

## BİR TELEKOMÜNİKASYON UYDUSUNA AİT OPTİK EKİPMANIN RASTGELE TİTREŞİM YÜKLERİNE YETERLİLİK ÇALIŞMALARI

Orçun İZGÜ<sup>1</sup>  
TUSAŞ, ANKARA

Abdulkadir ÇEKİÇ<sup>2</sup>  
TUSAŞ, ANKARA

### ÖZET

*Bu çalışma, geliştirilmekte olan bir telokomünikasyon uydusuna ait optik bir ekipmanın rastgele titreşim yeterlilik test yükü tespit yöntemlerini ve yeterlilik testlerinden elde edilen çıktıları konu almaktadır. Tespit yöntemi olarak Hypermesh, Simcenter 3D ve NASTRAN yazılımları kullanılarak uydu seviyesinde Vibro-Akustik ve Rastgele Titreşim analizleri gerçekleştirilmiş olup analiz sonuçlarında elde edilen veri doğrultusunda ilgili optik ekipmanın uydu üzerinde yerleştirilmesi muhtemel bölgeler göz önüne alındığında maruz kalabileceği en yüksek rastgele titreşim yükü tespit edilmiştir. Yapısal analizler haricinde ECSS-E-HB-32-26A Mekanik Yük Analizi El Kitabı ve ECSS-E-10-03A Test Standartları da incelenmiş olup ilgili dokümanların yük türetme metodlarına göre de hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Güvenli bir yaklaşımla ele alınan hesaplama yöntemlerinden en yüksek seviyede olanı kullanılarak asıl test yükü belirlenmiştir ve ekipman seviyesi yeterlilik testleri belirlenen adımlara göre gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın ileriki aşamalarında uydu seviyesi testlerde ölçülen çıktıların analizlerden hesaplanan değerler ile kıyaslanması ve uydu sonlu elemanlar modeli korelasyonu planlanmaktadır.*

**Anahtar kelimeler:** *Uydu, Vibro-akustik, rastgele titreşim, güç spektral yoğunluğu*

### GİRİŞ

Uydular yörüngedeki görevlerine gönderilmeleri sırasında fırlatıcı roket kapsülüne bağlı durumdayken fırlatıcı motorlarının yanma faaliyetleri sebebiyle yüksek seviyede akustik yüke maruz kalmaktadırlar. Yüksek ses basıncı olarak uyduya dış panellerinden ve geniş yüzeyli ekipmanlarından etki eden akustik yük haricinde fırlatıcıdan kaynaklı olarak da rastgele titreşim yükleri oluşmakta ve uyduya iletilmektedir. 0 ile 8000 Hz frekanları aralığında ve kompleks bir şekilde uydu üzerine etki eden bu tip rastgele titreşim yükleri yüksek titreşim genlikleri sebebiyle uydu birincil yapısına ve uydu üzerindeki faydalı yük olarak adlandırılan ekipmanlara zarar verecek seviyeye ulaşabilmektedir. Bu sebeple, uydular bahsi geçen rastgele titreşim yüklerine dayanıklı olarak tasarlanmalıdırlar. Tasarım ve üretim sürecinin ardından uydu seviyesi akustik ve rastgele titreşim testleri gerçekleştiriliyor olsa bile testlerde herhangi bir tasarım başarısızlığı ile karşılaşılması amacıyla uyduya ait sonlu elemanlar modeli hazırlanarak fırlatım sırasında maruz kalınan yükler uygun sınır koşulları altında modele uygulanarak yapısal analizler gerçekleştirilir. Sonuç olarak test sonuçları hakkında tahmin verisi elde edilmiş olur. Ancak gerek sonlu elemanlar metodunun doğası, gerek ise model hazırlanırken gerçekleştirilen varsayımların asıl koşullardan sapma gösterebilmesi sebebiyle uydu seviyesi testler ile gerçekleştirilen testler arasında fark oluşabilmektedir. Bu gibi farkları en aza indirmek için ekipman

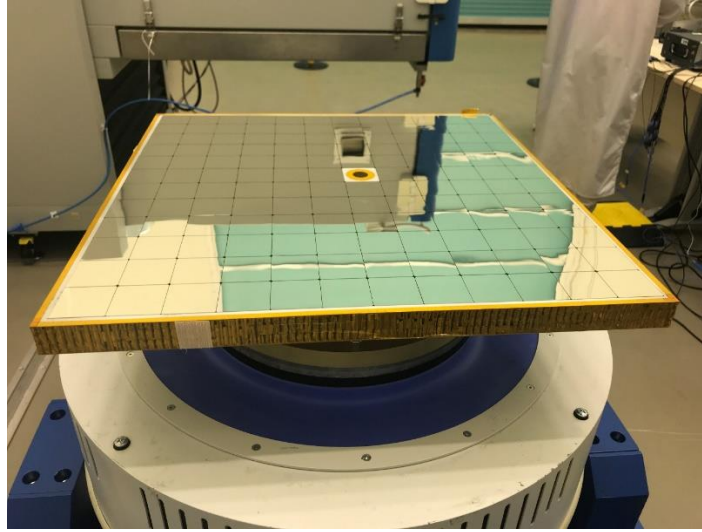
<sup>1</sup> Yapısal Analiz Uzman Mühendisi, E-posta: orcun.izgu@tai.com.tr

<sup>2</sup> Yapısal Analiz Başmühendisi, E-posta: abdulcadir.cekic@tai.com.tr

seviyesi yeterlilik testleri gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu yöntem ilgili ekipmanın daha sonra başka bir uydu platformunda kullanılabilmesi durumunda dayanımı hakkında da bilgi sağlamaktadır.

## YÖNTEM

Bu çalışma, bir telekomünikasyon uydusunun faydalı yük panelinde kullanılacak olan Optik Güneş Yansıtıcısı'larının(ing: Optical Solar Reflector) panele montaj uygulamasının rastgele titreşim yükleri altındaki kalifikasyon çalışmalarını konu almaktadır. Rastgele titreşim yükleri ilgili ekipmanların maruz kalacakları en kritik yük tipini temsil etmektedir. Yapışma performansı kontrolü için de geniş bir frekans aralığında uygulanan test yükleri sebebiyle uygun bir metot olduğu değerlendirilmektedir. OGY'ler, uydunun yörüngedeki görevi boyunca uydunun termal olarak yalıtımının sağlanması amacıyla uydunun görev yükü panellerine ve servis panellerine uygulanan düşük soğurma katsayısına sahip 40mmx40mmx0.1 mm en, boy ve kalınlık ayrıtlarında ayna benzeri ekipmanlardır(Şekil 1). Uydu için zararlı olabilecek ısıyı derin uzay ortamına geri gönderme fonksiyonuna sahiptirler. Bu çalışmanın amacı panellere yapıştırma yöntemi ile uygulanan OGY'lerin kullanılan yapışma metotlarının başarısını ve bu yükleme koşulları altında OGY'lerin dayanımını kontrol etmektir. Bu nedenle uydu paneline eşdeğer alüminyum yüzey malzemesine sahip sandviç deneme paneli üretilmiş olup aynı yapıştırma metotları uygulanarak OGY'lerin panele montajı sağlanmıştır. Bu ekipmanların uydunun fırlatımı sırasında maruz kalacakları en yüksek rastgele titreşim genlikleri gerek analiz yöntemleri kullanılarak gerek ise çeşitli el kitapları ve standartlardan yola çıkılarak hesaplanmıştır. Sonraki aşamada hesaplanan yükün, bir elektro sarsıcı ile deneme paneline çeşitli seviyelerde uygulanması neticesinde OGY'lerin arzu edilen titreşim seviyesine çıkması amaçlanmıştır.



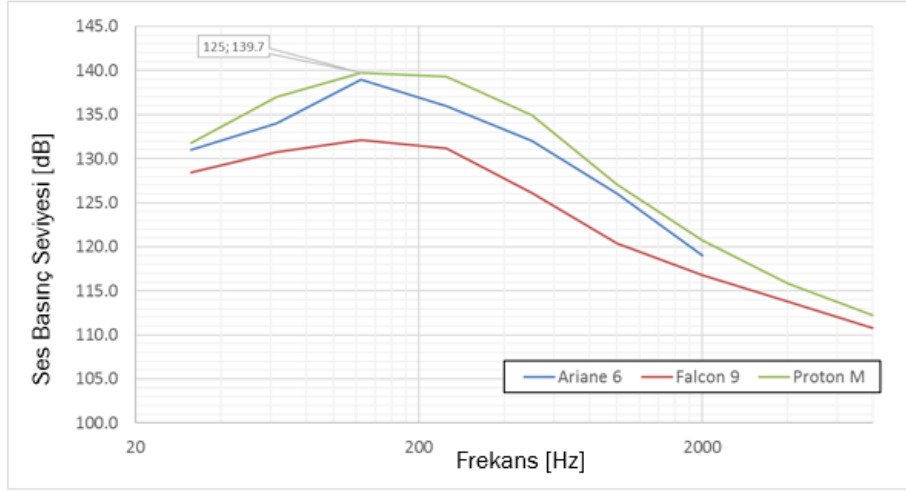
Şekil 1. Deneme paneli üzerine montajı gerçekleştirilen optik güneş yansıtıcıları

### Uydu Sistemlerine Gerçekleştirilen Rastgele Titreşim Testleri ve Amaçları

Uydu yapısal sistemine etkileyen yük türleri mekanik ve akustik yükler olarak iki başlığa ayrılabilir. Dinamik çevre şartlarında sinyaller kendisini tekrar eden biçimde(periyodik) ya da rastgele olabilir. Periyodik sinyaller önceden tahmin edilebilirken, rastgele sinyallerde kısa bir süre içerisinde çok farklı frekanslarda uyarım gerçekleşmektedir. Zamana bağlı olarak ifade edilmeleri matematiksel olarak kompleks olan bu tip rastgele sinyaller istatistiksel yöntemler kullanılarak frekans uzayında ifade edilerek analiz edilmektedir.

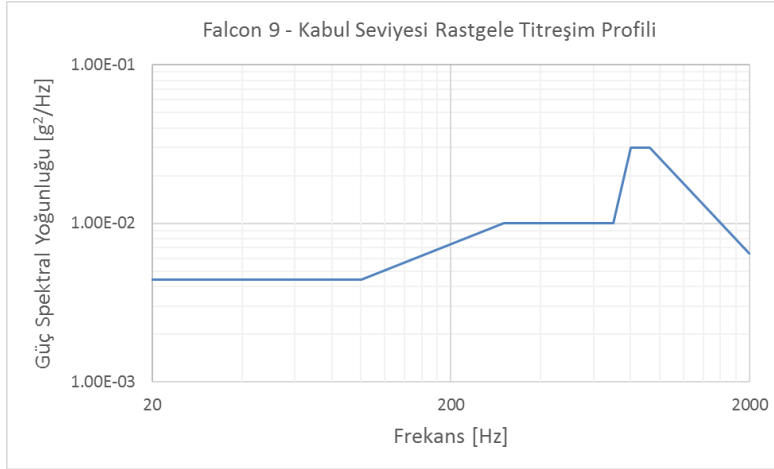
Uydular fırlatımları sırasında roket motorlarının yanma faaliyetleri neticesinde meydana gelen gürültü sebebiyle tahmin edilemeyen yüksek genlikli rastgele titreşim yüklerine maruz kalırlar. Ayrıca taşıma, kalkış ve yörüngedeki hareketleri sonucunda da rastgele titreşim yükleri oluşmaktadır. Bu yükler uydulara sistem seviyesinde akustik odalarda veya elektro sarsıcılar vasıtasıyla uygulanırlar.

Akustik test profili her fırlatıcı için farklı olmakla birlikte bu yükler uydu tasarımcıları tarafından fırlatıcı el kitaplarından sağlanır. Ariane-6, Falcon 9 ve Proton Breeze M roketlerine ait örnek akustik test profilleri aşağıda Şekil 2'de sunulmuştur. Sunulan grafikte decibel ölçeğine ait referans basıncı 20  $\mu\text{Pa}$ 'dır.



Şekil 2. Ariane-6, Falcon 9 ve Proton Breeze M roketlerine ait akustik test profilleri[Ariane Group, July 2011; SpaceX, October 21; Proton, July 2009]

Akustik yük haricinde uyduya etkiyen rastgele titreşim yükleri fırlatıcı roketlere ait el kitaplarında belirtilmiştir. Falcon 9 roketine ait uydunun maruz kalacağı öngörülen rastgele titreşim yükü Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 3. Falcon 9'a ait kabul seviyesi rastgele titreşim yük profili

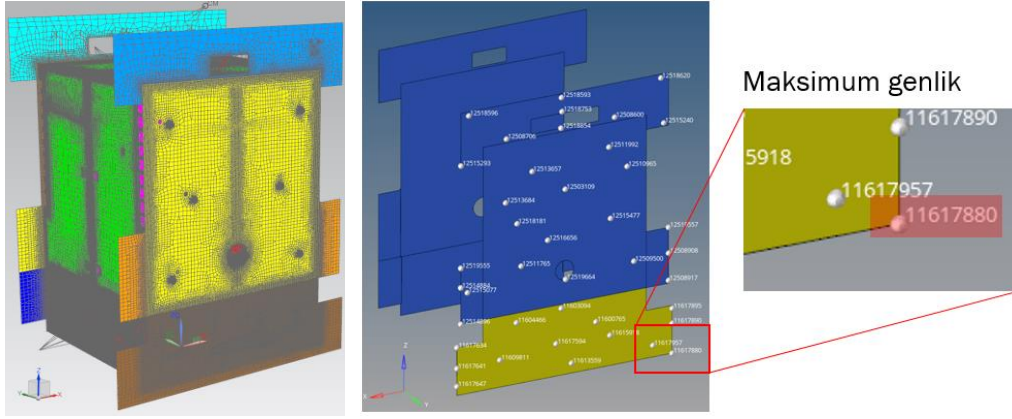
Güç spektral yoğunluğu ivme zaman tarihçesinden Fourier dönüşümü kullanılarak türetilen frekans tabanında ifade edilen bir büyüklüktür. Birimi  $\text{g}^2/\text{Hz}$ 'dir.

## Rastgele Titreşim Yükü Türetme Felsefesi

### Uydu seviyesi Rastgele Titreşim analizi

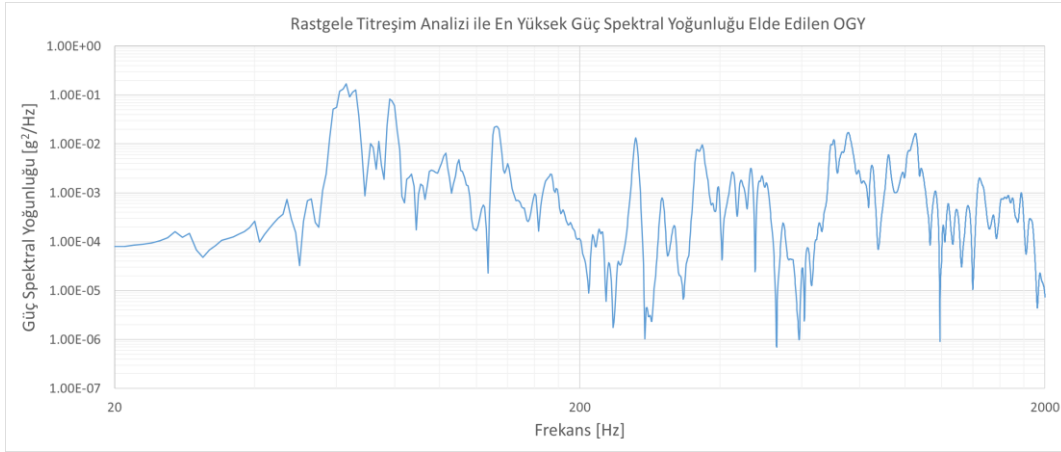
Uydu, Hypermesh yazılımı ile modellenmiş olup yapısal analizler Siemens Simcenter 3D yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Fırlatıcı el kitaplarından edinilen bilgiye göre uyduya sınır koşulu bölgesinden üç yönde rastgele titreşim yükü uygulanmıştır. OGY'lerin uyduya yapıştırılması gereken bölgelerden güç spektral yoğunluğu cevapları alınarak bir OGY'nin maruz kalacağı en yüksek yük genliği tespit edilmiştir. En yüksek genlik görev yükü panelinin serbest salınım yapan köşe bölgesinde panele ait düzlem dışı yönde 29 gRMS olarak hesaplanmıştır. Uydunun güneş panelleri ve

reflektörlerinin çıkartılmış modeli ve analiz sonucuna göre en yüksek genliğin elde edildiği bölge detayı Şekil 4'te sunulmuştur.



Şekil 4. Uydu matematiksel modeli ve rastgele titreşim analizinden elde edilen en yüksek genlik bölgesi

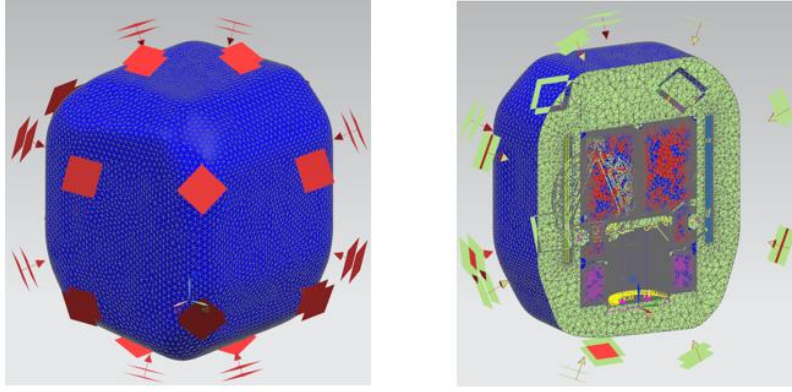
Rastgele titreşim analizi sonucu elde edilen en yüksek güç spektral yoğunluğuna ait normalize edilmiş grafik Şekil 5'te sunulmuştur.



Şekil 5. Rastgele titreşim analizinden elde edilen en yüksek güç spektral yoğunluğu verisi

#### Uydu seviyesi Vibro-Akustik analiz

OGY'ler üzerine gelen rastgele titreşim yüklerini hesaplamak için gerçekleştirilen bir diğer analiz tipi de uydu seviyesi vibro-akustik analizlerdir. Bu analiz tipinde ses dalgasının üretilmesi uyduyu çevreleyen monopoller vasıtasıyla olmakla birlikte ilerlemesi ise uyduyu çevreleyen ve boş hacimleri dolduran hava ile gerçekleşmektedir. Matematiksel model üzerinde ses basıncının uydu üzerine uygulandığı monopollerin ve sesin monopoller tarafından oluşturulduktan sonra uyduya iletilmesini sağlayan havanın görselleri Şekil 6'da sunulmuştur. Analiz Siemens Simcenter 3D yazılımı kullanılarak 5-500 Hz aralığında gerçekleştirilmiştir. Uydu üzerine gelen akustik basınç genliği Şekil 2'de görülebileceği üzere 500 Hz civarlarında dramatik olarak azalmaktadır. Bu nedenle vibro-akustik analiz 5-500 Hz aralığında ve yüksek hızlı bilgisayar kullanılarak gerçekleştirilmiş olup toplam hesaplama 36 saatte tamamlanmıştır. Analiz sonucunda yapısal parçalar vasıtasıyla iletilen rastgele titreşim yükleri ile hava yolu ile gelen rastgele titreşim yüklerinin etkileri neticesinde OGY'lerin uydu üzerine yapıştırıldığı bölgelerden elde edilen rastgele titreşim cevapları hesaplatılmıştır. Uydu paneleri üzerinden çok çeşitli bölgelerden alınan cevap fonksiyonlarına göre en yüksek genlik panel köşe bölgesinde 16 gRMS seviyesindedir. Gerçekleştirilen vibro-akustik analiz neticesinde herhangi bir OGY üzerinden hesaplanan en yüksek güç spektral yoğunluğuna ait normalize edilmiş veri Şekil 7'de sunulmuştur.



Şekil 6. Uyduya uygulanan monopol yükleri ile birlikte kavite modelinin görünümü



Şekil 7. Vibro akustik analizden elde edilen en yüksek cevap fonksiyonu

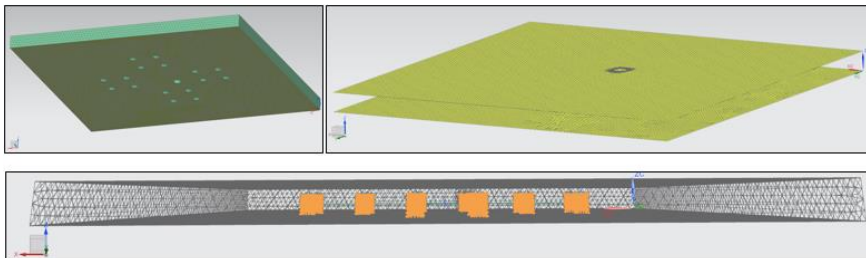
### Mekanik Yük Analizi El Kitabı ve Test Standardı Kullanılarak Gerçekleştirilen Hesaplamalar

Uydu seviyesinde gerçekleştirilen rastgele titreşim ve vibro-akustik analizlerin yanı sıra ECSS-E-HB-32-26A-Mekanik Yük Analizi El Kitabı'nda ve ECSS-E-10-03A-Test Standardı'nda belirtilen rastgele titreşim kalifikasyon yükü türetme hesaplamaları da gerçekleştirilmiştir. El kitabında ve test standardında bahsi geçen hesaplamalara göre OGY'lerin her birinin ulaşması gereken titreşim seviyeleri sırasıyla 22.6gRMS[ESA, 19 February 2019] ve 26.8gRMS[ESA, 1 June 2012]'dir. Sonuç olarak OGY'lere üzerine uygulanması gereken seviye kapsayıcı bir yaklaşımla uydu seviyesi rastgele titreşim analizinin sonucu olan 29 gRMS olarak belirlenmiştir.

### **Panel Seviyesi Rastgele Titreşim Analizlerinden Yük Türetme Çalışmaları**

#### Sonlu Elemanlar Modelleme Felsefesi

Üretilen sandviç panele ait alüminyum yüzeyler Al 2024 T81 izotropik malzeme modellemesi ile yüzey eleman olarak, 50 kg/m<sup>3</sup> yoğunluklu bal peteği ise anizotropik malzeme özellikleri kullanılarak katı elemanlar ile modellenmiştir. Panele ait sonlu elemanlar modeli detayları ve panelin elektro sarsıcı bağlantısı bölgeleri Şekil 8'de sunulmuştur.

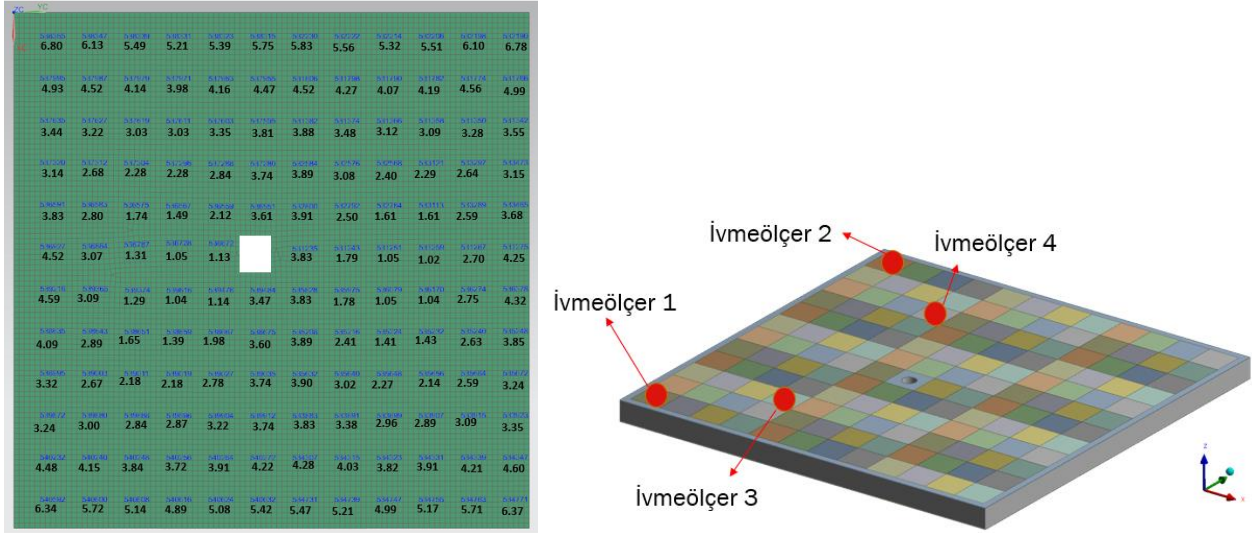


Şekil 8. Panel sonlu elemanlar modeli ve insert bağlantı bölgeleri detayları

## Yapısal Analiz ve Test Sonuçları

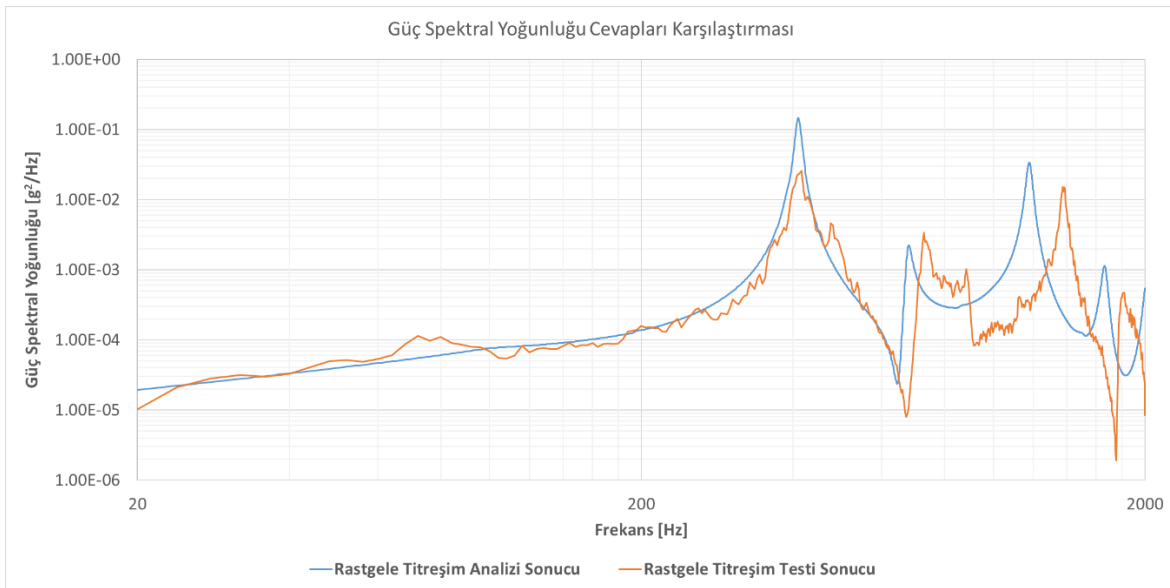
OGY panelinin sonlu elemanlar modeli hazırlanarak hesaplanan rastgele titreşim yükleri altındaki davranışı Simcenter 3D yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Gerçekleştirilen analiz sonucuna göre her bir OGY üzerine gelen yük haritası, gerilme ve gerinim değerleri çıkartılmıştır. Hesaplanan gerinim değerleri kullanılarak OGY'lerin dayanımları hakkında öngörüle bulunulmuştur. OGY tedarikçi firmaya ait olasılık bazlı hesaplama yöntemine göre kalifikasyon seviyesinde OGY'lerin kırılma olasılıkları sıfır olarak hesaplanmıştır.

Panele birim yüklemenin uygulanması neticesinde elde edilen OGY bazlı cevap dağılımı haritası 143 adet OGY için Şekil 9'daki gibi oluşturulmuştur.



Şekil 9. İvme cevap haritası ve panel geometrisi

Rastgele titreşim analizi ile birim yükleme neticesinde elde edilen cevap haritası elde edilmesinin ardından yapısal test çalışmalarına başlanılmıştır. Testlere birim yükleme ile başlanılmış olup test sonuçları gerçekleştirilen yapısal analiz sonucu ile kıyaslanmıştır. Kıyaslama kullanılan tüm ivmeölçerler için yapılmış olup en yüksek genliği sergileyen İvmeölçer 1'e ait kıyaslama sonucu normalize edilerek Şekil 10'da sunulmuştur. Gerçekleştirilen analize göre panele ait doğal frekans kıyaslaması ise Tablo 1'de sunulmuştur.



Şekil 10. Güç Spektral Yoğunluğu Test-Analiz Kıyaslaması

Test ve analiz sonucu arasında yeterli korelasyonun olduğu görülmüş olsa bile test sonuçları ile analiz sonuçları arasında modelleme sırasındaki varsayımlardan kaynaklı dinamik analizde kullanılan sönümlenme katsayısından kaynaklı minör farklılıklar ivme haritasında dikkate alınarak birim yüklemeye ait ivme haritası test sonuçları timeline göre güncellenmiştir.

Tablo 1. Doğal frekansların kıyaslaması

Mod	Frekans [Hz]	
	Analiz	Test
1#	410	428
2#	678	733
3#	1175	1377
4#	1663	1791

Güncellenen ivme haritası ile bir sonraki yükleme adımı olan 10 gRMS'lik rastgele titreşim testine ait tahminde bulunulmuştur. 10 gRMS test sonuçları ile analizden elde edilen tahminlerin birbirine çok yakın olduğu görülmüştür. Panele 10 gRMS yüklemenin uygulandığı test sonucuna göre başarı kriterleri olan 29 gRMS yük seviyesine toplam OGY'lerin %21'inde ulaşıldığı sonucu çıkartılmıştır. Aşağıdaki matriste turuncu renkli hücreler 29 gRMS üzerindeki cevapları temsil etmektedir.

45.65	41.15	36.85	34.97	36.18	38.60	39.14	37.32	35.71	36.99	40.95	45.51
33.09	26.78	24.53	23.58	24.65	26.49	26.78	25.30	24.12	24.83	27.02	33.50
23.09	19.08	17.95	17.95	19.85	22.58	22.99	20.62	18.49	18.31	19.44	23.83
21.08	15.88	13.51	13.51	16.83	22.16	23.05	18.25	14.22	13.57	15.64	21.15
25.71	16.59	10.31	8.83	12.56	21.39	23.17	14.81	9.54	9.54	15.35	24.70
30.34	18.19	7.76	6.22	6.70		22.70	10.61	6.22	6.04	16.00	28.53
30.81	18.31	7.64	6.16	6.76	20.56	22.70	10.55	6.22	6.16	16.30	29.00
27.46	17.12	9.78	8.24	11.73	21.33	23.05	14.28	8.36	8.47	15.58	25.84
22.29	15.82	12.92	12.92	16.47	22.16	23.11	17.90	13.45	12.68	15.35	21.75
21.75	17.78	16.83	17.01	19.08	22.16	22.70	20.03	17.54	17.12	18.31	22.49
30.07	24.59	22.75	22.04	23.17	25.01	25.36	23.88	22.64	23.17	24.95	30.88
42.56	38.40	34.50	32.83	34.10	36.38	36.72	34.97	33.50	34.71	38.33	42.76

Şekil 11. 10 gRMS yüklemeye ait ivme sonuç haritası

Daha sonra testlere 15 gRMS seviyesinde ara test adımı ile devam edilmiştir. Bu testin sonucunda OGY'lerin en azından %64'ünün ulaşılacak istenen kalifikasyon seviyesinin üzerinde yükler gördüğü sonucu çıkartılmıştır.

72.86	65.68	58.82	55.82	57.75	61.61	62.46	59.57	57.00	59.04	65.36	72.64
52.82	42.75	39.16	37.64	39.34	42.28	42.75	40.38	38.49	39.63	43.13	53.46
36.86	30.45	28.66	28.66	31.68	36.03	36.70	32.91	29.51	29.22	31.02	38.04
33.64	25.35	21.56	21.56	26.86	35.37	36.79	29.13	22.70	21.66	24.97	33.75
41.04	26.48	16.46	14.09	20.05	34.14	36.98	23.64	15.23	15.23	24.50	39.43
48.43	29.04	12.39	9.93	10.69		36.22	16.93	9.93	9.65	25.54	45.54
49.18	29.22	12.20	9.84	10.78	32.82	36.22	16.83	9.93	9.84	26.01	46.29
43.82	27.33	15.61	13.15	18.73	34.05	36.79	22.79	13.34	13.52	24.87	41.25
35.57	25.25	20.62	20.62	26.29	35.37	36.89	28.56	21.47	20.24	24.50	34.71
34.71	28.37	26.86	27.14	30.45	35.37	36.22	31.97	27.99	27.33	29.22	35.89
48.00	39.25	36.32	35.18	36.98	39.91	40.48	38.11	36.13	36.98	39.82	49.29
67.93	61.29	55.07	52.39	54.43	58.07	58.61	55.82	53.46	55.39	61.18	68.25

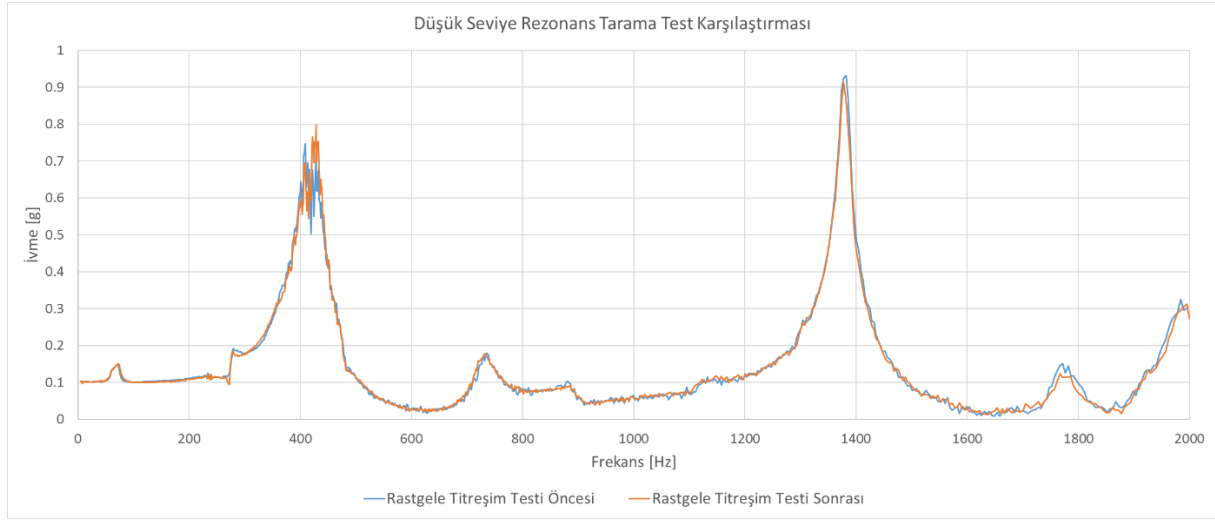
Şekil 12. 15 gRMS yüklemeye ait ivme sonuç haritası

Son olarak 22.6 gRMS seviyesindeki test adımı ile kalifikasyon kampanyası tamamlanmıştır. Bu testin sonucunda OGY'lerin en azından %85'inin ulaşılacak istenen kalifikasyon seviyesinin üzerinde yükler gördüğü sonucu çıkartılmıştır.

110.11	99.26	88.90	84.36	87.28	93.11	94.40	90.03	86.15	89.22	98.78	109.79
79.83	64.61	59.18	56.89	59.46	63.89	64.61	61.03	58.18	59.89	65.18	80.80
55.70	46.03	43.31	43.31	47.88	54.46	55.46	49.74	44.60	44.17	46.88	57.48
50.85	38.31	32.59	32.59	40.59	53.46	55.60	44.02	34.31	32.73	37.74	51.01
62.02	40.02	24.87	21.30	30.30	51.60	55.89	35.73	23.01	23.01	37.02	59.59
73.19	43.88	18.72	15.01	16.15		54.75	25.59	15.01	14.58	38.59	68.82
74.33	44.17	18.44	14.87	16.29	49.60	54.75	25.44	15.01	14.87	39.31	69.95
66.23	41.31	23.58	19.87	28.30	51.46	55.60	34.45	20.15	20.44	37.59	62.34
53.76	38.16	31.16	31.16	39.74	53.46	55.75	43.17	32.45	30.59	37.02	52.46
52.46	42.88	40.59	41.02	46.03	53.46	54.75	48.31	42.31	41.31	44.17	54.25
72.54	59.32	54.89	53.17	55.89	60.32	61.18	57.60	54.60	55.89	60.18	74.49
102.66	92.62	83.23	79.18	82.26	87.77	88.57	84.36	80.80	83.72	92.46	103.15

Şekil 13. 22.6 gRMS yüklemeye ait ivme sonucu haritası

Rastgele titreşim testleri öncesi ve sonrasında gerçekleştirilen normalize edilmiş düşük seviye rezonans tarama test sonucuna göre ivmeölçer cevap fonksiyonu karşılaştırmaları Şekil 14'deki gibidir. Karşılaştırma sonuçlarına göre gözle muayene neticesinde OGY'lerin yapıştırıldığı kompozit panelde rastgele titreşim testleri sonrasında yapısal bütünlüğün korunduğu söylenebilir.



Şekil 14. Rezonans tarama karşılaştırması

### Kalifikasyon Testi Başarı Kriterleri

OGY'lere ait kalifikasyonun başarı ile tamamlanabilmesi için test sonuçlarının aşağıdaki kriterleri sağlaması gerekmektedir:

- OGY'ler üzerinde toplam sayının %5'inin üzerinde bir çatlak oluşmaması,
- Rastgele titreşim testleri öncesi ve sonrası gerçekleştirilen düşük seviye rezonans tarama testlerinin kıyaslamasında frekans açısından %5, genlik açısından %20 farkın üzerinde fark olmaması,
- OGY'lerin çoğunluğunda hesaplanan kalifikasyon yükünün uygulanmış olması.

### UYGULAMALAR VE DEĞERLENDİRME

Gerçekleştirilen analiz ve test çalışmalarının sonucu olarak optik güneş yansıtıcılarının uydu üzerinde maruz kalacağı tahmin edilen rastgele titreşim seviyesi olan 29 gRMS değeri panel seviyesi testler ile en azından %85'lik oranda OGY'ye uygulanmıştır. Panelin dinamik davranışı gereği sınır koşulundan uzak bölgelerde ivme değerinin yükseltgeniyor oluşundan kaynaklı olarak panel uç bölgelerde bu değer 110 gRMS'e kadar yükselmiştir. Kalifikasyon test sonuçlarında OGY'ler üzerinde



herhangi bir çatlak tespit edilmemiştir ve OGY paneline ait kalifikasyon öncesi ve sonrasında gerçekleştirilen rezonans tarama test sonuçları belirlenen başarımların içerisinde yer almaktadır.

## SONUÇ

Uyduların roketler ile fırlatılmaları sırasında maruz kalacakları titreşim yükleri hesaplanırken günümüz teknolojilerinden faydalanılarak sistem seviyesi yapısal analizler gerçekleştirilmesi son derece önemlidir. Ekipmanların kullanım bölgelerine göre maruz kalacakları yük seviyesi büyük oranda değişmekte olup el kitapları ve standartlar ile yapılan hesaplamalar çoğu durumda muhafazakar bilirse bile bazı özel durumlarda meydana gelecek yüklemeye seviyesinin altında kalmaktadır. Bahsi geçen telekomünikasyon uydusuna ait sistem seviyesi akustik ve rastgele titreşim testleri henüz tamamlanmamış olup çalışmanın ileriki aşamalarında uydu sistemi seviyesi testlerde ölçülen çıktıların analizlerden hesaplanan değerler ile kıyaslanması ve uydu sonlu elemanlar modeli korelasyonu planlanmaktadır.

### Kaynaklar

Proton, July 2009, Proton Launch System Mission Planner's Guide – Revision 7

SpaceX, October 21, 2015, Falcon 9 Launch Vehicle Payload User's Guide – Rev 2, Space Exploration Technologies Corp.

ESA, 19 February 2019, ECSS-E-HB-32-26A Mechanical Load Analysis Handbook, ESA Requirements and Standards Division

ESA, 1 June 2012, ECSS-E-10-03A Testing, ESA Requirements and Standards Division

Ariane Group, July 2011, Ariane 5 User's Manual Issue 5 Revision 1, Ariane Group