

FARKLI UYDU FIRLATICI ARAYÜZLERİ İÇİN TİTREŞİM TEST ADAPTÖRÜ TASARLANMASI

Ahmet Akgül¹, Ümit Bağdat², Prof. Dr. Rahmi Ünal³

1. GİRİŞ

Uydular genel olarak üç farklı şekilde sınıflandırılmaktadır ve bu sınıflandırmalar kullanılarak tanımlanmaktadır. Bunlardan ilki, görev yaptıkları yörüngelere göre sınıflandırmadır ve şu şekildedir [1]: Alçak İrtifa Yörünge (LEO <2000 km), Orta İrtifa Yörünge (MEO <35786 km), Yere Eşzamanlı Yörünge (GEO =35786 km), Yüksek İrtifa Yörünge (HEO >35786 km). Diğer bir sınıflandırma şekli ise uyduların görev tiplerine göre yapılır. Bu görevler şu şekildedir: İletişim-Haberleşme, Meteoroloji, Yer-Gözlem, Astronomi, Askeri ve Navigasyon. Bazı durumlarda bir uydunun birden fazla görevi olabilmektedir. Bu durumlarda asıl görevi ne ise o sınıfta yer alırlar [2]. Son olarak ise kütlelerine göre sınıflandırılırlar [1]: Büyük Uydular (>500 kg), Küçük Uydular (<500 kg), Mikro Uydular (<200 kg), Nano Uydular (<10 kg), Piko Uydular (<1 kg).

Uydular görev süreleri boyunca önce yer ve sonra uzay ortamına maruz kalmaktadırlar. Bu ortamlardan kaynaklanan çeşitli durumlar uydu üzerinde bazı statik ve dinamik yükler oluşturmaktadır. Montaj, test aşaması, nakliye

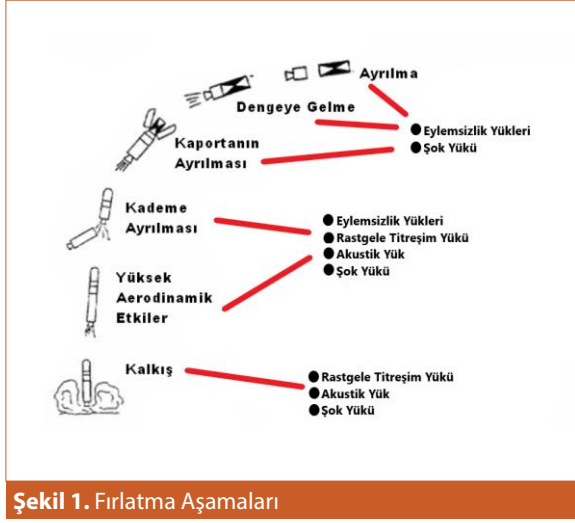
işlemleri ve fırlatma ortamı, uydunun yerde yüke maruz kaldığı ortamlardır. Fırlatma ortamı bu ortamlar arasında uydular üzerinde en büyük yükleri oluşturan ve en ciddi yapısal hasarları verebilecek olan ortamdır. Uydular; amaçlarına göre belirlenen yörüngelerine, fırlatma sistemleri kullanılarak fırlatılırlar. Uydular, fırlatma sistemine montajının yapılmasından, uydunun görev yörüngesine varıp fırlatma sisteminden ayrıldığı zamana kadar, eylemsizlik yükleri, sinüzoidal titreşim yükleri, akustik basınçtan kaynaklı rastgele titreşim yükleri ve ekipmanların açılmasını sağlayan patlamalı kilit mekanizması patlamalarından kaynaklanan şok yüklerine maruz kalmaktadırlar. Fırlatılma aşamaları Şekil 1'de gösterildiği gibidir.

Bu yükler uyduların yapısal olarak deformasyona uğramasına, alt sistemlerinin ve aksamalarının zarar görmesine neden olabilmektedir. Fırlatıcı firmalar bu yapısal yüklerin seviyeleri hakkında bilgi vermekte ve bu veriler doğrultusunda uydunun yapısal testlerinin yapılmasını istemektedir. Bunun amacı, uydunun yapısal bütünlüğünü doğrulamak ve fırlatma esnasında doğabilecek riskleri en az düzeye indirmektir. Bu sebeple uydu tasarımları ve

¹ Öğrenci, Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü - ahmet.akgul@gazi.edu.tr

² Makina Mühendisi, Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş., USET Merkezi, Montaj ve Entegrasyon - umit.bagdat@tai.com.tr

³ Öğretim Üyesi, Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü - runal@gazi.edu.tr



Şekil 1. Fırlatma Aşamaları

testleri, fırlatıcının belirlediği ve kullanıcı kılavuzlarında verilen yük koşullarına uygun şekilde yapılmaktadır [3]. Uyduların maruz kaldığı titreşim yükleri, fırlatmanın farklı evrelerinde farklı seviyelerdedir. Bu değerler, fırlatıcı firmalar tarafından kendi fırlatıcılarından elde ettikleri veriler doğrultusunda belirlenir. Bu yüklerin şiddeti, maruz kalındığı süreler, frekans aralıkları gibi veriler, fırlatıcıların kullanıcı kılavuzlarında, yük zarfları şeklinde belirtilir. Titreşim testleri, fırlatıcının maruz kalacağı azami yük değerleri baz alınarak yapılmaktadır. Ariane-5 ve Ariane-6 fırlatıcılarının maruz kaldıkları yükler Tablo 1’de gösterildiği gibidir [4].

Tablo 1. Ariane-5 ve Ariane-6 Fırlatıcılarının Maruz Kaldıkları Yükler (S: Statik, D: Dinamik)

Kritik Uçuş Safhaları	Ariane-6			Ariane-5		
	İvme (g)			İvme (g)		
	Yatay	Dikey	S+D	Yatay	Dikey	S+D
	S	D	S+D	S	D	S+D
Kalkış	-2	±1,5	±2	-1,8	±1,5	±2
Aerodinamik Etkiler	-2,8	±0,8	±2	-2,7	±0,5	±2
Basınç Salınımları	-4,6	±1,4	±1	-4,4	±1,6	±1
Katı Yakıtlı İticiilerin Ayrılması	-0,9	±3,1	±0,9	-0,7	±3,2	±0,9

2. TİTREŞİM TESTLERİ

Titreşim testleri temiz oda adı verilen; sıcaklık, basınç, nem ve partikül sayısının sürekli olarak izlendiği ve düzenlendiği Montaj Entegrasyon ve Test Merkezlerinde

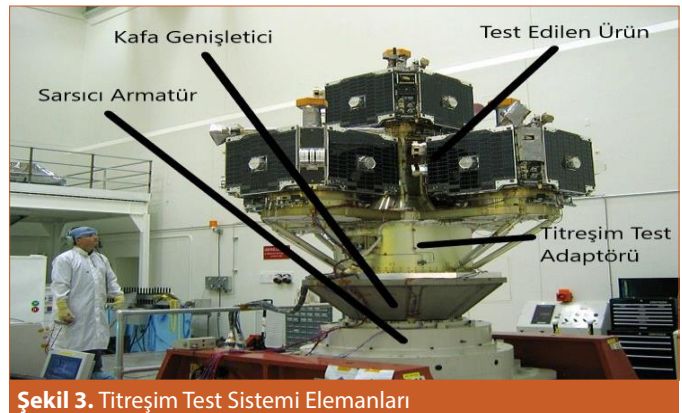
(“AIT Center”) yapılmaktadır. Ülkemizin ilk Uydu Sistemleri Entegrasyon ve Test Merkezi TUSAŞ bünyesinde, Kahramankazan Merkez yerleşkesinde yer almaktadır. Tesis 2015 yılında kurulmuştur ve kütlesi 5 tona kadar olan birden fazla uydunun aynı anda montaj, entegrasyon ve testleri yapılabilmektedir.

Titreşim testleri, titreşim test sistemleri kullanılarak yapılmaktadır. Şekil 2’de USET Merkezinde bulunan titreşim test sistemi gösterilmiştir. Sistemin merkezinde elektrodinamik sarsıcı adı verilen sarsıcı sistem bulunmaktadır. Bu sistem, uydunun fırlatma ve uçuş safhalarında maruz kaldığı sinüzoidal, rastgele ve şok titreşim yüklerini taklit eden titreşim profillerini oluşturmaktadır. Sarsıcı, dikey ekseninde tek başına veya kafa genişletici ile; yatay ekseninde ise kayar tabla ile kullanılmaktadır. Uydu, kafa genişletici veya kayar tabla üzerine titreşim test adaptörü kullanılarak monte edilmektedir [5]. Şekil 3’te örnek bir test sistemi gösterilmiştir.

Titreşim testleri ECSS (“European Cooperation for Space Standardization”) tarafından belirlenen birtakım stan-



Şekil 2. USET Merkezi Titreşim Test Sistemi



Şekil 3. Titreşim Test Sistemi Elemanları

dartlara uyularak yapılmaktadır. Bu standartlar, testlerin yapılma amacına göre değişiklik göstermektedir. Bunlar şu şekilde sınıflandırılmıştır: Prototip, Ön-Uçuş, Kalifikasyon ve Kabul Testleri. Test koşulları, test seviyeleri ve toleransları gibi veriler ECSS-E-ST-10-03C standardında belirtilmektedir [6].

3. PROBLEM TANIMI

Fırlatıcıların kullanıcı kılavuzları incelendiğinde, karşımıza, uyduların fırlatıcıya bağlanmasını sağlayan standart olarak beş farklı çapta mekanik adaptör çıkmaktadır. Bunlar şu şekildedir: 937 mm, 1194 mm, 1575 mm, 1663 mm ve 1666 mm. Bu adaptörler ile titreşim test adaptörlerinin uydu bağlantı arayüzleri aynı geometriye sahiptir. USET Merkezi'nde, kullanımda olan 1194 mm çapa sahip bir titreşim test adaptörü bulunmaktadır. Ancak, olası 937 mm çapa sahip uyduların projelerinde kullanılabilecek bir test adaptörü bulunmamaktadır. Bu çalışma ile ülkemizde planlanan uydu projelerinde kullanılmak üzere 937 mm çapa sahip titreşim test adaptörünün tasarımı ve analizleri yapılarak gereksinim duyulduğu taktirde üretilip kullanılabilmesi için tasarımın hazır hale getirilmesi amaçlanmıştır.

4. GERÇEKLEŞTİRİLEN ARAŞTIRMA FAALİYETLERİ

Titreşim testi sırasında adaptörün uydu üzerinde oluşturabileceği etkiler önemlidir. Adaptör, sarsıcının ürettiği tüm yükleri uyduya eşit olarak iletmelidir. Bu sebeple bir titreşim test adaptörü tasarlanırken göz önünde bulundurulacak kriterler ve yapılması gereken analizler vardır. Bu bölümde başlıca bu kriterler hakkında bilgi verilmiş ve ardından, yapılan tasarım ve analiz çalışmaları anlatılmıştır. Tasarım süreci Şekil 4'te gösterildiği gibi şemaya dökmüştür.

Titreşim testlerinden doğru sonuçlar almak ve testi yapılan ekipmanları herhangi bir deformasyona maruz bırakmamak için, test adaptörü sarsıcıdan gelen kuvvetleri herhangi bir bozulmaya uğramadan, uyduya doğrudan

aktarmalıdır. Test adaptörünün doğal frekansları testlerin yapıldığı frekans bandı içerisinde veya bu aralığa yakın değerlerde olur ise, adaptör, test esnasında rezonansa girerek yanlış sonuçlar elde edilmesine ve hatta uydu ve alt sistemlerinin zarar görmesine sebep olabilir. Bu durumdan kaçınmak amacıyla adaptörün doğal frekanslarının test yapılan frekans aralığının mümkün olduğu kadar üzerinde bulunması gerekmektedir. Sistemlerin doğal frekans formülü eşitlik (1)'de gösterildiği gibidir. Burada 'f_n' doğal frekansı, 'k' yay sabitini ve 'm' ise kütleli göstermektedir.

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1)$$

Diğer yandan sarsıcının ürettiği kuvveti verimli kullanabilmek amacıyla test sistemi üzerindeki toplam kütle en az seviyede olması gerekmektedir. Sarsıcının ürettiği kuvvet sabitken, uydu üzerinde oluşturabileceği ivme, sarsıcının üzerindeki kütle ile ters orantılıdır. Rijitlik gereksinimi, testin doğru sonuçlar vermesi ve uydunun herhangi bir zarar görmemesi açısından tasarımın en önemli kriteridir. Bununla birlikte sarsıcının ürettiği kuvveti verimli kullanabilmek açısından kütle de önem taşımaktadır [7]. Ancak rijitliğin artması, orantısız olarak kütle de arttırmaktadır. Bu iki önemli kriterin tasarım hedefleri doğrultusunda ideal seviyelerde dengede tutulması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda adaptör için topoloji optimizasyonu çalışması yapılmıştır.

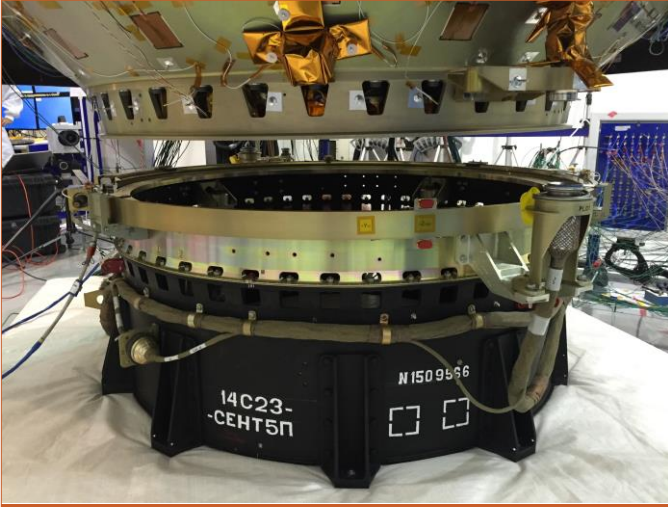
4.1 Geometri ve Modelleme

Adaptör, uydu ile kayar tabla arasında kusursuz bir bağlantı sağlamalıdır. Titreşim testlerinde, test adaptörünün alt yüzeyi kayar tabla ile civata bağlantısı kullanılarak, üst yüzeyi ise uydunun arayüzü ile kelepçe bandı ("clamp-band") kullanılarak bağlanmaktadır. Örnek bir kelepçe bandı Şekil 5'te gösterilmiştir.

Adaptör üzerinde karmaşık ve ani kesit değişikliklerine sahip geometriler bulunmamalıdır. Karmaşık geometriler ve ani kesit değişiklikleri, adaptörün yay katsayısında bir azalmaya sebep olarak doğal frekans değerlerinin düşmesine yol açabilmektedir. Tasarıma başlayabilmek için uydunun kütlesi, kütle merkezi ve konumlandırılması gibi ön bilgilere sahip olmak gerekmektedir. Tasarımın ilk adımında kayar tablanın bağlantı deliklerinin yerleşimi, civata ve dış ebatları gibi sarsıcı tablanın detayları ve uydu bağlantı arayüzü, merkezi silindir çapı gibi ölçüler değerlendirilmelidir [7]. Çalışma boyunca birçok fırlatıcının kullanıcı kılavuzları incelenerek hedefler doğrultu-



Şekil 4. Tasarım Süreci

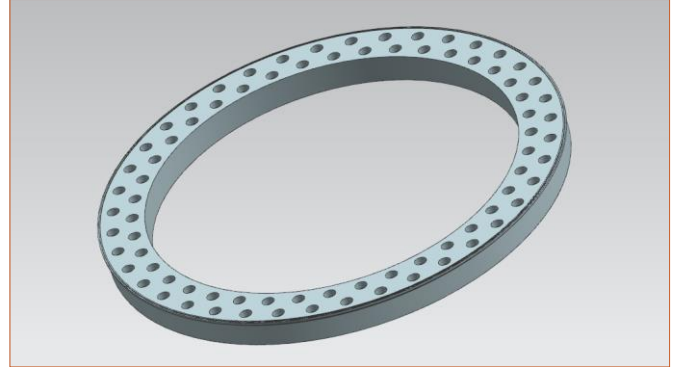


Şekil 5. Uzak Aracı ile Mekanik Adaptör Bağlantısını Sağlayan Keleçe Bandı

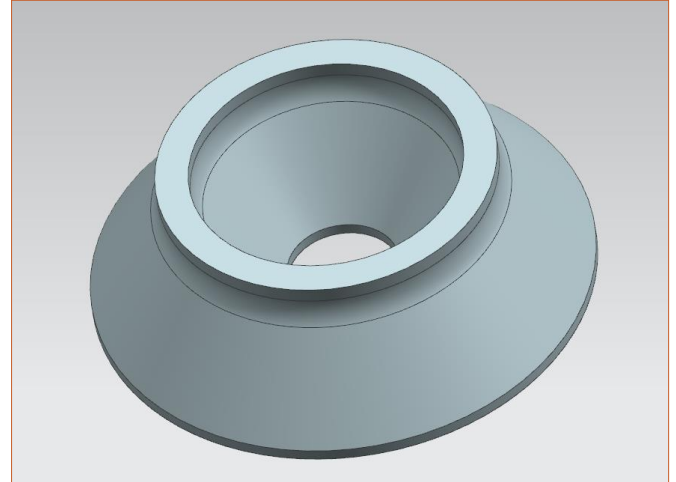
sunda Ariane-5 fırlatıcısının 937 mm çapındaki uydular için kullanılan PAF 937 mekanik adaptörü referans olarak alınmıştır. Buna göre azami uydu kütlesi 4 ton olarak belirlenmiş ve uydunun kütle merkezi adaptör-uydu bağlantı arayüzünden 1500 mm yükseklikte kabul edilmiştir [8]. Ardından USET Merkezinde kullanılan titreşim test sistemi incelenmiştir. Kayar tabla bağlantısı için M12 cıvatalar kullanıldığı görülmüştür. Kayar tabla üzerindeki deliklerin X ve Y eksenlerinde doğrusal olarak konumlandıkları belirlenmiş ve merkezleri arasındaki mesafe 80 mm olarak ölçülmüştür.

Titreşim test adaptörü 2 parçadan oluşacaktır. Üst parça bağlantı arayüzü, alt parça ise adaptörün kendisidir. Adaptör geometrisiyle ilgili ön bilgiler edinildikten sonra PAF 937 adaptörünün uydu bağlantı arayüzü modellenmiştir. Bu arayüzün teknik çizimi Ariane-5 Kullanıcı Kılavuzu'ndan edinilmiştir. Bu tasarımdaki önemli nokta bağlantı arayüzünün adaptörle ideal şekilde bağlanabilmesi için yeterli et kalınlığına sahip olmasıdır. Bu uzunluk 90 mm olarak belirlenmiştir. Modelleme sonucunda arayüz parçasının yüksekliği 57 mm elde edilmiştir. Arayüz tasarımı Şekil 6'da gösterilmiştir.

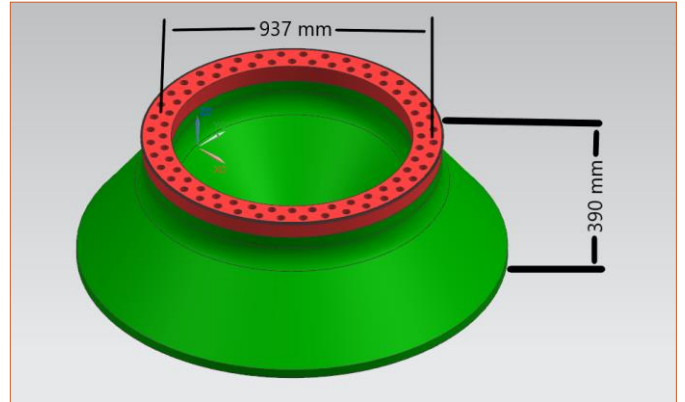
Ardından farklı fırlatıcılar için kullanılan mekanik adaptörler ve USET Merkezinde mevcut kullanımda olan 1194 mm çapına sahip titreşim test adaptörü incelenerek, adaptörün bağlantı arayüz parçasıyla birlikte toplam yüksekliğinin 390 mm olmasına karar verilmiştir. Böylece elde edilen veriler doğrultusunda titreşim test adaptörünün kabaca modellemesi yapılmıştır. Kaba tasarımı yapılan titreşim test adaptörü Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 6. Arayüz Parçası Katı Modeli



Şekil 7. Kaba Tasarımı Yapılan Titreşim Test Adaptörü



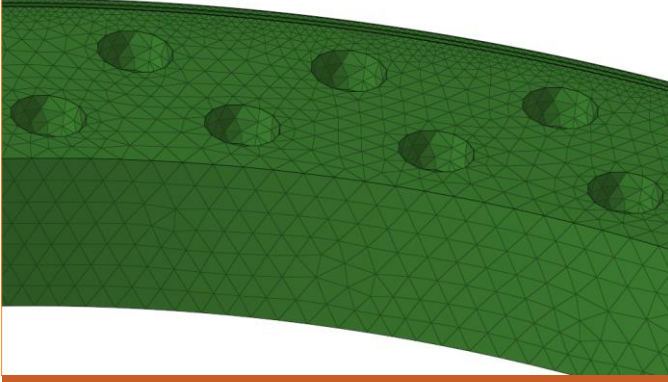
Şekil 8. İlk Tasarımları Yapılan Adaptör ve Arayüz Parçası

Adaptör ile bağlantı arayüz parçası montaj modeli Şekil 8'de gösterilmiştir. Modelleme, Siemens NX yazılımı kullanılarak yapılmıştır.

4.2 Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması

Bu aşamada adaptör ve arayüz parçasının sonlu elemanlar modeli Altair Hypermesh yazılımı kullanılarak oluş-

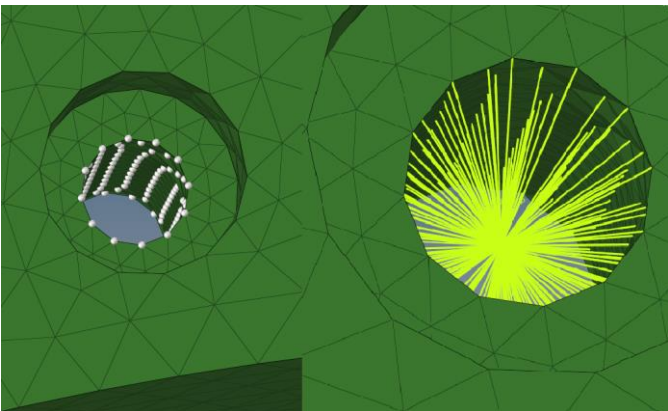
turulmuştur. Ağ yapısı oluşturulurken 1. dereceden dört yüzlü ("Tetrahedral") elemanlar kullanılmıştır. Eleman boyutu 10 mm olarak belirlenmiştir ancak eğim, kıvrım ve delik bulunan bölgelerde ağ yapısının bozulmaması için bu değer 4 mm'ye kadar düşmektedir. Arayüz parçası için oluşturulan ağ yapısı Şekil 9'da gösterildiği gibidir.



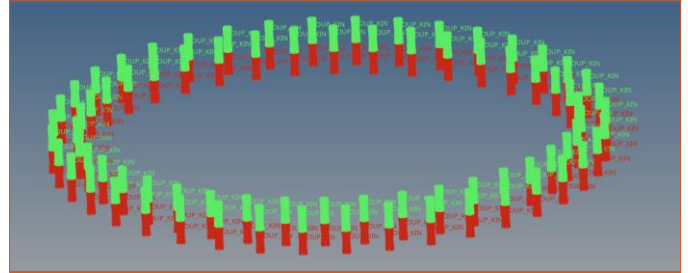
Şekil 9. Arayüz Parçası Ağ Yapısı

Adaptör, kayar tabla ve üzerindeki arayüz parçası ile cıvata bağlantısı kullanılarak bağlanacaktır. Bu bağlantılar, bağlantı deliklerinin iç yüzeylerindeki düğüm noktaları ile deliğin orta noktasına atanan tek bir düğümün RB2 eleman kullanılarak birbirine bağlanmasıyla modellenmiştir. RB2 geometrik olarak tek boyutlu bir elemandır ve yük aktarma amacıyla kullanılmıştır. Adaptör ve kayar tabla bağlantısı, bu düğüm noktalarının serbestlik derecelerinin 3 ekseninde (X, Y ve Z) kısıtlanmasıyla modellenmiştir. Cıvata deliklerinin sonlu elemanlar modeli Şekil 10'da gösterilmiştir.

Aynı işlemler arayüz parçası – adaptör bağlantısı için de yapılmıştır. Bu aşamada, RB2 elemanlar kullanılarak modellenen bağlantı delikleri birbirleri ile yine RB2 eleman kullanılarak birbirine bağlanmıştır. Şekil 11'de görüldüğü üzere kırmızı elemanlar adaptör üzerindeki; yeşil eleman-



Şekil 10. Bağlantı Deliklerinin Sonlu Elemanlar Modeli



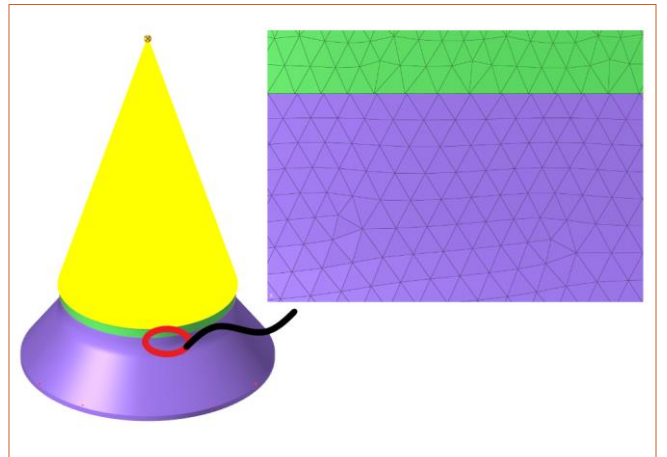
Şekil 11. Arayüz-Adaptör Bağlantısı

lar ise arayüz parçası üzerindeki bağlantı deliklerini göstermektedir.

Daha sonra adaptör ve arayüz parçasının temas yüzeylerine sürtünme özellikleri tanımlanmıştır. Sonlu elemanlar modeli üzerinde, bu yüzeylerin temas halinde oldukları tanımlanmış ve sürtünme katsayıları girilmiştir. Adaptör için çelik ve arayüz parçası için alüminyum kullanılmasına karar verilmiştir. Bu nedenle sürtünme katsayısı, bu malzemelerin çelik-alüminyum sürtünme katsayısı olarak alınmıştır. Şekil 12'de adaptör – arayüz parçası temas yüzeyi gösterilmiştir.



Şekil 12. Adaptör-Arayüz Parçası Temas Yüzeyleri Modeli



Şekil 13. Adaptörün Sonlu Elemanlar Modeli

Uydu kütle merkezi, fırlatıcı kullanıcı kılavuzundan elde edilen verilere göre uydu adaptör bağlantı yüzeyinden 1500 mm yukarıdadır. Sonlu elemanlar modeli üzerinde bu noktaya bir düğüm atanmıştır. Ardından kütle merkeziyle adaptörün üst yüzeyindeki tüm düğüm noktaları arasındaki bağlantıyı sağlamak için RB2 eleman atanmıştır. Uydu kütlesi, daha önce belirlenmiş olan kütle merkezine 4 ton olarak tanımlanmıştır. Adaptörün sonlu elemanlar modeli Şekil 13'te gösterilmiştir.

4.3 Malzeme Seçimi

Titreşim test adaptörlerinde sıkça kullanılan malzemeler, çelik, alüminyum ve magnezyumdur. Malzeme seçimi yapılırken malzemenin elastisite modülü (E), öz kütlesi (ρ) ve bu iki değer birbirine oranı (E/ ρ) dikkate alınmalıdır (Tablo 2). Bu oran, malzemenin doğal frekansına etki eden bir orandır. Çelik, alüminyum ve magnezyum için bu oran neredeyse aynı değere sahiptir. Bu nedenle seçilecek malzeme, adaptörün doğal frekanslarında büyük bir değişime yol açmayacaktır [7]. Bu üç malzemenin bazı avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Farklı öz kütlere sahip olmaları nedeniyle seçilecek malzeme, adaptörün kütlesini doğrudan etkileyecektir. Diğer yandan üretim maliyetleri de farklılık göstermektedir. Magnezyum bu malzemeler arasında sönümlenme oranı en yüksek olan malzemedir ve bu sayede yüksek performans gerektiren testlerde kullanılması uygundur. Ancak magnezyum bir test adaptörünün üretim maliyeti çelik ve alüminyuma göre daha yüksektir. Çelik, söz konusu metaller içerisinde en ağır olanıdır ancak üretim teknolojisi çok gelişmiştir ve üretim maliyeti alüminyum ve magnezyuma göre daha düşüktür. Malzeme seçimi aşamasında daha önce yapılmış titreşim test adaptörü çalışmaları ve USET Merkezinde mevcut kullanımda olan adaptör incelenmiş ve bu çalışmalarda kullanılan malzemeler ve özellikleri bir liste halinde hazırlanmıştır. Analiz aşamasında farklı alternatif malzemeler arasında değerlendirmeler yapılarak adaptör için S235 çelik malzeme, arayüz parçası için ise Al7075 alüminyum malzeme seçilmiştir. Arayüz parçasının alüminyum seçilmesinin nedeni bağlantının uydu tarafının da alüminyum olması ve burada oluşabilecek bozulma ve korozyonun önlenmek istenmesidir.

Tablo 2. Titreşim Test Adaptörü Malzemeleri [7]

	Young Modülü (E), GPa	Özkütle (ρ), kg/m ³	E/ ρ , (N*m)/kg
Çelik	207	7840	2,65X10 ⁷
Alüminyum	69	2270	2,49X10 ⁷
Magnezyum	41,4	1800	2,3X10 ⁷

4.4 Modal Analiz

Uyduların sinüzoidal titreşim testleri 5-100 Hz frekans aralığında; elektrodinamik sarsıcının, uydunun fırlatma ve uçuş safhalarında karşılaşılabileceği sinüzoidal yükleri taklit etmesiyle yapılmaktadır. Bununla birlikte uydunun doğal frekanslarını tespit etmek amacıyla da sinüs tarama testleri gerçekleştirilmektedir. Adaptörün doğal frekans değerlerinin, sarsıcının ürettiği yükleri herhangi bir bozulmaya uğramadan uyduya iletebilmesi için, testin yapıldığı frekans aralığından mümkün olduğunca yukarıda olması beklenmektedir. Elde edilen modelin doğal frekanslarını tespit etmek ve bu frekanslar altındaki dinamik davranışlarını incelemek amacıyla mod analizleri yapılmıştır. Bu aşamada yapılan analizlerde sınır koşulları gerçek test koşullarını sağlayacak şekilde belirlenmiştir. Adaptörün ilk doğal frekansının 150 Hz (test frekans aralığının 1,5 katı) olması, tasarım hedefi olarak belirlenmiştir. Optimizasyon çalışmasından önce yapılan serbest mod analizi sonuçlarına göre modelin ilk doğal frekansı 459,20 Hz'dir. Nihai tasarım elde edildiğinde yapılan mod analizi sonuçları araştırma sonuçları ve çıktılar başlığı altında verilmiştir. Tüm analiz çalışmaları Abaqus yazılımı kullanılarak yapılmıştır.

4.5 Topoloji Optimizasyonu

Topoloji optimizasyonu, belirlenen bir tasarım alanı içerisindeki malzeme dağılımını belirli sınır koşulları altında optimize eden bir çalışmadır. Şekil 7'de gösterilen ilk tasarım modeli, malzeme tanımlanmasının ardından 2072 kg kütleyle sahiptir. Doğal frekans değerlerinin azami değerlere yükseltilecek, adaptör kütlesinin azaltılması amacıyla topoloji optimizasyonu çalışması yapılmıştır. Topoloji optimizasyonu çalışmaları Tosca Topoloji Optimizasyon Aracı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Adaptörün, bağlantı arayüz parçası ile bağlanacağı üst bölgesi ve kayar tabla ile bağlanacağı alt bölgesi tasarım alanının dışında tutulmuştur. Bunun amacı cıvata bağlantılarının yapılacağı bölgelerde herhangi bir kütle çıkartma işleminin hedeflenmemesidir. Tasarım alanı Şekil 14'te gösterilmiştir.

Bazı optimizasyon aşamaları Şekil 15'te gösterilmiştir. Elde edilen geometrinin kütlesi 880 kg'a düşmüş ve ilk doğal frekansı 502 Hz değerine yükselmiştir.

Topoloji optimizasyonu çalışmasıyla kütle hedefine ulaşılmasının ardından, elde edilen geometri referans alınarak, tasarım güncellenmiştir. Yeni tasarım üzerinde yapılan mod analizi sonuçlarına göre sistemin doğal frekansını yükseltme amacıyla hassas bölgelere destek kütleleri ek-



Şekil 14. Topoloji Optimizasyonu Tasarım Alanı

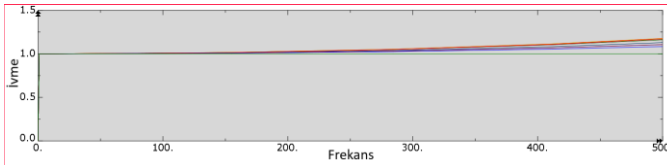


Şekil 15. Topoloji Optimizasyonu Aşamaları

lenmiştir. Böylece alternatif tasarımlar elde edilmiş ve bu tasarımların mod analizleri incelenmiştir.

4.6 Frekans Cevap Fonksiyonu Analizi

Frekans cevap fonksiyonu analizinde sisteme bir giriş tahriği uygulanarak, belirlenen bölgelerde alınan cevap incelenip sistemin rezonans frekansları, sönüm yaptığı frekanslar ve mod şekilleri incelenebilmektedir. Yapılan analizlerde, adaptörün tabanından uygulanan 1g'lik ivmenin 0-500 Hz frekans bandında ihmal edilebilecek bir değışıme uğrayarak iletildiği görülmüştür (Şekil 16).



Şekil 16. Birim Tahriğin 0-500 Hz Bandında Alınan Çıktısı

4.7 Statik Analiz

Ariane-5 Kullanıcı Kılavuzu'nda belirtilen, sinüzoidal titreşim testlerinde uydu üzerinde oluşan yük değerleri referans alınarak uygulanacak azami yükler belirlenmiştir. Bu değerler X ve Y eksenlerinde ± 39.240 N, Z ekseninde ise ± 49.050 N'dur [8]. Bu yükler uydunun kütle merkezinden uygulanmış ve test koşullarını sağlayacak sınır koşulları tanımlanmıştır. Analiz sonuçlarına göre, adaptör üzerindeki en yüksek yer değışıme (deplasman) görülen bölgenin, uydula temas ettiği yüzey olduğu görülmüştür. Bu yüzeyde belirlenen düğüm noktalarının statik yükler altındaki yer değışıme (deplasman) değerleri Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 3. Adaptörün Uydu ile Temas Ettiği Yüzeydeki Yer Değışıme Miktarları

Düğüm No	187183	178476	164620	172369	147576
Deplasman	$3,3 \times 10^{-3}$	$3,2 \times 10^{-3}$	$4,1 \times 10^{-4}$	$4,3 \times 10^{-3}$	$4,6 \times 10^{-4}$

5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE ÇIKTILAR

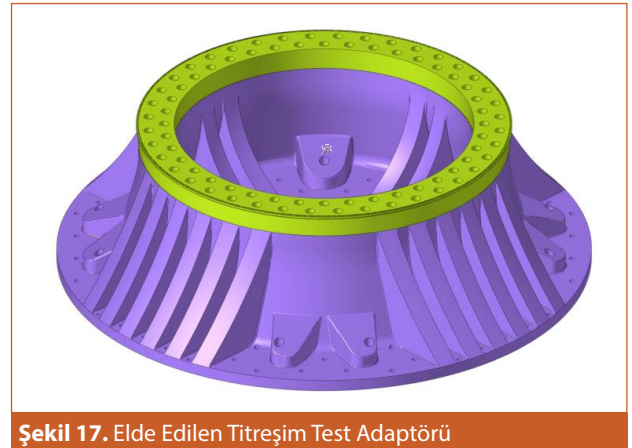
Analiz çalışmaları sonucunda hedeflenen değerlere ulaşılmış ve çalışma sonlandırılmıştır. Elde edilen adaptörün test koşulları altındaki mod analizi sonuçlarına göre 0-2000 Hz frekans bandında beş adet mod bulunduğu ve ilk doğal frekans değerinin 149,79 Hz olduğu saptanmıştır. 2000 Hz'e kadar olan doğal frekans değerleri Tablo 4'te gösterilmiştir. Ardından yapılan frekans cevap ve statik analiz sonuçlarına göre uygulanan tahrikin ihmal edilebilir bir seviyede iletildiği ve bağlantı yüzeyindeki azami deplasman değerinin $4,3E-3$ mm olduğu saptanmıştır. Tüm bu analiz sonuçları değerlendirildiğinde, adaptörün katılık (rijitlik) gereksinimini sağladığı görülmektedir.

Tablo 4. Daptörün Doğal Frekansları

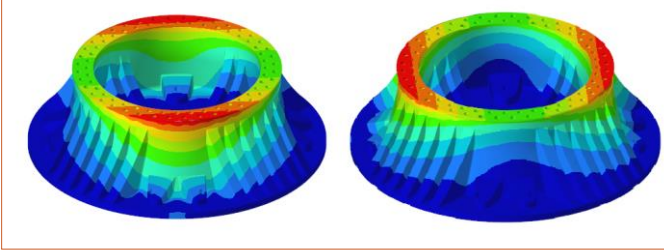
Mod 1	Mod 2	Mod 3	Mod 4	Mod 5
149,79 Hz	151,18 Hz	783,17 Hz	1972,6 Hz	1978,2 Hz

Al7075 arayüz bağlantı parçası 27 kg, S235 adaptör 1224 kg ve toplamda 1261 kg kütleyle sahiptir. Taban bağlantısı için 153, arayüz-adaptör bağlantısı için ise 80 civata bağlantısı kullanılmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen titreşim test adaptörü Şekil 17'de gösterilmiştir.

Adaptörün 149,79 ve 151,18 Hz frekanslarındaki mod şekilleri Şekil 18'de gösterildiği gibidir.



Şekil 17. Elde Edilen Titreşim Test Adaptörü



Şekil 18. Adaptörün 1. ve 2. Mod Şekilleri

Bu çalışma, lisans bitirme projesi olarak gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda Gazi Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümüne sunulmak amacıyla proje raporu hazırlanmıştır. Ayrıca proje, TÜBİTAK 2209-B Sanayiye Yönelik Lisans Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında desteklenmektedir.

6. PROJE EKİBİNİN KAZANIMLARI VE TUSAŞ'A OLASI KATKISI

Akademik ve sanayi danışmanlarıyla birlikte gerçekleştirilen projenin planlama aşaması, proje ekibinin, gereksinimin saptanıp bu bağlamda hedeflerin belirlenmesi, proje boyunca izlenilecek adımların kararlaştırılması gibi süreçlerde genel olarak bir projenin nasıl yürütüleceği hakkında tecrübe edinmelerini sağlamıştır. Ardından gerçekleştirilen araştırma sürecinde, proje ekibi, uydular, fırlatıcı sistemleri, titreşim testleri ve standartları hakkında bilgiler edinmiştir. Bu süreçte USET Merkezinde gerçekleştirilen titreşim testlerinden bazılarını izleme fırsatı bulmuşlardır. Tasarım sürecinde, daha önce bu konuda yapılan çalışmalar incelenmiş ve farklı yaklaşımlar değerlendirilmiştir. Aynı zamanda proje sürecinde yapılan katı modelleme, sonlu elemanlar modeli oluşturma, topoloji optimizasyonu, mod, statik ve dinamik analizler ile değerlendirmeleri gibi çalışmalar, proje ekibinin bu konularda beceri ve deneyim kazanmalarını sağlamıştır.

Tasarımı yapılan titreşim test adaptörünün teknik çizimleri, optimizasyon ve analiz sonuçları TUSAŞ USET Merkezi Çevresel Testler Birimi ile paylaşılmıştır. Olası bir uydular projesinde ihtiyaç duyulması halinde üretimi gerçekleştirilip 4 tona kadar kütleye sahip uyduların titreşim testlerinde kullanılabilecektir. Daha önce yurt dışında üretimi yapılan ve ithal edilen böyle bir adaptörün, yerli olanaklarla üretilmesi, uzay çalışmalarındaki yerlilik oranının artırılmasına katkı sağlayacaktır.

7. ÖNERİLER, ALINAN DERSLER VE GELECEK ÇALIŞMALAR

Bu çalışmanın en önemli yararı, bilimsel bir çalışma yaparken planlama, araştırma ve uygulama basamaklarının doğru kaynaklar kullanılarak zamanında yapılması konusunda deneyim kazandırmış olmasıdır.

Gelecek çalışmalar düşünüldüğünde, 1575 mm, 1663 mm ve 1666 mm çaplarındaki standart arayüz ölçülerine sahip adaptörler üzerinde çalışmalar yapıp TUSAŞ envanterine kazandırılabilir. Bu çalışmada, ülkemizdeki gelişmiş üretim teknolojileri ve düşük üretim maliyeti göz önünde bulundurularak malzeme seçimi çelikten yana yapılmıştır. Ancak, üretim süreçleri daha uzun ve maliyeti daha yüksek olsa da magnezyum veya alüminyum malzeme kullanılarak çok daha az kütleye sahip bir test adaptörü elde etmek olasıdır. Arayüz çapı daha büyük olan adaptörler daha fazla kütleye sahip olacaklarından, gelecekte yapılabilecek çalışmalarda bu durum değerlendirilmelidir.

TEŞEKKÜR

Sanayi Odaklı Lisans Bitirme Projeleri kapsamında çalışmalarımızı destekleyen TUSAŞ'a ve 2209-B Sanayiye Yönelik Lisans Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında projemizi destekledikleri için TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.

KAYNAKÇA

1. **Larson, W. J. ve Wertz, J. R.** 1992. "Space Mission Analysis and Design," Choice Rev. Online, ISBN: 978-0-7923-0971-0.
2. **Griffin, M. D. ve French, J. R.** 2004. Space Vehicle Design, Second Edition, ISBN: 1-56347-539-1, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Blackburg, Virginia.
3. **Gündoğdu A.** 2008. "Bir Uydunun Fırlatma Esnasında Maruz Kaldığı Yükler Altındaki Yapısal Davranışının İncelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
4. **Şahin M. and Atak A.** 2018. "Uzay Araçları Ve Uydularda Titreşim Testleri ve Test Süreçleri," VII. Uluslararası Havacılık Ve Uzay Konferansı, 12-14 Eylül 2018, Samsun.
5. **Uygur A. B., Haktanır O. O., Yılmaz F., Işık H. G. ve Aşansü Z.** 2018. "Turkey's New Assembly, Integration and Test (AIT) Center and Its Comparison with AIT Centers in Europe," RAST 2015 - Proc. 7th Int. Conf. Recent Adv. Sp. Technol., p. 71-74.
6. ECSS, 2012. "Space Engineering - Testing," EcSS-E-St-10-03C, ESA Requirements and Standards Division, The Netherlands.
7. **Buckley K. ve Chiang L.** 2010. "Design and Analysis of Vibration Test Fixtures For Payloads," Worcester Polytechnic Institute, Worcester.
8. Arianespace, 2016. "A Ariane 5 User's Manual," Proc. Int. Astronaut. Congr., vol. IAC-16-D2., no. 5.