

UZAY ARAÇLARI VE UYDULARDA TİTREŞİM TESTLERİ VE TEST SÜREÇLERİ

Mehmet Sahin¹ ve Ahmet Atak²
Türk Havacılık Uzak Sanayi, Ankara

ÖZET

Haberleşme uyduları üretimi sırasında, başlıca uydunun fırlatma sırasında olmak üzere, hizmet süresince maruz kalacağı sinüs, rastgele ve şok titreşimlerine karşı uygunluğunu test etmek için çevresel mekanik titreşim testlerine tabi tutulur. Bu testlerin planlanması, test için ivme ve gerinim ölçerlerin yerleştirilmesi, yatay ve dikey testlerin yapılması, test sonuçlarının değerlendirilmesi uydu üretim süresi dikkate alındığında önemli bir süre ve işçilik tutar. Bu çalışmada uydu mekanik çevresel testlerinden olan titreşim ve şok testleri ve bu test süreçleri açıklanmıştır. Titreşim test çeşitleri, testlerin yapıları ve seviyeleri, ivme ve gerinim ölçerlerin yerleştirme kriterleri, kuvvet ölçüm metotları gibi testle ilgili konular irdelenmiştir. Bahsedilen konular gerçek bir haberleşme uydusunun (TURKSAT 6A) ısı yapısı yeterlilik modeli (IYYM) üzerinde yapılan titreşim testleri üzerinden uygulamaları incelenmiştir. Ayrıca uydu titreşim testleri sırasında uydu ve test sistemi ile uydu statik yapısal testleri için statik analiz hesaplaması sunulmuştur. Çalışma bu tür testlerin yapılmasında kullanılan yöntem ve hesaplamalar konusunda faydalı olacaktır.

GİRİŞ

Uzay araçları fırlatma ve görev sırasında maruz kalacağı mekanik ve ısı yüklerine karşı dayanıklılığını test etmek için uydu üretim ve montaj sırasında mekanik testlere tabi tutularak bu yüklerin yapısal ve elektriksel olarak herhangi bir performans ve işlevsellik kaybına sebep olup olmadığı tespit edilerek uzay aracının göreve uygunluğu teyit edilir. Mekanik testler; titreşim ve şok testleri, akustik testler ve ısı testleri içerir [ECSS 2013, ECSS 2013, Wilson 1989]. Titreşim testleri uydunun maruz kalacağı titreşim yükleri altındaki dayanıklılığını test, şok testleri benzer şekilde şoklara karşı ve akustik testlerde fırlatma sırasında uydunun maruz kalacağı yüksek basınçlı ses dalgaları ve etkilerine karşı dayanıklılık testleridir [Wijker 2015, Asmolovskiy 2014, Wilson 1989]. Isı testler uzay aracının uzay ortamındaki ısı dengesinin yeterli olup olmadığını belirlemek için yapılır. Buradaki mekanik dayanıklılıktaki kasıt uydu ve uydu ekipmanlarının herhangi bir kalıcı deformasyon göstermeden yükleme sırasında ve sonrasında görevini devam ettirmesidir. Benzer şekilde elektriksel dayanıklılıkta yükleme sırasında ve sonrasında ekipmanların görevini aksatacak herhangi bir elektriksel ve fonksiyonel performans kaybına uğramaması şeklinde ifade edilebilir.

Uzay araçları ve özellikle haberleşme uyduları en büyük sanki-statik ve dinamik yüklerle fırlatma sırasında fırlatıcı üzerinde ve ayrılma sırasında maruz kalırlar. Bu yüklerin süresi, şiddeti, frekans

¹ Dr., Uzay Sistemleri Yapısal Mühendislik Böl., E-posta: mehmet.sahin2@tai.com.tr

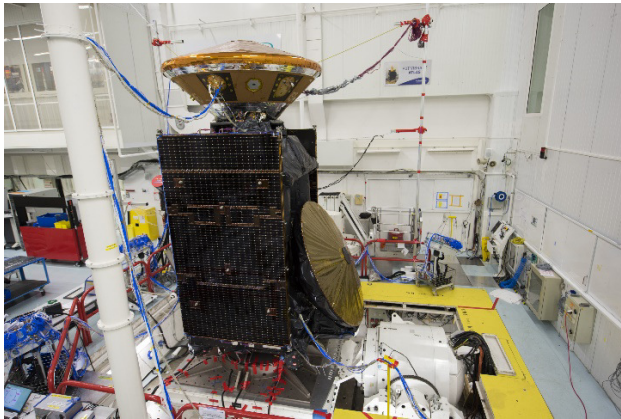
² Müdür, Uzay Sistemleri, Yapısal Mühendislik Böl., E-posta: ahmet.atak@tai.com.tr

aralığı gibi değerler kuvvet zarfları şeklinde fırlatıcı kullanıcı klavuzlarında belirtilmiştir[Arianespace 2011, Arianespace 2018, ILS 2009, SpaceX 2015]. Titreşim testleri için seçilen fırlatıcı veya potansiyel fırlatıcıların azami yük değerleri baz alınır. Bu değerlerin yanısıra yine uzay aracının yanal ve dik yönde sağlaması gereken frekans değerleride vardır. Bu isterlerin karşılanıp karşılanmadığı yine titreşim testlerinde belirlenir ve uygunluğu teyid edilir. Haberleşme uydularında titreşim ve akustik testlerinde uydu üzerinde belli kritik noktalardaki ivme dolayısıyla kuvvet ile gerilim değerleri ölçülürken dayanım değerleri ile karşılaştırılır. Yine ivme ölçerlerdeki gerilim değerleri ve yönlerine göre ana yatay ve düşey frekansları tespit edilir.

Titreşim testleri süreç ve uydunun tümünü ilgilendirmesi açısından önemli mekanik testlerdir. Testler x, y ve z üç dik yönlerde ayrı ayrı yapılır. Sürecin uzun olması, test öncesi hazırlıkların yapılması yatayda x ve y yönünde iki ve düşeyde bir test için uzay aracının sarsma yönünde sarsıcı üzerine yerleştirilmesi gibi işleri kapsar. Ayrıca bir sonraki testin başlaması önceki test sonuçlarının değerlendirilmesi ve testte istenilmeyen ve beklenmedik sorunların çıkması durumunda süreç daha da uzamaktadır.

Titreşim testleri için genellikle üç ana test çeşidi uygulanır. Bunlar, sinüs tarama, rastgele ve şok testleridir. Sinüs tarama testleri uydunun analiz, alt sistemlerinin analiz ve testlerinde belirlenen kritik frekanslarının tespit ve teyidi için yapılır. Bu testler genellikle hafif orta ve tam seviye diye üç aşamalı olarak yükleme seviyeleri artırılarak yapılır. Kritik veya ilk geliştirilen hassas ekipman taşıyan sistemlerde seviye sayısı artırılarak daha kontrollü ve emniyetli bir şekilde sinüs tarama testleri yapılır. Sinüs tarama testinde frekans aralığı uzay aracının ve alt sistemlerindeki kritik frekansların tümünü içini alacak şekilde belirlenir. Normalde 5-200 Hz frekans aralığında gerçekleştirilir. Daha yüksek frekansların etkisi az olduğundan göz ardı edilirler. Rastgele titreşim uzay aracının dayanıklılığını teyid etmek için yapılan testlerdir. Şok testleri daha çok uzay aracının fırlatıcıdan ayrılması sırasında ve güneş paneli, anten, sensor, boom gibi fırlatmadan sonra açılacak sistemlerin açılmasını sağlayan piyro (patlamalı kilit açma mekanizması) patlamaları sırasında oluşan çok yüksek lokal ivme değerlerinin ölçülmesi için yapılır ve şok seviyesinin kritik değerlerin altında olup olmadığı teyid edilir. Şekil 1 de yatay ve dikey yönlerdeki titreşim testlerine tabi tutulan uydular görülmektedir.

Bu çalışmada sadece sinüs titreşim testleri irdelenecektir ve test süreci, uygulanacak titreşim test çeşitleri, test için ivmeölçer yer ve yönlerin seçim kriterleri, kuvvet ölçümleri için gerilim noktaları ve bu noktalardaki yük akısı hesaplama metodu incelenecektir. Çalışma bu tür testlerin yapılmasında kullanılan yöntem ve hesaplamalar konusunda faydalı olacaktır. Bu çalışmada uzay aracı ve uydu kelimeleri eşit anlamda uzay da çalışan uzay aracı sistemi olarak tanımlanmıştır.

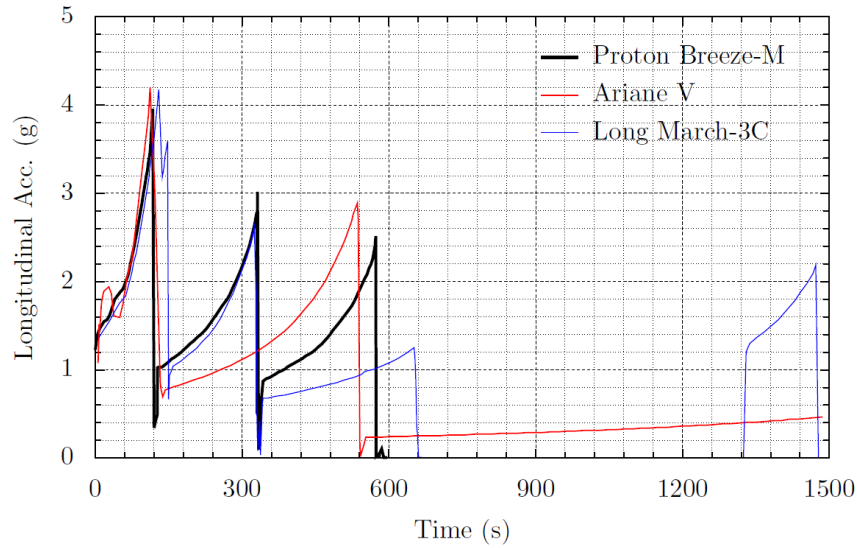


Şekil 1: Yatay ve düşey yönlerde uzay araçlarının titreşim testleri

TİTREŞİM TESTLERİ

Uzay araçları genellikle en büyük statik ve dinamik yüklemelere fırlatma sırasında maruz kalırlar. İlk fırlatma anlarında ve kademe ayrılma ve ateşlemeleri sırasında ani yüklemeler sanki-statik ivmelere sebep olurlar. Bu tür etkileri gösteren zaman-dikey ivme grafiği Şekil 2 de gösterilmiştir

[ILS, 2009, Arianespace 2011]. Şekilde görüldüğü gibi en yüksek ivmeler kademelerin yakıtının bitip ayrılmasının hemen öncesinde gerçekleşmektedir. Fırlatıcı ana motorları dikey sinus ve katı yakıtlı roket motorları eşit olmayan dengesiz yanmalardan dolayı yanal titreşimlere sebep olurlar. Yakıt tanklarındaki ani açılmalarda kısa süreli (1 sn den az) titreşimleri tetiklerler [ILS 2009]. Ayrıca atmosferde rüzgar yükleride fırlatıcı üzerindeki diğer önemli titreşim sebeplerindendir. Bu titreşim değerleri fırlatıcılar tarafından ölçülerek kaydedilir ve fırlatıcı faydalı yükleri olan uzay araçlarının tasarımında çevresel yük değerlerinin hesaplanmasında kullanılır [ECSS 2013]. Fırlatma süresince uzay aracının maruz kalacağı statik, dinamik, ve akustik yüklerle fırlatıcı mekanik isterleri olarak fırlatıcı kılavuzlarında belirtilir [Arianespace 2011, Arianespace 2018, ILS 2009, SpaceX 2015, ULA 2015, ULA 2013]. Fırlatıcı seçimi belli ise uzay aracı bu fırlatıcı isterlerine göre tasarımı yapılır ve test edilir. Tablo 1 de Ariane-5,-6 fırlatıcıları için statik ve dinamik yük kaynakları ve bunların siddetleri gösterilmiştir [Arianespace 2011, Arianespace 2018]. Tabloda görüldüğü gibi dik yöndeki ivmeler daha fazladır ve farklı zamanlarda değişkenlikler göstermektedirler.



Şekil 2: Bazı fırlatıcıların fırlatma sırasında maruz kaldıkları dikey yöndeki ivmeler

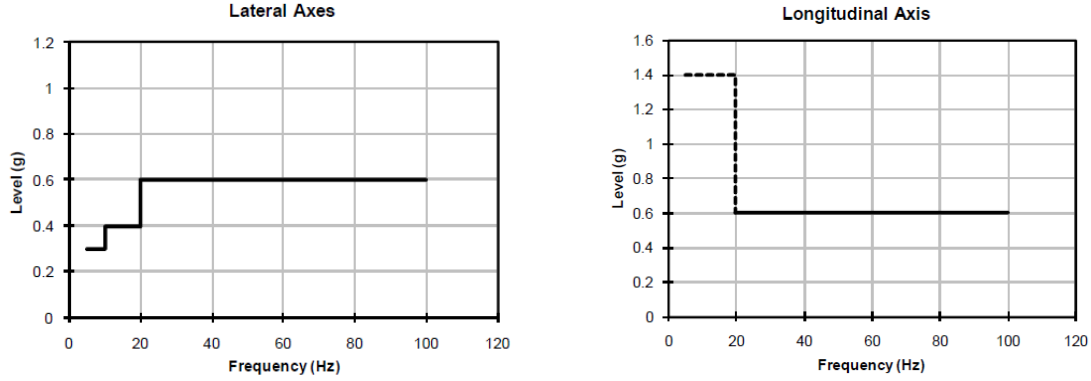
Tablo 1: Ariane-5 ve Ariane-6 fırlatıcı roketlerinin maruz kaldığı statik ve dinamik yük zarfları

Kritik uçuş safhaları	Ariane-6			Ariane-5		
	İvme			İvme		
	Yatay		Dikey	Yatay	Dikey	
	Statik	Dinamik	Statik+Dinamik	Statik	Dinamik	Statik+Dinamik
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 iticilerin ayrılması	-0.9	±3.1	±0.9	-0.7	±3.2	±0.9

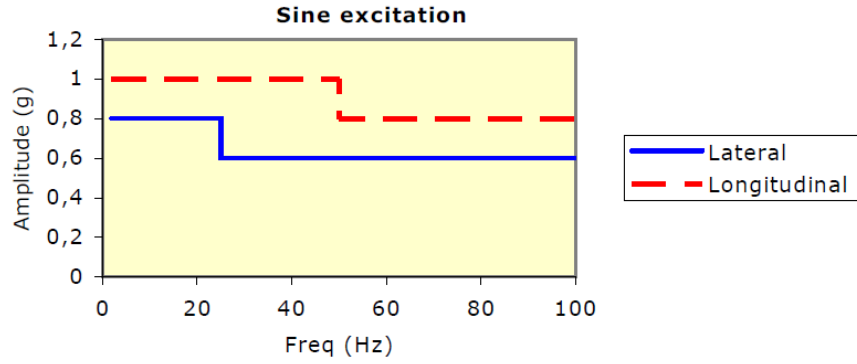
Proton ve Ariane fırlatıcıları için yanal ve dik yönlerdeki sadece dinamik yüklerin frekans spektrumundaki şiddetlerini gösteren grafikler sırası ile Şekil 3 ve Şekil 4 de gösterilmiştir [ILS 2009, Arianespace 2011]. Şekillerde görüldüğü gibi yanal dinamik yüklerde 20 Hz den düşük bölge hariç yük seviyeleri hemen hemen tüm frekanslarda eşittir. Dikey yüklerde belli frekanslardan sonra düşüş olduğu görülmektedir.

Titreşim testleri için test seviyeleri uydunun maruz kalacağı dinamik yüklere göre belirlenir. Bunun için en yüksek fırlatıcı kaynaklı yükler referans olarak belirlenir. Sinus testleri için bu seviyeler uygulanır fakat kritik ekipmanlarda ve noktalardaki titreşim frekansları, rezonansa girip aşırı test yüklemesini önlemek için çentikleme işlemi uygulanır. Çentikleme seviyelerinin belirlenmesi hassas ekipmanların ve kritik noktaların aşırı rezonans ve yüklemeye maruz kalmaması için büyük önem

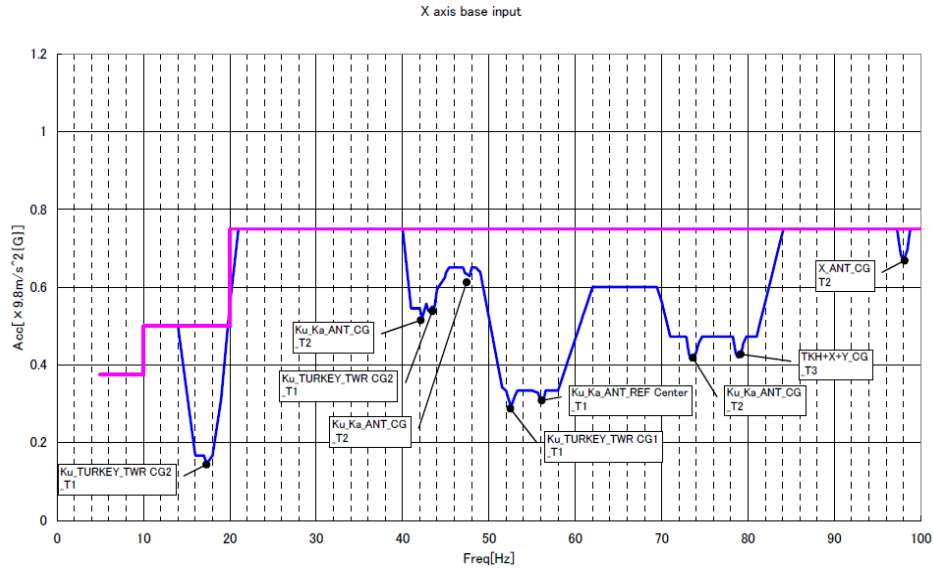
arzeder. Bu nedenle test için ayrıca detaylı olarak çentikleme planı yapılır. Bu planda çentikleme frekansları, frekans aralığı ve yük seviyeleri ayrıntılı olarak belirlenir ve gösterilir. Proton fırlatıcısı ile fırlatılacak haberleşme uydusunun x-yönünde sinüs titreşim testi için yapılmış çentikleme planı Şekil 5 de gösterilmiştir.



Şekil 3: Uydu-fırlatıcı ara yüzünde dikey ve yatay yönlerdeki eşdeğer sinüs titreşim yükleri (Proton)



Şekil 4: Uydu-fırlatıcı arayüzü yatay ve dikey yönlerdeki eşdeğer sinüs titreşim yükleri (Ariane-5)



Şekil 5: Haberleşme uydusu yatay x yönünde sinüs titreşim testi için çentikleme profili (Proton)

Uzay araçları sinüs titreşim testlerinin amaçları şunlardır;

- düşük frekanslı fırlatma ortamını uzay aracı üzerinde test ederek aracın yapısal ve tüm mekanik, elektrik işlevsel uygunluğunu tespit etmek
- sonlu elemanlar modeli öz-frekans ve modal analizi sonuçları ile testlerden gözlemlenen frekans değerleri karşılaştırılarak tasarım doğrulamasını yapmak
- fırlatıcı frekans istekleri ile diğer mekanik isteklerinin karşılanıp karşılanmadığı tespit etmektir.
- ölçüm verilerinin toplanması ve arşivlenmesi

Uzay aracının her üç yönde sinüs titreşim testleri yapılır. Testler uydu eksen takımı referans alınarak yatay x ve y yönlerinde, dikey z-yönünde yapılır. Her bir yönde ki sinüs testlerinde genellikle belli yükleme profili esas alınarak kademeli olarak yükleme artırılarak kontrollü bir test yapılır. Örneğin 1g genlikli tam yükleme için ilk önce 0.5g genlik daha sonra 1g genlikli yükleme yapılır. Bazı durumlarda, özellikle yeni sistemlerde, kademe sayısı artırılarak daha emniyetli testler amaçlanır. **Şekil 6** da üç eksende yapılan sinüs testleri için akış şeması gösterilmiştir. Burada ön rastgele modal (Pre-RM) testi çok düşük genlikli (uydular için 0.05g) ön tarama yüklemesidir. Bu testte amaç tüm ölçüm noktalarındaki değerleri kontrol ederek emniyetli bir testin yapılmasını sağlamaktır. Rastgele titreşim testleri ikincisi ise maruz kalacağı rastgele titreşimlere dayanıklılığını test etmek için yapılır.

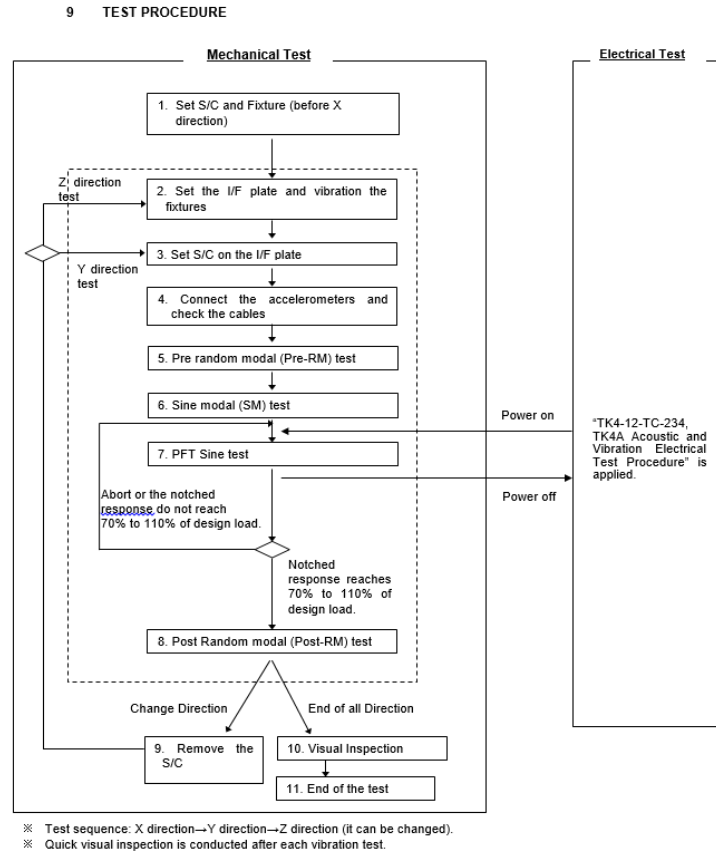


Fig. 9-1 Sine Vibration Test

Şekil 6: 3 Eksende yapılacak sinüs testleri için akış şeması

TİTREŞİM TESTLERİ HAZIRLIKLARI

Uzay araçları tasarım çalışmaları genellikle ilk tasarım ve kritik tasarım (ve kritik tasarım gözden geçirme (Critical design Review, CDR) olarak iki ana önemli aşamaları içerir. İlk gözden geçirme aşamasında uzay aracının temel tasarım çalışmaları tamamlanmış fakat kısmi tasarım ve analiz

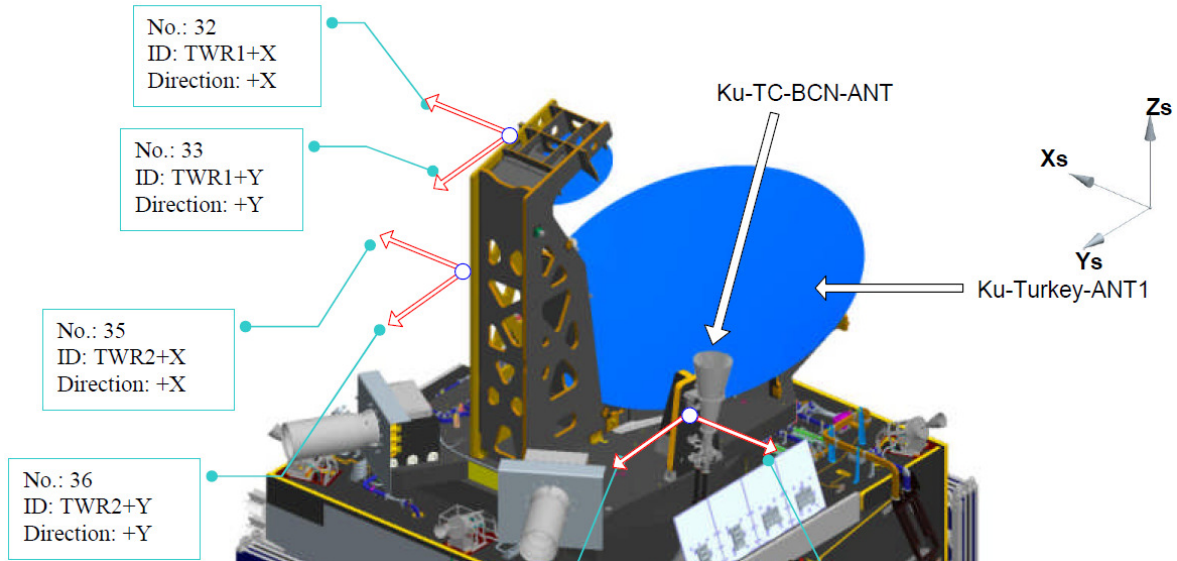
sonuçlarının kesinleşmemiş halini içeren çalışmalar raporlanır. Kritik tasarım gözden geçirme aşamasında analizler tamamlanmasına yakın tasarımın son hali kesinleşmiş olur. Bu aşamalarda tasarım detayları sunum ve rapor şeklinde taraflarca paylaşılır. Gerektirdiğinde bu gözden geçirme raporları arasında ilerleme raporları da yayınlanabilir.

Kritik analiz sonuçlarına göre titreşim ve şok yükleri altındaki yapının yapısal olarak kritik alt sistemler ve bu sistemlerdeki kritik noktalar ve bölgeleri, uzay aracının ana gövdesi üzerindeki kritik titreşim noktaları ve kritik titreşim frekansları ile kritik gerilim noktaları belirlenir. Mekanik titreşim testleri için bu analiz sonuçları kullanılarak yapılacak testlerin ayrıntılı test planları hazırlanır.

Başlıca test raporları şunlardır.

- Titreşim testleri elektrik test planı: Bu planda titreşim testi sırasında çalıştırılacak veya kapalı olacak uydu elektriksel sistemleri belirlenir ve bu sistemlerdeki tüm kritik test değerleri belirlenip listelenir. Çalışacak sistemlerde tüm sistemler test süresince takip edilerek performans kaybı olup olmadığı test süresince ölçülür.
- İvme ölçer ve gerinim ölçer yerleştirme planları: Tüm ivme ölçerlerin ve gerinim ölçerlerin yerleştirme planları, detayların gösterildiği açıklamaları ve tabloları içerir.
- Çentikleme planları: Çentik yapılacak frekans aralıklarını ve seviyelerini gösteren açıklamalı raporlardır
- Test icra planı: Testlerin yapılış sırasını ve zamanlama planlarını içerir
- Test sonuç raporları: Test sonuçlarının değerlendirildiği mühendislik raporlarıdır.

Planlama için test hazırlık planı hazırlanarak bu planda ivme ölçerlerin yerleştirileceği yerler uydu en üst bölgesinden başlanılarak üzerinde uydu eksen takımı ve lokal eksen takımlarını gösteren 3 boyutlu teknik resimler üzerinde tam olarak yeri ve yönleri gösterilir. Şekil 7 de örnek olarak gerçek uydu titreşim testlerinde uygulanan ivme ölçerlerin tutturulduğu yerler ve yönleri gösterilmektedir. İvme ölçerlerin yerleştirme planında detaylı olarak listelendiği örnek tablo Şekil 8 de gösterilmiştir.



Şekil 7: İvme ölçerlerin yerleştirme yerleri ve yönleri

																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														</
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	----

Şekil 8: Örnek bir ivmeölçer yerleştirme planı tablosu

İvmeölçerlerin Yerleştirilme Kriterleri

Büyük ve hassas donanım bulunduran yapıların titreşim testleri yüzleri hatta binleri bulan noktalarda ve birden fazla yönlerde ivme ve gerilimlerin ölçülmesini gerektirir. Kullanılacak ivmeölçerlerin aynı zamanda hassas olması gerekmektedir. Genelde ivme ölçerler ve özellikle hassas ivme ölçerler pahalı ve bunlar için yüksek kapasiteli veri toplama sistemleri gerektirdiğinden optimal sayıda ivme ölçerlerin belirlenip kullanılması hedeflenir. Optimal yerleştirme kriteri minimal adet ve yön ile en az sayıda kritik yerlerin sayısı şeklinde özetlenebilir. Bu hedef doğrultusunda bir haberleşme uydusu baz alınarak kritik ölçüm noktaları ve yönlerinin seçiminde uygulanacak temel kriterler aşağıda belirtilmiştir. İvmeölçerlerin en ekonomik yerleştirilmesinde uygulanan genel kriterler aşağıda sıralanmıştır.

- Sonlu elemanlar modeli ile yapılan yapısal analiz sonuçları en fazla gerilimlere maruz kalan kritik nokta ve bölgeler ile kritik ivme yönleri hakkında detaylı ve kapsamlı sonuçlar verir. Bu analizler sonucu kritik bölge ve noktalar belirlenerek uygun sayıda ve yönde ivme ölçer belirlenir.
- Ekipmanların ana gövde veya paneller ile olan bağlantı ara yüzlerine veya bu bölgelere en yakın yerler yük ve moment transferlerinin gerçekleştiği yerlerdir ve buralarda yüksek gerilimler oluşur. Örnek olarak antenlerin ana gövde ve panellere bağlantı ara yüz noktaları.
 - Tüm antenlerin gövdeye bağlantı arayüzleri
 - Dünyaya bakan panel üzerindeki tüm antenlerin bu panele bağlantı arayüz noktaları
 - Doğu ve batı antenlerin panel bağlantı arayüz noktaları
- Paneller geniş açıklıklı yapısal elemanlar olup orta kısımları yüzeylerine dik yönde titreşip daha fazla ivmeye maruz kalırlar. Panel orta bölgeleri ve panele dik yön ölçüm yapılacak noktalar ve yönlerdir. Bu tür paneller üzerine yerleştirilmiş ekipmanların panellere bağlantı noktaları da kritik noktalardır.
- Birbirine yakın kritik noktalar ve yönler için tek bir ölçüm noktası ve yönleri kullanmak ivme ölçerlerin uygun kullanımını sağlamış olur
- Gerilim yoğunluğunun çok değişkenlik gösterdiği noktalar belirgin bir eğilimi tam yansıtmadığı için, bu bölgelerde ivmeölçer kullanılması uygun olmayacaktır.
- Tüm kritik ve hassas ekipmanların bağlantı noktaları/arayüzlerindeki yükler kritik olduğu için bu bölgelerde yatay ve dik bağlantı yönlerinde ivme ölçümleri yapılır.

Tipik bir haberleşme uydusu için kritik yerler;

- Tepki tekerleri
- Sensörler; Güneş algılayıcıları, yıldız izlerler, dünya algılayıcıları
 - Manevra itki (roket) motorları (sadece itki yönünde)

- Yerötesi roket motoru
- Anten konileri
- İvmeölçerler ölçüm yapılacak bölge/nokta için bu bölgeyi en iyi temsil edecek en uygun yer ve bu yerdeki en kritik yönün veya yönlerin belirlenmesi en uygun yerleştirme açısından önemlidir.

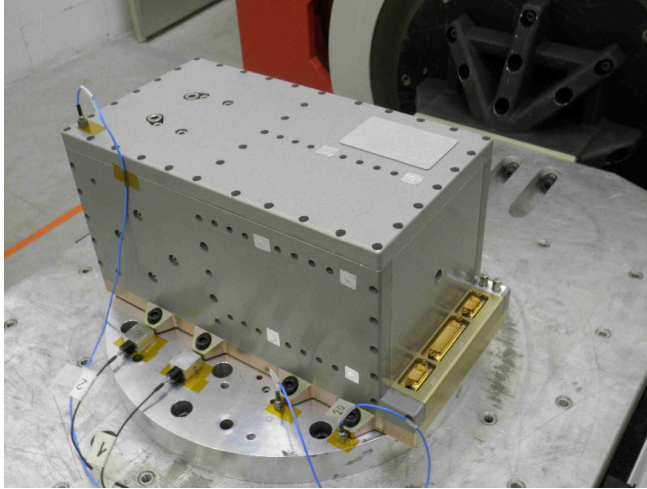
Şok testleri için ivmeölçerler: Şoklar çok kısa süreli fakat yüksek ivmeli yüklemeler olup uygulanan bölgelerde yüksek frekanslı titreşimlere sebep olurlar. Uydularda şoklar fırlatma sonrası ekipman açılımı için kullanılan patlayıcı açılım mekanizmalarının patlatılması sırasında oluşan şoklardır. Ayrıca uydunun fırlatıcıdan ayrılma sırasında bağlantı halkasının patlatılarak serbest kalması sırasında da uydu gövdesinde şoklar oluşur. Titreşim testlerinden ayrı olarak ayrılma testi sırasında oluşan şokların kritik bölge ve noktadaki ivme tepkilerini (şok) ölçmek için ivme ölçerler kullanılır.

İvme Ölçerlerin Yerleştirilmesi

İvme ölçer yapıştırılacak yerler yerleştirme planına göre belirlendikten sonra yüzey IPA (Isopropyl Alcohol) ile temizlenip kuruduktan sonra yapıştırıcı kullanarak yapıştırılır. Belirtilen kuruma süresi beklenir. Yapıştırıcısı kuruduktan sonra bağlantı kablosu ile veri işleme sistemine bağlantısı gerçekleşir. Veri bağlantısının uygunluğu küçük şok veya titreşim verilerek test edilip teyid edilir (Şekil 9 a)).

Gerinim Ölçerlerin Yerleştirilmesi

Titreşim testleri sırasında uydu bağlantı halkası ile test adaptörüne, test adaptörü de sarsıcıya veya sarsma tablasına bağlanır. Uydu üzerine gelen yükü ölçmek aynı zamanda titreşim test sisteminin kapasitesinin kontrolü için önem arz etmektedir. Uydu yapısal olarak, titreşim test sistemine ankastre şekilde monta edilmiş serbest uçlu bir kiriş/bar gibi davranır. Uydunun bağlantı tarafına etki eden kuvvetler uydu bağlantı halkası üzerine yerleştirilen gerinim ölçerler üzerinden ölçülerek hesaplanır. Örnek bir gerinim ölçer Şekil 9 b) de gösterilmiştir.



a) İvme ölçerler



b) Gerinim ölçer

Şekil 9: İvme ve gerinim ölçerler

Test icrası

Test icra planında testler, test seviyeleri ve varsa çentikleme planı detaylı olarak açıklanarak testen önce yayınlanır ve testler bu icra planına göre icra edilir. Tablo 2 de haberleşme uydusu belirlenen sinüs tarama testi seviyeleri ve yükleme şiddetleri gösterilmiştir. İlk seviye düşük seviye testleri tarama amaçlıdır.

Tablo 2: Sinüs testleri profili

Test seviyesi	fed (Hz)	fey (Hz)	İvme (g)	Hız(oktav/dak)	Alt Test limit (dB)	Üst test limit (dB)
---------------	----------	----------	----------	----------------	---------------------	---------------------

Düşük seviye	5	200	0.05g	2 oktav/dakika	+15	-25
Orta seviye	5	100	0.5g	2 oktav/dakika	+15	-25
Tam seviye	5	100	1.0g	2 oktav/dakika	+15	-25

Yük akısı hesaplaması

Uzay araçları (uydular) fırlatıcı roketine ankastre olarak bağlanmaktadır. Aynı şekilde üretim ve test süreci boyunca benzer şekilde platformlara ankastre olarak sabitlenirler. Bu bağlantılar uzay aracı merkezi silindirin alt kısmında bulunan bağlantı halkası ile sağlanır. Bu halka tüm uydu yüklerini taşımaktadır. Bu halka üzerine gelen yükler halka üzerine yerleştirilen gerinim ölçerler vasıtasıyla ölçülür. Statik ve dinamik analizler için bu halka üzerine gelen yüklerin hesaplanması yapılabilir. Aşağıdaki bölümlerde bu bağlantı bölgesine gelen yükler için hesaplama metodu geliştirilmiştir.

Ankastre bir yapıda, yapı üzerine etki eden kuvvetlerin ankastre bağlantı noktasında meydana getirdiği kuvvetler toplam kuvvetlerin bileşkesidir.

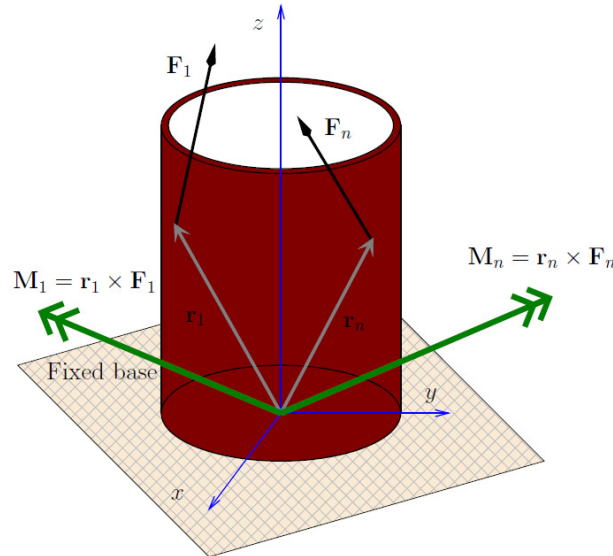
$$\mathbf{F} = \begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{Bmatrix} = \sum_{n=1}^N \begin{Bmatrix} f_{xn} \\ f_{yn} \\ f_{zn} \end{Bmatrix} \quad (1.1)$$

Uydu üzerine etki eden kuvvet $\mathbf{f}_n = f_{xn}\mathbf{i} + f_{yn}\mathbf{j} + f_{zn}\mathbf{k}$ vektörü ile bu kuvvetin etki ettiği nokta konum vektörü $\mathbf{r}_n = r_{xn}\mathbf{i} + r_{yn}\mathbf{j} + r_{zn}\mathbf{k}$ ile tanımlanır (Şekil 10). Bu kuvvetlerin bağlantı noktasında yapmış olduğu moment vektörü, konum vektörü ile bu noktaya etki eden kuvvet vektörünün vektörel çarpımı ile bulunur.

$$\mathbf{M}_n = \mathbf{r}_n \times \mathbf{f}_n = \mathbf{R}_n \mathbf{f}_n \quad (1.2)$$

Burada $\mathbf{R}_n$ matrisi konum vektörünün anti simetrik matris formudur. Toplam moment tüm momentlerin toplamıdır.

$$\mathbf{M} = \begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{Bmatrix} = \sum_{n=1}^N \mathbf{R}_n \mathbf{f}_n = \sum_{n=1}^N \begin{bmatrix} 0 & -r_{zn} & r_{yn} \\ r_{zn} & 0 & -r_{xn} \\ -r_{yn} & r_{xn} & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} f_{xn} \\ f_{yn} \\ f_{zn} \end{Bmatrix} = \sum_{n=1}^N \begin{Bmatrix} f_{zn}r_{yn} - f_{yn}r_{zn} \\ f_{xn}r_{zn} - f_{zn}r_{xn} \\ f_{yn}r_{xn} - f_{xn}r_{yn} \end{Bmatrix} \quad (1.3)$$



Şekil 10: Uydu üzerine etki eden statik kuvvetler

Yük akısını birim uzunluktaki kuvvet olarak tanımlarsak, D çapında olan bir uydu bağlantı halkası üzerine etki eden dik yöndeki kuvvet akısı şu formülle hesaplanır

$$\phi_z = \sigma_z t \cong \frac{1}{\pi D} \left(F_z + \frac{4}{D} (M_x \sin \theta - M_y \cos \theta) \right) \quad (1.4)$$

Yük akısının maksimum ve minimum olduğu açılar

$$\theta_{\max 1} = \arctan \left(-\frac{M_x}{M_y} \right) \quad \theta_{\max 2} = 180 + \arctan \left(-\frac{M_x}{M_y} \right) \quad (1.5)$$

formülleri ile hesaplanır. Moment bileşeni hesaplanıp tek bir moment değeri hesaplanarak, akı formülü yeniden hesaplanabilir. Moment bileşeni ve yük akısı sırası ile

$$M = \sqrt{M_x^2 + M_y^2} \quad (1.6)$$

$$\phi_z = \sigma_z t \cong \frac{1}{\pi D} \left(F_z + \frac{4}{D} M \sin(\theta') \right) \quad (1.7)$$

olur. Burada, yeni açı değeri $\theta' = \theta - \arctan(M_y / M_x)$ olarak tanımlanmıştır. Burulma kuvveti akısı şu şekilde elde edilir.

$$\phi_{\text{burulma}} = \tau t = \frac{M_z r}{J} t = \frac{M_z D}{2(\pi D^3 / 4)} = \frac{2M_z}{\pi D^2} \quad (1.8)$$

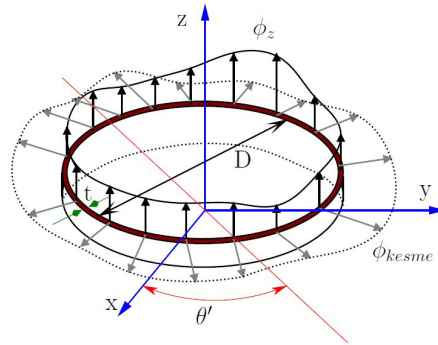
Benzer şekilde x ve y yönlerindeki kesme kuvveti akıları şu şekilde olduğu gösterilebilir.

$$\phi_{zx} = \tau_{zy} t = \frac{F_x Q}{I_{yy}} = \frac{2F_x (4D^2)}{(\pi D^3 / 8) 2} = \frac{2F_x}{\pi D} \quad (1.9)$$

$$\phi_{zy} = \tau_{zy} t = \frac{F_y Q}{I_{yy}} = \frac{2F_y}{\pi D} \quad (1.10)$$

Yada x ve y yönlerindeki kesme kuvvetlerinin bileşkesi alınarak toplam kesme kuvveti akısı şu şekilde hesaplanır

$$\phi_{\text{kesme}} = \frac{2\sqrt{F_x^2 + F_y^2}}{\pi D} \quad (1.11)$$



Şekil 11: Merkezi silindir geometrisi ve yük akısı tanımı

UYGULAMALAR VE SONUÇ

Yukarıda bahsedilen tüm test süreçleri, faaliyetleri ve hesap yöntemleri gerçek bir haberleşme uydusu olan TURKSAT 6A yapısal ve ısı modelinde uygulanmaktadır ve diğer mühendislik ve uçuş modellerinde uygulanmaya devam edilecektir. Bu çalışmada uzay araçlarında uygulanan

ve özellikle uygulamalı olarak haberleşme uydularında yapılan sinüs titreşim testleri hakkında bilgi verilmiştir. Testlerin planlamasından test sonuçlarının değerlendirmesine kadar geçen süreçler, test çeşitleri, test aşamaları, testlerde kullanılan ekipman, ölçüm aletleri ile testlerdeki kuvvet hesap yöntemleri hakkında detaylı açıklamalar yapılmıştır. Yük akı hesaplamasında dinamik yükler göz önünde bulundurarak dinamik analiz yapılabilir. Bu konuda yazarlar çalışmalara devam etmektedir. Bu çalışma uzay araçları titreşim testlerinin daha etkin planlanması ve kısa sürede yapılması konusunda faydalı olacaktır.

Kaynaklar

- Arianespace, *Ariane 5 User's Manual* Issue 5 Revision 2, 2011. URL, http://www.arianespace.com/wp-content/uploads/2011/07/Ariane5_Users-Manual_October2016.pdf. [Online].
- Arianespace, *Ariane6. Ariane 6 User's Manual* Issue 1 Revision 0, 2018, URL, http://www.arianespace.com/wp-content/uploads/2018/04/Mua-6_Issue-1_Revision-0_March-2018.pdf. [Online]
- Asmolovskiy, Nikolay; Ruess, Florian; Segelke, Harald; Obst, Andreas; Rubio, Alberto, 2014, “*Vibration Test Prediction for a Telecom Satellite*”, Proceedings of the 13th European Conference on Spacecraft Structures, Materials & Environmental Testing, 1-4 April, 2014 in Braunschweig, Germany.
- Calvi, Adriano, 2011, “*An Overview of the E.C.S.S. Handbook for Spacecraft Loads Analysis*” COMPDYN 2011 III ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Corfu, Greece, 25–28 May 2011
- ECSS, 2013, “*Spacecraft Mechanical Loads Analysis Handbook*”, ECSS-E-HB-32-26A, European Cooperation for Space Standardisation, ESA, Noordwijk, The Netherlands
- ECSS 2013, “*Testing*”, ECSS-E-10-03A European Cooperation for Space Standardisation, ESA, Noordwijk, The Netherlands
- ILS, International Launch Services, 2009, *Proton Launch System: Mission Planner's Guide*, 2009. URL <http://www.ilslaunch.com/sites/default/files/pdf/Proton%20Mission%20Planner%27s%20Guide%20Revision%207%20%28LKEB-9812-1990%29.pdf>. [Online].
- SpaceX. *Falcon 9 Launch Vehicle: Payload User's guide Rev2*, 2015. URL, http://www.spacex.com/sites/spacex/files/falcon_9_users_guide_rev_2.0.pdf. [Online].
- ULA, United Launch Alliance, *Delta IV Launch Services User's Guide*, 2010. URL, <https://www.ulalaunch.com/docs/default-source/rockets/delta-iv-user's-guide.pdf>. [Online].
- ULA, United Launch Alliance, *Atlas V Launch Services User's Guide*, 2013. URL, <https://www.ulalaunch.com/docs/default-source/rockets/atlasvusersguide2010.pdf>. [Online].
- Wijker, J.J., Ellenbroek, M.H.M. & Boer, A., 2015, “*Force limited random vibration testing: the computation of the semi-empirical constant C2 for a real test article and unknown supporting structure*”, CEAS Space Journal, 2015, 7., <https://doi.org/10.1007/s12567-015-0086-0>
- Wilson, Delbert, 1989, “*Vibration Testing for Small Satellites*”, Proceedings of the Third Annual AIAA/Utah State University Conference on Small Satellites: Center for Space Engineering, Utah State University, Logan, Utah, September 26-28, 1989. Logan, Utah, <https://digitalcommons.usu.edu/smallsat/1989/all1989/28/>