

UYDULARDA TİTREŞİM TEST SONUÇLARI KULLANILARAK SONLU ELEMENLAR MODELİNİN GÜNCELLENMESİ

Abdulkadir ÇEKİÇ¹²
Orta Doğu Teknik Üniversitesi,
TUSAŞ Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş
ANKARA

Yavuz YAMAN³
Orta Doğu Teknik Üniversitesi
ANKARA

ÖZET

Uydular fırlatma esnasında ve yörüngede görevi sırasında birçok çevresel yüklere maruz kalmaktadır. Uydu tasarımı bu çevresel yüklere göre gerçekleştirilmektedir. Çevresel yüklerden en önemlilerinden birisi, fırlatma esnasında görülen titreşim yükleridir. Tasarımın her fırlatma öncesi titreşim testleriyle değerlendirilmesi ve doğrulanması gerekmektedir. Haberleşme uyduları, ağır ve büyük uydu sınıfına girmektedir. Uydularda etkin ve ekonomik fırlatma ve yörüngeye yerleştirme tüm hava taşıtları gibi ağırlığın azaltılması ile sağlanabildiği için, ilk tasarımların hafifliği sağlayacak şekilde en iyileştirilmesi gerekmektedir. Bu da modellerin güncellenmesi ile elde edilmektedir. Bu çalışmada, oluşturulan sonlu elemanlar modelinin (SEM) sonuçları titreşim test sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve yapılan SEM güncellemeleri açıklanmıştır.

Anahtar kelimeler: Uydular, Titreşim Analizi, Sonlu Elemanlar Modeli, MAC Diyagramı

GİRİŞ

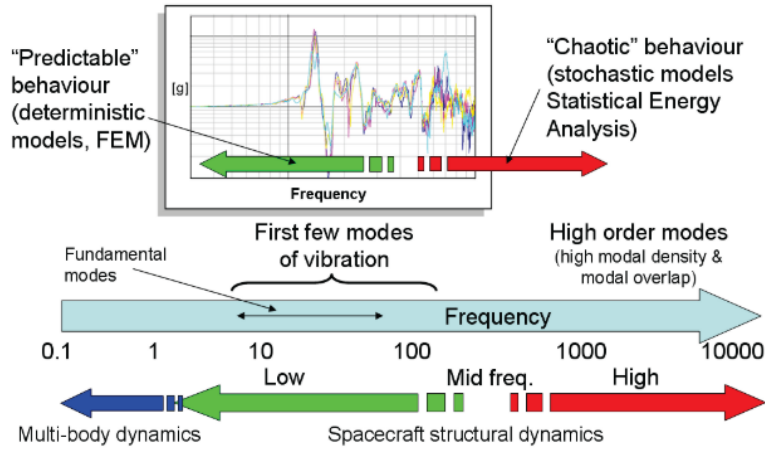
Uydu yapısal tasarımının amacı asgari ağırlık ile uydunun yapısal elemanlarının uyduda bulunan ısı kontrol, itki, aviyonik gibi diğer alt sistemleri bir arada tutup, uydunun montajından başlayarak, fırlatma esnasında ve yörüngede yerçekimsiz ortamda maruz kaldığı çevresel yüklere dayanmasını sağlamaktır.

Uyduya etki eden titreşim yükleri, fırlatma esnasında oluşmaktadır. Bunlar uydu fırlatıcı ara yüzünden sinüs ve şok şeklinde, uydunun dış yüzeyinden ise akustik şekilde iletilmektedir. Bu yüklerin frekans değerleri 10000Hz'e kadar çıkmaktadır. Uydu tasarımında bu yüklerin değerlendirilmesi ve uygun analitik çözümlerin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada fırlatıcının 0-120 Hz arasında etkileyen titreşim yükleri değerlendirilmiştir. Şekil 1'de uydunun fırlatma esnasında görebileceği titreşim yükleri ve uygulanabilecek analiz metotları gösterilmiştir.

¹ Yüksek Lisans Öğrencisi, E-posta: abdulcadir.cekic@metu.edu.tr

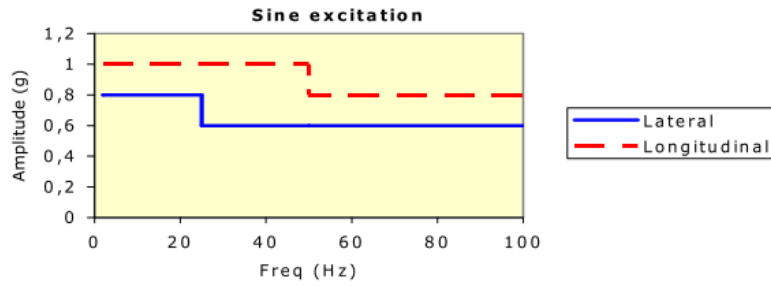
² Yapısal Analiz Uzmanı, E-posta: abdulcadir.cekic@tai.com.tr

³ Prof. Dr., Havacılık ve Uzay Müh. Böl. , E-posta: yyaman@metu.edu.tr

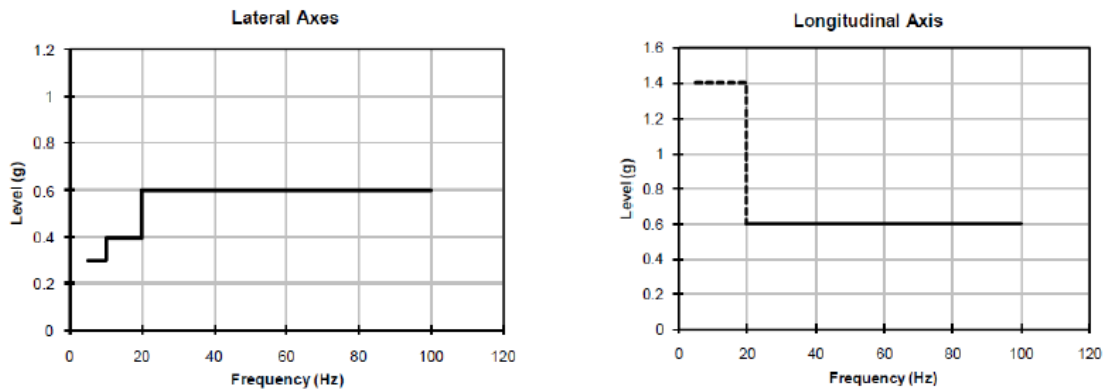


Şekil 1 Fırlatıcının Frekans Aralıklarına Göre Dinamik Davranışları ve Analiz Metotları[1]

Uydu tasarımı tamamlandıktan sonra, yapının fırlatma esnasında karşılaşılabilecek çevresel yüklere karşı dayanıklılığı, mekanik testler ile doğrulanması gerekmektedir. Mekanik testler, titreşim, şok, akustik ve ısı testleri içermektedir.[1] Titreşim testlerinde uygulanacak titreşim profilinin süresini, şiddetini ve frekans aralığını fırlatıcı firmalar yayınlanmaktadır. Şekil 2 ve Şekil 3'de farklı fırlatıcı firmalara ait titreşim profilleri verilmiştir.[2][3]

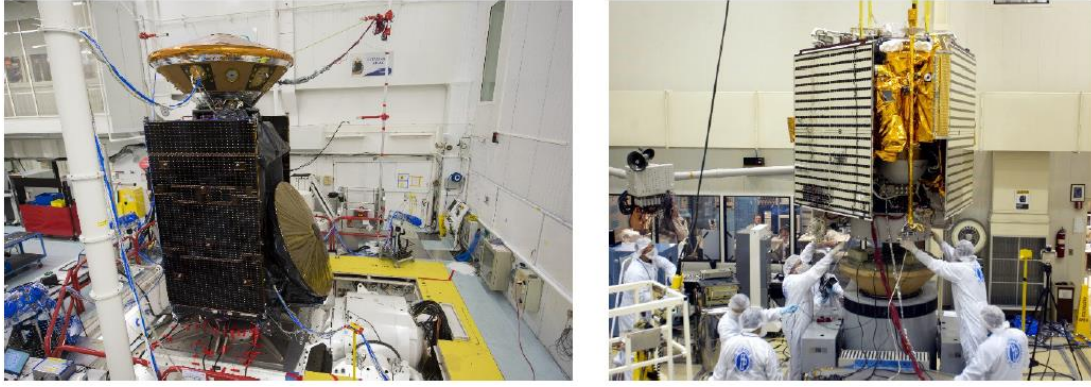


Şekil 2 Ariane 5 Fırlatıcısının Uydu Ara Yüzü Sinüs Uyarımı[2]



Şekil 3 Proton Fırlatıcısının Uydu Ara Yüzü Sinüs Uyarımı[3]

Fırlatıcı firmalar tarafından belirlenen titreşim test profilleri uydu üzerinde yanal (X ve Y yönü) ve dikey (Z yönü) olmak üzere uygulanarak; uydu yapısının bütünlüğünün korunduğunun ve titreşim davranışlarının fırlatıcı gereksinimlerini karşıladığının gösterilmesi gerekmektedir. Şekil 4'de farklı ticari uydulara uygulanan titreşim testleri gösterilmiştir.



Şekil 4 Yatay ve Düşey Yönlere Uygulanan Titreşim Testleri [4]

Gerçekleştirilen titreşim testlerinden sonra, uydu tasarımı için kullanılan sonlu elemanlar modelinin güncellenmesi fırlatıcının uydu sonlu elemanlar modeli kullanarak gerçekleştirilecek fırlatıcı-uydu bir arada yük analizi (Coupled Load Analysis) için önemlidir. Bu çalışmada, titreşim test sonuçları ile sonlu elemanlar modeli analiz sonuçları karşılaştırılacak ve bazı tasarım değişiklikleri ile duyarlılık analizi sonuçları sunulacaktır.

YÖNTEM

Bu çalışmada bir iletişim uydusu için oluşturulan sonlu elemanlar modelinin, titreşim testleri sonuçları ile karşılaştırılması ve sonuçlara dayanarak sonlu elemanlar modelinin güncellenmesi anlatılacaktır.

İletişim uydusunun sonlu eleman modeli MSC PATRAN 2017.0.3 titreşim analizleri MSC NASTRAN 2017.0.3 kullanılarak yapılmıştır. Sonlu Elemanlar Modeli Şekil 5’de gösterilmiştir. Modele ait veriler de Tablo 1’de açıklanmıştır. SEM kullanılarak belirlenen yapı dinamik tepkisi ölçülen değerlerle karşılaştırılmıştır. SEM’inde yapılan güncellemeler ile frekans değerleri ölçülen değerlere yakınsamıştır.



Şekil 5 İncelenen Sonlu Elemanlar Modeli

Tablo 1 İncelenen Sonlu Elemanlar Modeli Sayıları

Kabuk Eleman	681716
Düğüm	784731
Rigit Elemanlar	5875
Toplanmış kütle	323

UYGULAMALAR

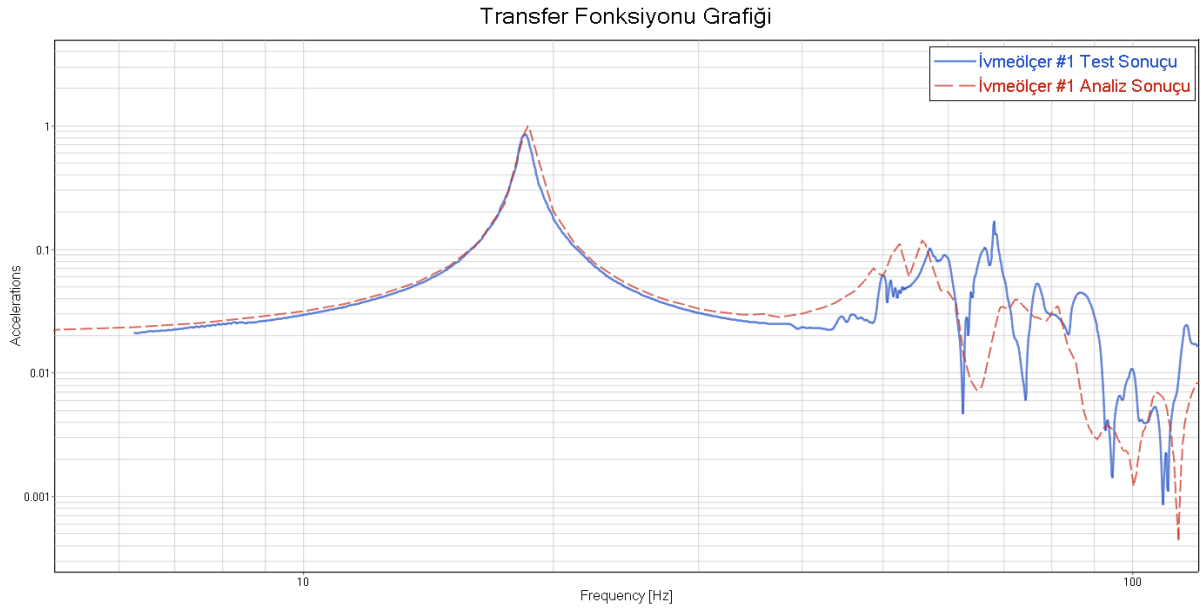
Çalışmada hesaplanan doğal frekans ve etkin kütle (effective mass) değerleri Tablo 2 de gösterilmiştir.[sol103][6]

Tablo 2 İncelenen iletişim Uydusunun Doğal Frekans ve Etkin Kütle Değerleri

	Frekans [Hz]	Etkin Kütle						Tanım
		Titreşen Kütle(%)			Dönerek Titreşen Kütle (%)			
		X Yönünde	Y Yönünde	Z Yönünde	X Yönünde	Y Yönünde	Z Yönünde	
1	18,50	47,8	1,0	0,0	2,0	87,2	0,0	X Yönünde 1. Eğilme Biçimi
2	18,65	1,1	46,7	0,0	87,2	1,9	0,0	Y Yönünde 1. Eğilme Biçimi
3	36,54	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	76,8	Z Yönünde 1. Burkulma Biçimi
4	68,85	0,1	0,0	19,7	0,0	0,0	0,1	Dikey Yönde Bir Arada Oluşun Titreşim Biçimleri
5	70,11	0,1	0,0	27,5	0,0	0,0	0,0	
6	72,73	0,2	0,0	20,5	0,0	0,0	0,0	

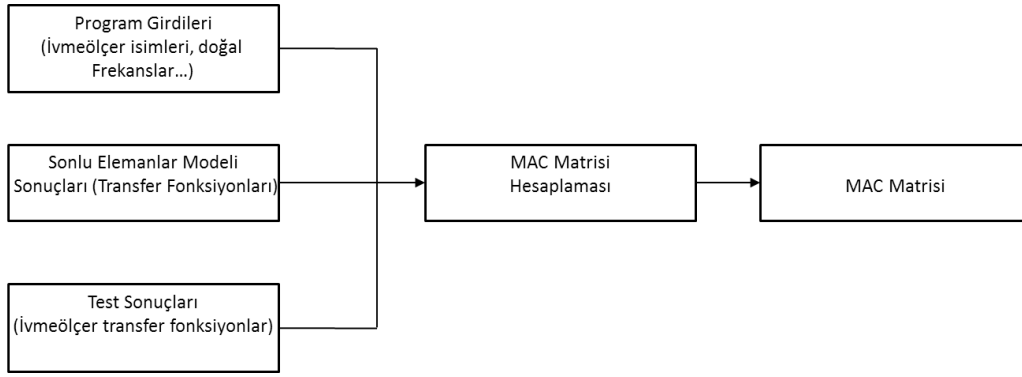
Sonlu elemanlar modeli kullanılarak titreşim testi için kullanılan ivmeölçer transfer fonksiyonları hesaplanmıştır [sol111] [6]

Uydu üzerine yerleştirilen bir ivmeölçerin X yönündeki 1.eğilme biçimindeki frekans değerinin analiz ve test transfer fonksiyonları Şekil 6'de karşılaştırılmıştır. Uydunun sonlu elemanlar modeliyle elde edilen frekans değeri 18.65Hz iken titreşim testinde bu değerin 18.57 olduğu görülmüştür.



Şekil 6 X Yönündeki 1. İvmeölçerin Tepke Değerleri

Uydunun diğer frekans biçimlerindeki uyumluluğunu görebilmek için test ve analiz sonuçlarında şekil güvence kriteri kullanılmıştır (Modal Assurance Criteria, MAC). Şekil güvence kriterinin titreşim testi ve analiz sonuçları arasında kolayca uygulanabilmesi için bir fortran kodu yazılmış ve Şekil 7'de programın çalışma akış diyagramı gösterilmiştir.

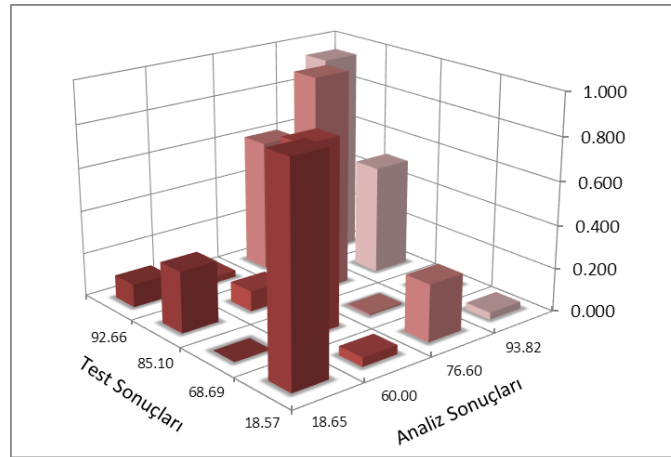


Şekil 7 MAC Hesaplama Fortran Kodu Akış Diyagramı

MAC değerlerinin hesaplanabilmesi için toplamda 12 tane ivmeölçer kullanılmıştır. Bu ivmeölçerlerden 4 tanesi ana yapı üzerinde, 4 tanesi reflektör, 2 tanesi üst tank ve 2 tanesi alt tank 'da bulunmaktadır. Program kullanılarak elde edilen bazı MAC değerleri Şekil 8 ve Tablo 3'de gösterilmiştir.

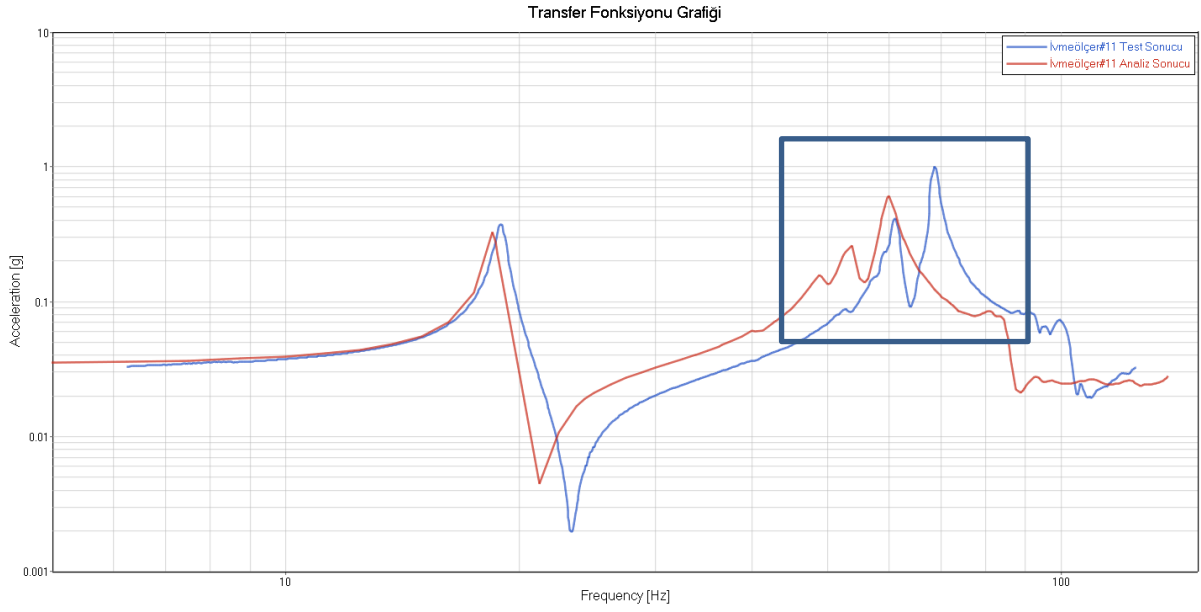
Tablo 3 Test ve Analiz Sonuçlarının MAC Matrisi

			Test Sonuçları			
			1	2	3	4
Hz			18.57	68.69	85.10	92.66
Analiz Sonuçları	1	18.65	0.967	0.001	0.282	0.107
	2	60.00	0.042	0.854	0.094	0.031
	3	76.60	0.262	0.007	0.995	0.610
	4	93.82	0.032	0.002	0.505	0.944



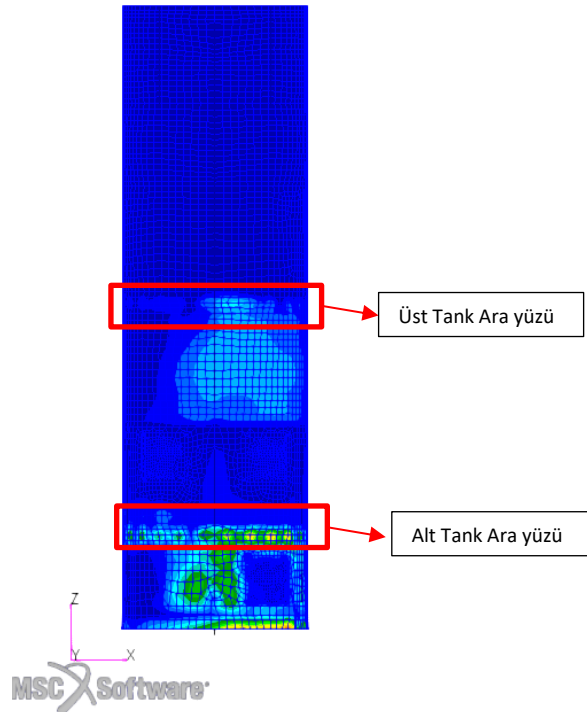
Şekil 8 Test ve Analiz Sonuçlarının MAC Matrisi Grafiği

Bu bildiride 68.69Hz'de üst tank üzerindeki ivmeölçerde görülen, üst tank 'dan kaynaklanan eğilme frekansına odaklanılmıştır. Tank üzerinde bulunan ivmeölçer üzerinden test sırasında alınan tepke değerleri ile analiz sonuçları Şekil 9'da ayrı olarak gösterilmiştir.



Şekil 9 X Yönündeki 11. İvmeölçerin Tepke Değerleri

Sonlu elemanlar güncelleme çalışmasına başlamadan önce analiz sonuçlarında 60.0Hz' de görülen gerinim yoğunlukları incelenmiştir. Gerinim yoğunlukları ilgili frekansta yapı üzerinde yapılacak değişikliklerde sonucu en çok değiştirecek bölgeleri göstermektedir. Şekil 10'da 60.0Hz'de merkezi silindir üzerinde gerinim yoğunluk bölgeleri gösterilmiştir.



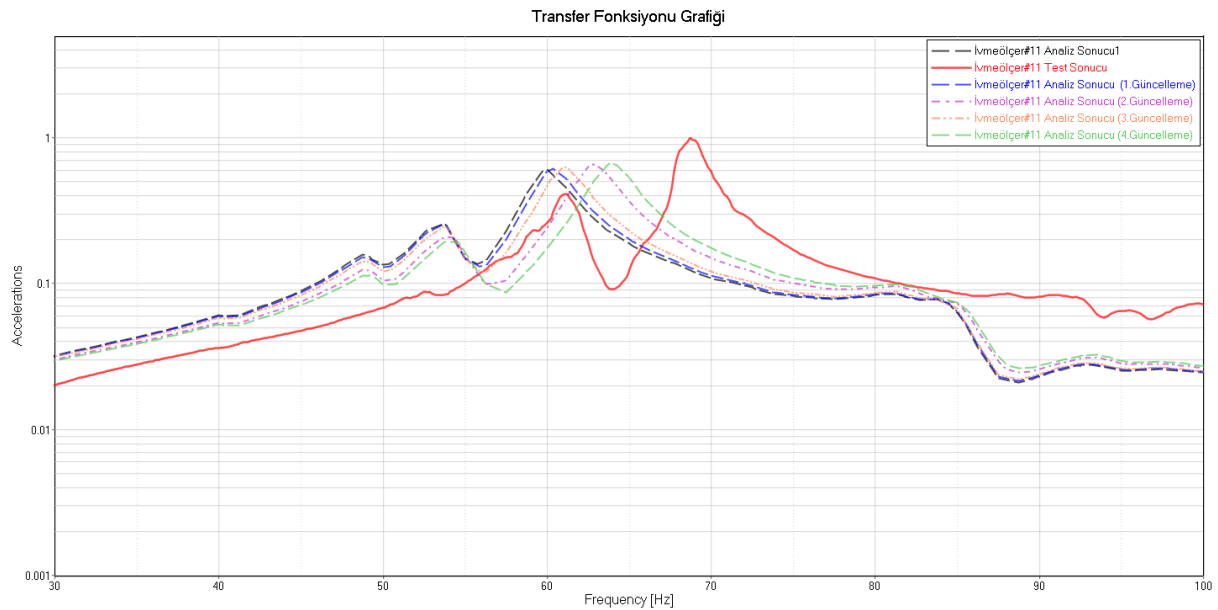
Şekil 10 Merkezi Silindir 60.0Hz Gerinim Yoğunluğu

Gerinim yoğunlukları incelendiğinde, merkezi silindir üzerinde üst ve alt tank ara yüzlerinde fazla olduğu görülmüştür. Sonlu elemanlar modelinde yoğunluğun fazla olduğu bölgelerde yapılan 4 farklı güncellemenin frekans değerlerine ve MAC değerlerine etkisi çalışılmıştır. SEM’de yapılan 4 farklı güncelleme Tablo 4 ‘de gösterilmiştir.

Tablo 4 Sonlu Elemanlar Modelinde Yapılan Güncellemeler

	Açıklama
1.Güncelleme	Merkezi Silindir Üst ve Alt Tank bağlantı bölgesi Elastik modülüsü artırıldı
2.Güncelleme	Merkezi Silindir Üst ve Alt Tank bağlantı bölgesi Bal Peteği düzlem dışı direngenliği artırıldı
3. Güncelleme	Üst ve Alt Tank Sonlu Elemanlar modeli direngenliği artırıldı.
4. Güncelleme	2. ve 3. Güncellemeler birlikte uygulandı

4 farklı güncelleme sonucu elde edilen analiz tepke sonuçları ve test sonucuyla karşılaştırılması şekil 11’de gösterilmiştir.



Şekil 11 X Yönündeki 11. İvmeölçerin farklı güncellemelerde Tepke Değerleri

Her bir değişiklik sonucunda güncellenen MAC matrisi Tablo 5 ve 6 ‘da verilmiştir.

Tablo 5 1. ve 2. Güncelleme Test ve Analiz Sonuçlarının MAC Matrisi

1.Güncelleme						
			Test Sonuçları			
			1	2	3	4
Hz			18.57	68.69	85.10	96.59
Analiz Sonuçları	1	18.59	0.967	0.001	0.283	0.205
	2	60.35	0.047	0.852	0.097	0.057
	3	76.61	0.263	0.007	0.995	0.659
	4	93.90	0.244	0.000	0.505	0.944

2.Güncelleme						
			Test Sonuçları			
			1	2	3	4
Hz			18.57	68.69	85.10	96.59
Analiz Sonuçları	1	18.63	0.967	0.001	0.283	0.205
	2	62.78	0.094	0.858	0.140	0.071
	3	76.77	0.261	0.008	0.994	0.653
	4	94.12	0.232	0.001	0.503	0.946

Tablo 6 3. ve 4. Güncelleme Test ve Analiz Sonuçlarının MAC Matrisi

3.Güncelleme						
			Test Sonuçları			
			1	2	3	4
Hz			18.57	68.69	85.10	96.59
Analiz Sonuçları	1	18.51	0.967	0.001	0.282	0.205
	2	60.98	0.058	0.870	0.106	0.059
	3	76.64	0.261	0.008	0.995	0.657
	4	93.92	0.244	0.000	0.500	0.946

4.Güncelleme						
			Test Sonuçları			
			1	2	3	4
Hz			18.57	68.69	85.10	96.59
Analiz Sonuçları	1	18.63	0.967	0.001	0.283	0.205
	2	63.92	0.091	0.882	0.148	0.073
	3	76.81	0.258	0.010	0.994	0.649
	4	94.42	0.238	0.001	0.500	0.948

SONUÇ

Bu çalışmada haberleşme amacı ile kullanılabilecek bir uydunun sayısal ve deneysel çalışmaları yapıp, sonuçlar karşılaştırılmıştır. Haberleşme uydusu üzerinde toplanan verilerden 68.693Hz'de elde edilen analiz sonuçları, test sonuçları ile karşılaştırılmış ve sonuçlar Tablo 5'de gösterilmiştir.

Tablo 7 Güncellemeler ile elde edilen sonuçlar

	Frekans [Hz]			MAC Değeri	
	Analiz	Test	Fark (%)	MAC	Fark (%)
Ana Model	59.995	68.693	14.50%	0.854	
Güncelleme #1	60.345		13.83%	0.852	0.23%
Güncelleme #2	62.778		9.42%	0.858	0.47%
Güncelleme #3	60.981		12.65%	0.870	1.87%
Güncelleme #4	63.920		7.47%	0.882	3.28%

Güncellemeler yapılmadan önce frekansta görülen %14.5'lük fark, SEM'de yapılan güncellemeler sonucunda %7.47'e düşmüştür. İlgili frekansın MAC değerinde ise %3.28'lik bir iyileşme görülmüştür.

Bu çalışma ile birlikte uydu yapısının sayısal modeli ile deneysel modeli arasındaki farklılıkların örnek bir frekansla nasıl en aza indirgeneceği gösterilmiştir. Böylelikle sayısal model daha etkin hale getirilmiştir.

Kaynaklar

- [1] ECSS Secretariat, *Space engineering - Spacecraft mechanical loads analysis handbook*, no. February. 2013.
- [2] Arianespace, “*Ariane 6 Users Manual*,” no. 1, p. 152, 2016.
- [3] I. International Launch Services, “*Proton Launch System: Mission Planner’s Guide*,” 2009.
- [4] M. Şahin and A. Atak, “*Uzay Araçları ve Uydularda Titreşim Testleri ve Test Süreçleri*.” ,UHUK-2018-135
- [5] MSC Software, *MSC NASTRAN Quick Reference Guide*. .