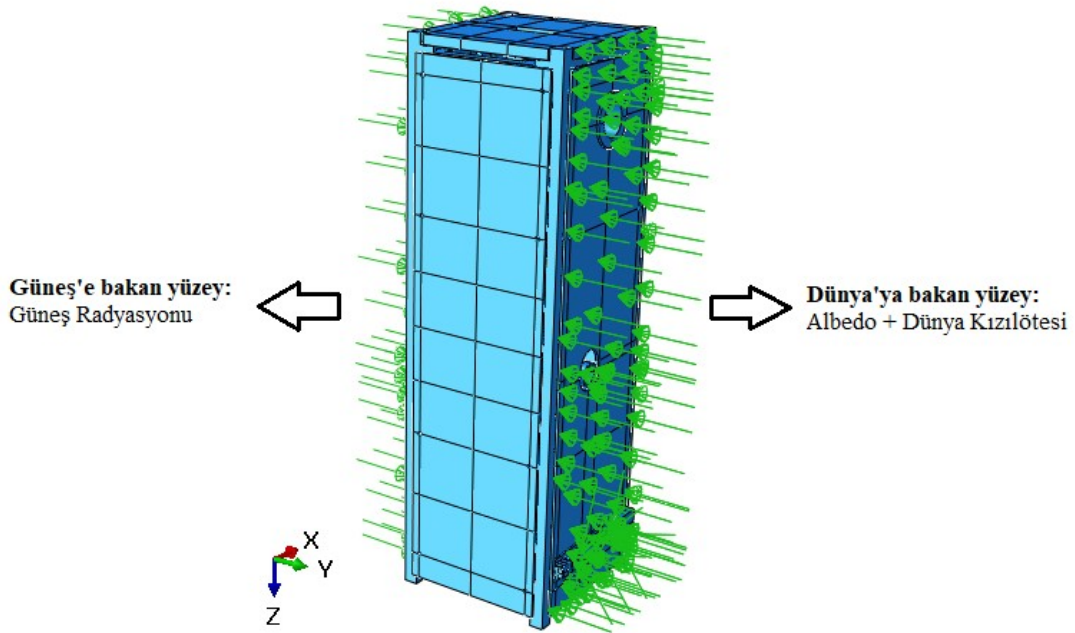
Uydu yapısının ve kartların fırlatma sırasında fırlatma aracından kaynaklı zorlama sonucunda rezonansa girmesini önlemek amacıyla fırlatma aracının oluşturabileceği titreşim frekansının 103 Hz değerinden daha yüksek olmaması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu sonuç aynı zamanda standartlarda belirtilen eşik değerini doğrulamaktadır.

Bağlaşık Isıl Analizler

Bağlaşık ısı analizler, uydunun mevcut yörüngesinde maruz kalması öngörülen ısıtım döngüsü sonucunda üzerinde oluşan sıcaklık ve gerilme dağılımını zamana bağlı olarak elde etmek ve uydu için en kritik andaki sıcaklık ve gerilme dağılımını elde etmek amacıyla gerçekleştirilmektedir. Uydunun 500 km irtifada görev yapacağı yörünge göz önüne alınarak Şekil 15'te gösterilen grafikteki gibi değişen güneş radyasyonu, Albedo ve Dünya kaynaklı kızıl ötesi ısıtımına (Earth Infrared) maruz kalacağı bilinmektedir. Albedo ve Dünya kaynaklı kızıl ötesi ısıtımının uydunun kamera monte edilmiş yüzeyine, güneş radyasyonun ise zıt yöne bakan yüzeye etki ettiği; uydunun diğer iki yan yüzeyinden ise herhangi bir ısıtımına maruz kalmadığı varsayılmıştır. ısıtımına maruz kalan yüzeyler Şekil 16'da özetlenmiştir. Ayrıca uydunun bütün dış yüzeylerinden ısıtım ise ısı kaybettiği varsayılarak uydu içerisindeki sistemlerin çalışması dolayısıyla üretilen ısı ihmal edilmiştir. Bu modellemenin amacı uydu alt sistemlerini (güneş paneli, uçuş bilgisayarı vb.) incelemekten ziyade uydu yapısının kritik bir ısı senaryo için analiz edilmesidir. Söz konusu varsayım ve ihmallerin amacı mümkün olan en kısa sürede bir ön tasarım analizi gerçekleştirmektir.

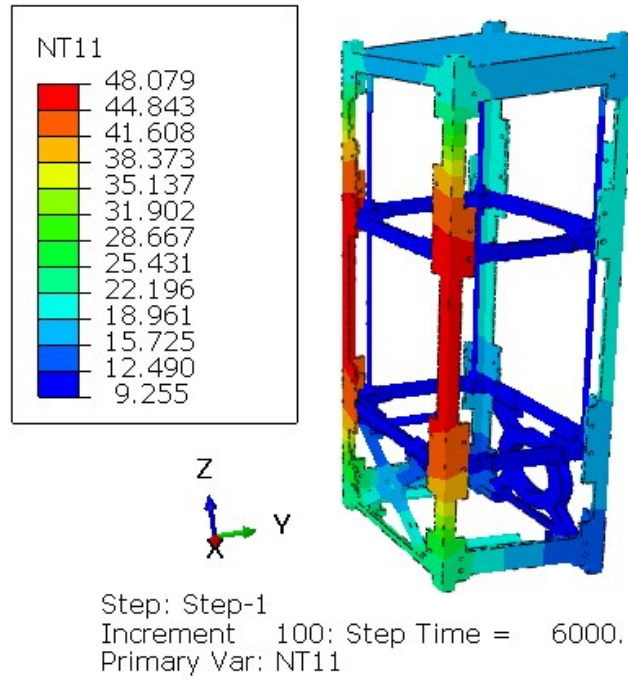


Şekil 15: Işınmın Yörüngede Geçirilen Süre Boyunca Değişimi

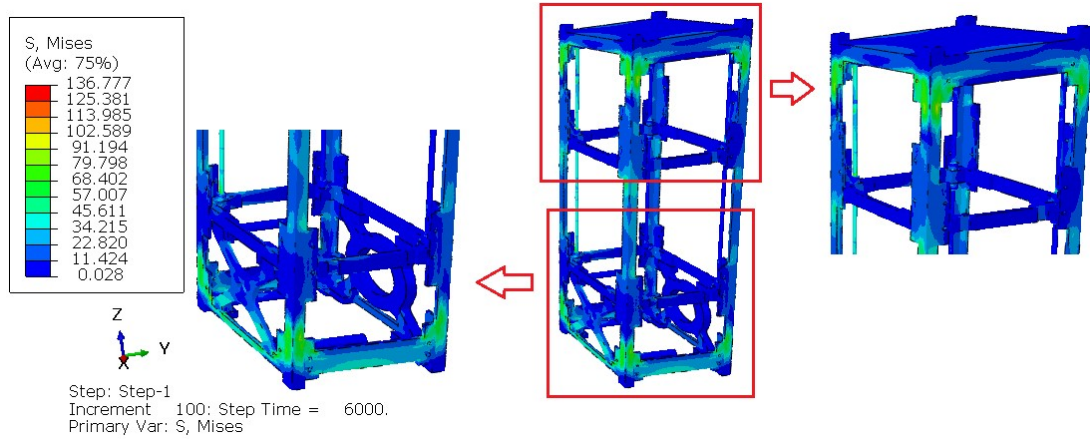


Şekil 16: Isıl Yükler

Analizin başlangıç anında uydunun sıcaklığının 25°C olduğu varsayılmıştır. 11387 saniye boyunca 60 saniye aralıklarla gerçekleştirilen bağlaşıklık ısı analiz sonucunda en kritik anın 6000. saniye olduğu bilgisi elde edilmiştir. Bu andaki uydu yapısındaki sıcaklık dağılımı Şekil 17’de; gövde yapısı üzerindeki Von Mises gerilmesi dağılımı da Şekil 18’de sunulmuştur.



Şekil 17: 6000. Saniyede Uydu Gövdesindeki Sıcaklık Dağılımı [°C]



Şekil 18: 6000. Saniyede Uydu Gövde Yapısındaki Von Mises Gerilmesi Dağılımı [MPa]

Gerçekleştirilen bağlaşıklık ısı analizler sonucunda 6000. saniyede uydu yapısı üzerindeki en yüksek sıcaklığın 48°C'ye ulaştığı en düşük sıcaklığın ise 9°C'ye düştüğü gözlenmiştir. En yüksek sıcaklık güneş ışınlamına maruz kalan yüzeyde oluşmuş olup en düşük sıcaklığın görüldüğü bölüm üzerine herhangi bir ışınlam uygulanmamıştır. Çalışma kapsamında güneş panelleri sadece PCB FR-4 malzemesinden modellenmiştir. Daha detaylı bir modelleme yapılarak uydunun tam olarak hangi yüzeylerinin hangi anlarda ne kadar ışınlamaya maruz kaldığı belirlendiğinde bu analizler güncellenerek uydu alt sistemleri için daha yüksek doğruluğa sahip sonuçlar elde edilebilir. Bu koşullar altında Al 6061-T6 malzemesinin 149°C'deki (yapı için belirlenen çalışma limitlerinin $-150^{\circ}\text{C} - 150^{\circ}\text{C}$ aralığında olduğu varsayımıyla) akma dayanımı göz önünde bulundurulduğunda, fırlatma esnasında küp uydu yapısına ait güvenlik toleransının $214/136.777 = 1.6$ olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

SONUÇ

Bu bildiride 3 birimlik SSS-2B uydusunun tasarım ve yapısal analizinin ön tasarım çalışması sunulmuştur. Bunun için, öncelikle uydu için belirlenen sistem gereksinimleri, alt sistem gereksinimleri ve tasarım felsefesi açıklanmıştır. Ardından standartlar kapsamında belirlenen uzay ortamındaki zorlu şartlara dayanıklılığı önceden test edilmiş yapı malzemeleri karşılaştırılarak karar matrisi oluşturulmuştur. Bunun sonucunda Al6061-T6 ana iskelet ve raylar için yapı malzemesi olarak belirlenmiştir. Analiz sonucunun güvenilirliğini çok etkilemeyecek ancak analiz süresini önemli ölçüde azaltacak kabul edilebilir varsayımlar ile sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Uydunun parçaları için lineer kübik ve kuadratik tetragonal olmak üzere iki farklı eleman türünü barındıran bir çözüm ağı oluşturulmuştur. Küp uyduların, daha büyük uyduların yanında ikincil yük olarak fırlatılmalarından dolayı yerleştirilme pozisyonu değişkenlik gösterebilmektedir. Bundan dolayı olası en kötü senaryoyu uygulamak amacıyla uydu üç ekseninden 10 g kuvvetinde yüke maruz bırakılmıştır. Fırlatma esnasında maruz kalınan yer çekimsel yükler altında SSS-2B uydu modelinin yapısal dayanıklılığını test etmek amaçlı ABAQUS'te sanki-statik analiz ve burkulma analizi gerçekleştirilmiştir.

Sanki-statik fırlatma analizinin sonucunda uydunun gövdesinde oluşan maksimum gerilme değeri 225.8 MPa olarak gözlenmiştir. Bu gerilme değeri kartların bağlandığı dairesel kesite sahip taşıyıcı sütunlarda oluşmuştur. Taşıyıcı sütunların malzemesi olan Al 6061-T6 malzemesinin 276 MPa akma dayanımı ile en kötü senaryoda dahi uydu yapısının elastikliğini koruduğu gösterilmiştir. Bunun sonucunda sanki-statik analiz için güvenlik toleransı 1.2 olarak hesaplanmıştır.

Burkulma analizi sonucunda fırlatma esnasında her yönden 10 g'lık yüke maruz kalması durumunda dahi burkulma olmadığı gözlemlenmiştir. Mevcut yükün 53.8 katına çıkartılması durumunda güneş panellerinde burkulma olacağı tespit edilmiştir.

Ayrıca kullanılabilecek uydu fırlatma aracını belirlemek amaçlı doğal titreşim analizi yapılmıştır. Uydu yapısının ve kartların fırlatma sırasında fırlatma aracından kaynaklı zorlama sonucunda rezonansa girmesini önlemek amacıyla fırlatma aracının oluşturabileceği titreşim frekansının 103 Hz değerinden daha yüksek olmaması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Bunun sonucunda rezonanstan kaçınmak için uydu fırlatma aracının zorlama frekansı değerinin 103 Hz'den düşük olması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu sonuç standartlarda belirtilen yapı için eşik frekans değerini sağlamaktadır.

Son olarak, uydunun maruz kaldığı güneş, albedo ve dünya kızılötesi ısıma radyasyonları altında bağlaışık ısı analizleri yapılmıştır. Bunun sonucunda 6000. saniyede uydu yapısı üzerindeki en yüksek sıcaklığın 48°C'ye ulaştığı en düşük sıcaklığın ise 9°C'ye düştüğü gözlenmiştir. Uydu taşıyıcı sütunların üzerinde oluşan maksimum gerilme 136.8 MPa olarak gözlenmiştir ve buna dayanarak güvenlik toleransı 1.6 olarak hesaplanmıştır.

Gelecek çalışmalarda daha detaylı bir modelleme yapılması, uydunun tam olarak hangi yüzeylerinin hangi anlarda ne kadar ışıma maruz kaldığı bilgisinin belirlenmesiyle daha yüksek doğruluğa sahip analiz sonuçlarının elde edilmesi hedeflenmektedir.

Kaynaklar

APSCO, 2016. *APSCO Small Student Satellite Project Feasibility Study*

Athirah, N., Afendi, M., Hafizan, K., Amin, N. ve Majid, M., 2014. *Stress and thermal analysis of CubeSat structure*, Applied Mechanics and Materials, Trans Tech Publications, Cilt.554, s.426-430

- Chin, A., Coelho, R., Nugent, R., Munakata, R. ve Puig-Suari, J., 2008. *CubeSat: the pico satellite standard for research and education*, AIAA Space 2008 Conference & Exposition, s.7734
- Deepak, R. A. ve Twiggs, R. J., 2012. *Thinking out of the box: Space science beyond the CubeSat*, Journal of Small Satellites, Cilt.1, s.3-7
- Galeone, P., Vanreusel, J., Gulino, M., Sagath, D. ve Gupta, V., 2014. *The Fly Your Satellite*, Programme of the ESA Education Office. The 4S Symposium, Majorca, Spain.
- Heidt, H., Puig-Suari, J., Moore, A., Nakasuka, S. ve Twiggs, R., 2000. *CubeSat: A new generation of picosatellite for education and industry low-cost space experimentation*
- Helvajian, H. ve Janson, S. W., 2008. *Small satellites: past, present, and future*, Aerospace Press California.
- Kulu, E. ve diğerleri, 2020. *Nanosatellite & CubeSat Database*.
- Mehrparvar, A., Pignatelli, D., Carnahan, J., Munakat, R., Lan, W., Toorian, A., Hutputanasin, A. ve Lee, S., 2014. *Cubesat design specification rev. 13*, The CubeSat Program, Cal Poly San Luis Obispo, US.
- Messier, D., 2015. Tiny'Cubesats' Gaining Bigger Role in Space, Space.com
- Skrobot, G. L., 2011. *ELaNa-Educational Launch of Nanosatellite Enhance Education through Space Flight*, 25th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites.
- Süer, M., 2013. *TURKSAT 3USAT Uydusu'nun Mekanik Tasarımı*, İstanbul Teknik Üniversitesi, s.31-94
- Yağlıoğlu, B., Köse, S., Ataş, Ö., Tekinalp, O., Kahraman, D. ve Süer, M., 2019. *A Multi-National Multi-Institutional Educaiton Framework: APSCO SSS-2B CubeSat Project*, 2019 9th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST), IEEE, s.553-557