

BÜKÜM ALÜMİNYUM PLAKANIN DİNAMİK YÜKLER ALTINDAKİ SAYISAL VE DENEYSEL DİNAMİK CEVAP ANALİZLERİ

Enver SUN^{1*}
ASELSAN, ANKARA

Cem GENÇ^{2†}
ASELSAN, ANKARA

ÖZET

Kara, hava, deniz ve uzay araçlarına entegrasyonu yapılan tüm elektrik, mekanik, elektromekanik ve elektrotik tasarımlar çalışma koşullarında yapısal hasarlara sebebiyet veren titreşim ve şok gibi zorlu çevresel koşullara maruz kalmaktadır. Bu sistemlerin tasarım süreçlerinde, hasar oluşmasının engellenmesi, tasarımların gereksinimlere uygun istenen performansı istenen sürede yerine getirebilmeleri amacı ile yoğun tasarım-analiz ve test süreçleri izlenmektedir. Bu süreçte analizleri doğrulayan test sonuçlarının elde edilmesi, gerçekleştirilen analizlere olan güveni artırmanın yanında tasarım-süresini minimize etmekte ve doğru tasarım değişikliklerinin hangi bölgede yapılması konusuna ışık tutmaktadır. Günümüz ürün geliştirme faaliyetlerinde kabul gören bilgisayar destekli analiz yöntemleri üretim öncesinde simulasyon ortamında yapıların dinamik yükler altındaki davranışının doğru belirlenmesine, hataların önceden ön görülmesine ve uygun dinamik davranışı gösteren ürünlerin elde edilmesine zemin hazırlamakta, zaman ve maliyet açısından avantaj kazandırmaktadır. Bu çalışmada büküm alüminyum bir plakanın, titreşim ve şok yükleri altında gösterdiği dinamik davranışın, sonlu elemanlar yöntemi ve deneysel test yöntemleri kullanılarak irdelenmesi, her iki yöntem sonuçlarının karşılaştırılarak tasarım süreçlerinde kullanılmak üzere tasarımın uygunluğunun değerlendirilmesine yönelik en pratik, doğru, güvenilir, etkin bir çözüm yönteminin geliştirilmesi hedeflenmiştir. MIL-STD-810 F askeri standardında verilmiş olan rastsal titreşim, dinamik şok yükleri, ABAQUS 6.11[®] sonlu elemanlar yazılımında ve çevresel koşul laboratuvarında büküm plaka üzerine uygulanarak yapısal dinamik cevaplar karşılaştırılmıştır. Şok yükleri, zaman düzleminde ve frekans düzleminde (SRS formu kullanılarak) uygulanmış ve her iki uygulama şekli ayrıca karşılaştırılmıştır. Sonuçlar sayısal yöntemin, belirli kıstaslar altında, pahalı ve zaman alan deneysel yöntemlere göre daha hızlı çözüm yöntemi olduğunu ortaya koymuştur.

GİRİŞ

Gelişmekte olan teknolojilerin en önemli itici güçlerinden birisi, kara, hava, deniz ve uzay platformlarından istenen görevlerin icrasının sağlanması olmaktadır. Bu yapıların öngörülen performans ve emniyette tasarlanması havacılıkmühendisliğinin hedeflerinin başında gelmektedir. Hava platformlarında güvenliğin ön planda olması ve sürekli değişen teknolojik uygulamaların ilklerinin bu sahada yapılması nedeniyle yapısal tasarımlar ve platform üzeri entegrasyonlar belirlenmiş bazı yönetmelik ve standartlara göre kontrol edilmektedir. Hava, uzay platformları tasarım, entegrasyon

¹ Mekanik Analiz Test Uzm.Müh., REHİS/Hava Uzay Platformları Entegrasyon Müh.:eposta:esun@aselsan.com.tr

² Mekanik Analiz Test Tasarım Lideri, REHİS/Hava Uzay Platformları Entegrasyon Müh.:eposta:genc@aselsan.com.tr

süreçlerinde yapısal analiz ve test adımları önemli bir yer teşkil etmektedir. Tasarımların statik ve dinamik yükler altındaki davranış ve mukavemetleri günümüz bilgisayar destekli tasarım teknolojisi ile önceden hesaplanabilmekte, gerekli önlem ve tasarım değişiklikleri gerçekleştirildikten sonra tasarımlar uçuş testleri ve laboratuvar ortamında gerçekleştirilen çevresel koşul testleri ile doğrulanmaktadır [Çelik, Genç, Sun 2010].

Kara, hava, deniz ve uzay platformlarında kullanılan tüm sistemler zorlayıcı çevresel koşullara maruz kalmaktadır .Bu sistemler gerek mukavemet ve gerekse de fonksiyonel olarak maruz kalınan yüklerle göre tasarlanmak zorundadır [Tentechllc, Case Studies,2014] (Şekil 1). Özellikle askeri platformlarda helikopterler, titreşim genlik seviyeleri en yüksek ve tahrik frekans aralığı en geniş olan platformlardır [Çelik, Genç, Sun 2010]. Bu titreşim yükleri helikopter gövdesine entegre tüm mekanik, elektronik ve elektromekanik yapılarda zamanla titreşim kaynaklı yorulmaya ve bileşenlerin hasar görmesine sebep olabilmektedir [Aykan, Çelik, 2009], [Çelik,2003]. Benzer şekilde uzay araçları ve uydu platformlarına monte edilen sistemler, fırlatma anından yörüngeye ulaşmaya kadar geçen sürede elektronik devre kartlarına, güneş panellerine, hassas kamera ve optik sistemlere, antenlere zarar veren yoğun titreşim ile birlikte modüllerin kademe-kademe ayrılması sırasında oluşan piroteknik bağlantı kesici patlayıcı kaynaklı şok yüklerine maruz kalmaktadır (Şekil 2), [Nadem Siam, 2010;Do,T.,Perl, E., Peterson,A.,Welch,J.,2005].

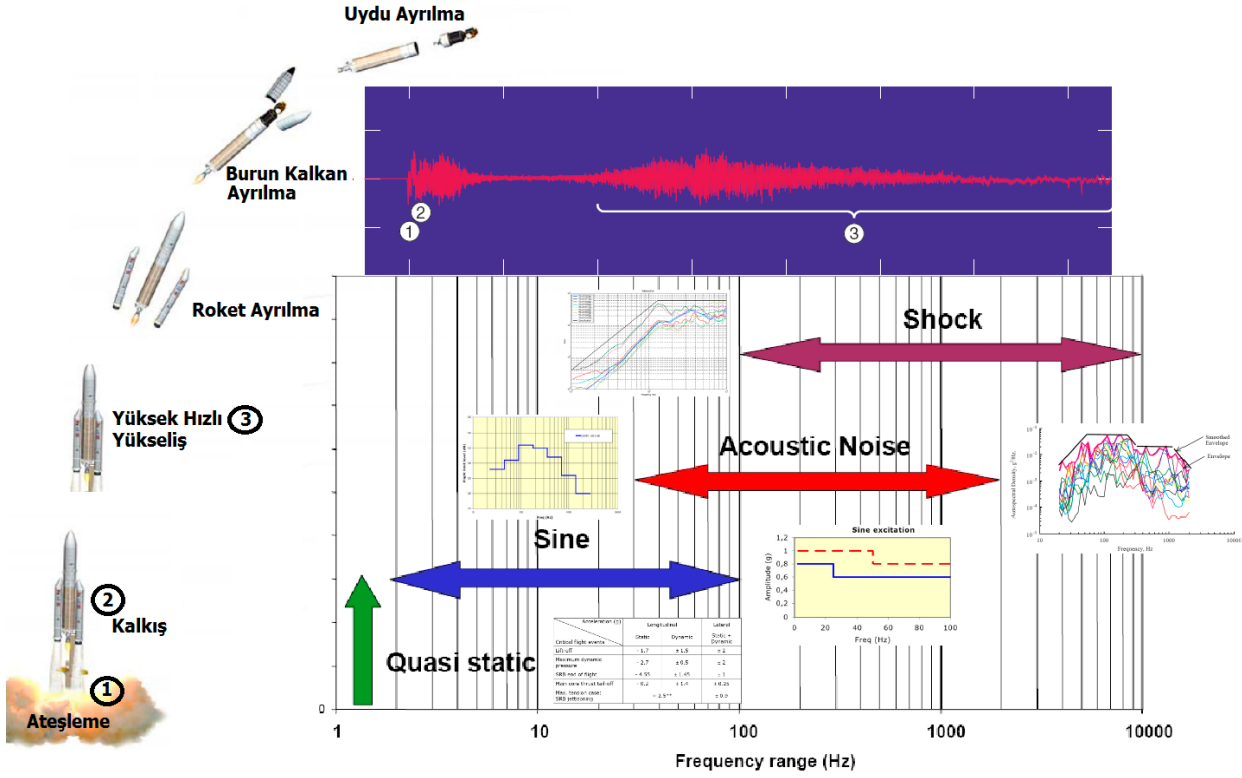


Şekil 1: Kara, hava, deniz ve uzay platformlarında kullanılan örnek tasarımlar

Çevresel koşullar içerisinde, titreşim ve şok yüklerine karşı dayanım ve bu yükler altında fonksiyonel olarak tasarımın hedeflenen görevi yerine getirmesi aynı zamanda önemli bir tasarım gereksinimidir. Bahsi geçen çevresel koşullar, kara, hava, deniz, uzay platformları için MIL-STD 810 F/G, MIL-STD1540C, MIL-S-901D, MIL_E 5400T, RTCA/DO160, ECSS vb gibi farklı standartlarca; ürün geliştirme sürecinde tasarımların uygunluğunun laboratuvar koşullarında gerçekleştirilen benzetim testleri ile değerlendirmek üzere tanımlanmıştır. Hedeflenen; nihai ürünlerin kullanım alanında maruz kalacağı titreşim ve şok yükleri gibi zorlu koşullar altında mekaniksel ve elektriksel olarak herhangi bir yetmezliğe uğramadan görevini yerine getirmesini sağlamaktır.

Dinamik Yükler

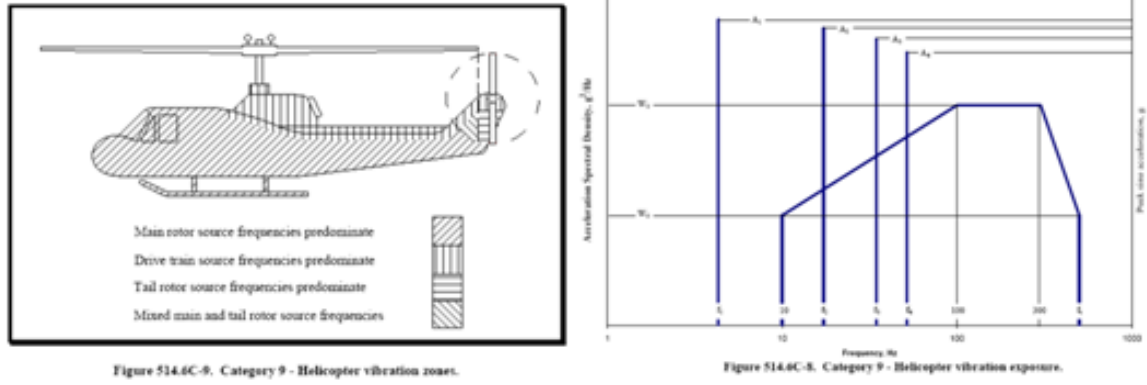
Hava, uzay platformlarında karşılaşılan ve zamana bağlı olarak değişkenlik gösteren dinamik yükler, basitce harmonik, karmaşık rastsal titreşim ve anlık olarak oluşan şok yükleri olarak sınıflandırılmaktadır. Uydu fırlatımı tüm bu yüklerin birbiri ardına olduğu nadir örneklerden biridir. Fırlatma esnasında şok yükleri oluşmakta ve yükselme sırasında karşılaşılan akış yükleri tüm yapıda sarsıcı bir etki yaratmaktadır. Yapılara aktarılan bu etkiler belirli bir frekans bandında gerçekleşmektedir [Calvi, Adriano, 2011] (Şekil 2).



Şekil 2: Uydu fırlatma esnasında oluşan titreşim ve şok yükleri

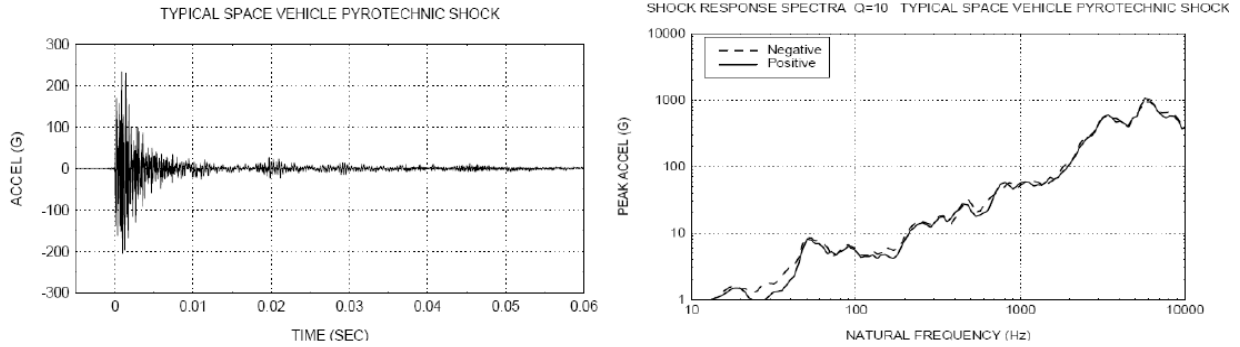
Titreşim mekanik döner parçaların hareketinden, yüksek hızlı (hava-su) akış yüklerinden kaynaklanan ve belirli bir referans noktasına göre salınım hareketi olarak tanımlanmaktadır. Tüm kara, deniz, hava ve uzay platformlarında karşılaşılan en yaygın ve gerçekçi formu rastsal titreşimdir. Zaman düzleminde ivmeölçerler vasıtasıyla ölçülebilen rastsal titreşimler Fourier Transfom tekniği ile frekans düzlemine aktarılarak güç spektral yoğunluk (PSD) eğrileri şeklinde ifade edilmektedir. İçeriğindeki geniş-band frekansa bağlı enerji sebebi ile yapılar üzerinde tüm frekansları aynı anda tahrik eden sarsıcı etkileri bulunan temel dinamik yüklerden biridir [William,K.,1998].

Pervaneli uçak yapılarına ve helikopter yapılarına entegre sistemlere etkiyen titreşimler genel olarak döner kanatların yarattığı geniş frekans bandına sahip rastsal titreşimlere ek olarak belirli dar frekans aralığına sahip sinusoidal tepe genliklerinin oluşturduğu ve standartlarca tanımlanmış titreşim yükleridir (Şekil 3) [MIL-STD-810G,2008].



Şekil 3:MIL-STD-810G Rastsal Titreşim Profili

Sok yükleri patlama, çarpma anında oluşan ve kısa süreli, yüksek genlik ve frekansa sahip dinamik yüklerdir. Yüksek genlikli salınımlara ve gerilmelere sebep olmaktadır [Harris, M., Piersol, A.G,2002]. Zaman düzleminde gerçekleşen ölçümler frekans düzleminde) SRS (Şok Cevap Spektrumu) formunda ifade edilirler. Özellikle uydu platformlarında modüllerin ayrılması sırasında gerçekleştirilen piroteknik bağlantı kesici patlamalar ciddi şok etkileri oluşturmaktadır (Şekil 4) [Irvine,T,2009].



Şekil 4:Zaman ve frekans düzleminde anlık dinamik şok yükü

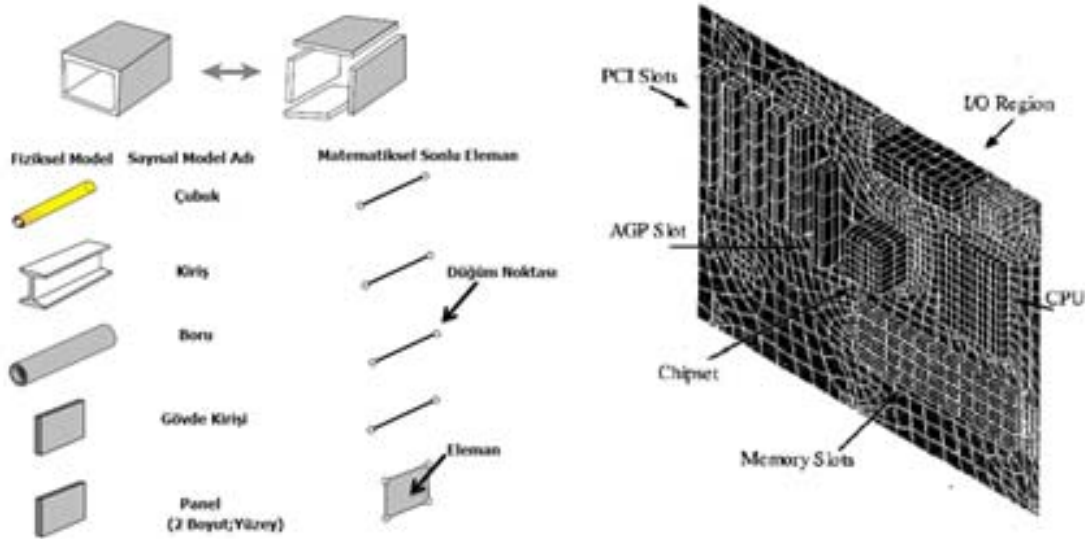
SAYISAL-DENEYSSEL TİTREŞİM VE ŞOK ANALİZLERİ

Yapıların dinamik davranışlarının belirlenmesinde sayısal ve deneysel olmak üzere farklı alternatif analiz yöntemleri mevcuttur:

Sayısal Yöntem

Karmaşık mühendislik problemlerinin çözümünde fiziksel problem, düğüm noktaları ile birbirine bağlanmış, etki kuvvetleri altında davranışları matematiksel formülasyonlar ile tanımlanmış basit elemanlara bölünür (Şekil 5) [IFEM Notları, 2012].

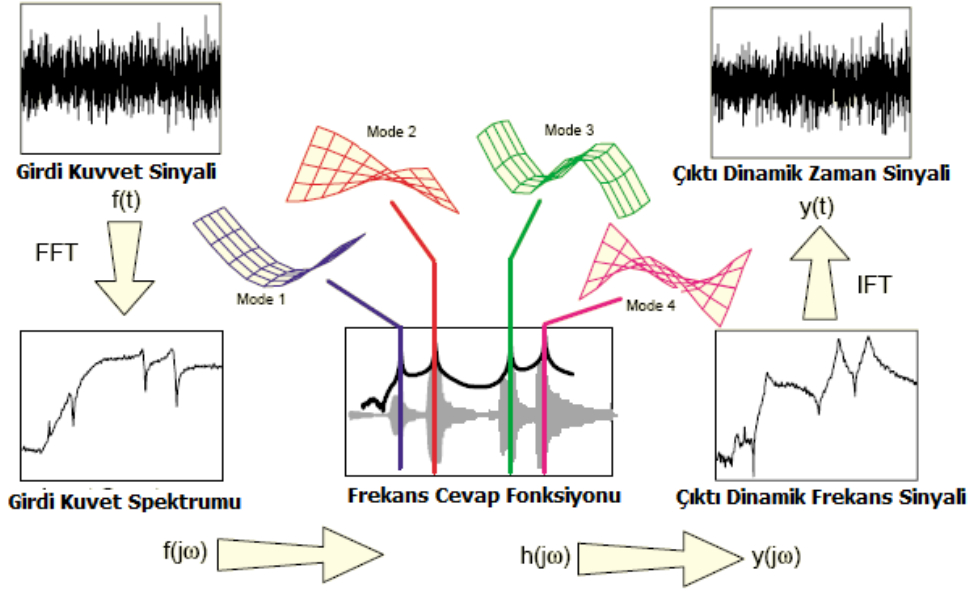
Sayısal analiz yöntemleri ile gerçekleştirilen dinamik analizler modal analiz, frekans cevap analizi ve modal dinamik analizleri başlıkları halinde incelenmektedir. Modal analizlerde yapıya ait katılık matrisi $[K]$, kütle matrisi, $[M]$ ve sönümlenme matrisi $[C]$ parametreleri kullanılarak doğal frekans, salınım şekilleri hesaplanmaktadır. Harmonik cevap analizlerinde yapının birim 1g lik frekansa bağlı tahrik edilmesi sureti ile frekans cevap fonksiyonu ve kritik salınım frekansları elde edilebilmektedir. Modal dinamik analizlerde ise yapının sahip olduğu ve hesaplamalara dahil edilen kritik doğal frekans ve salınım şekilleri , yapının dinamik yükler altındaki cevabının hesaplanmasında kullanılmaktadır.



Şekil 5: Sonlu elemanlar ve örnek bir devre kartı çözüm ağı modeli

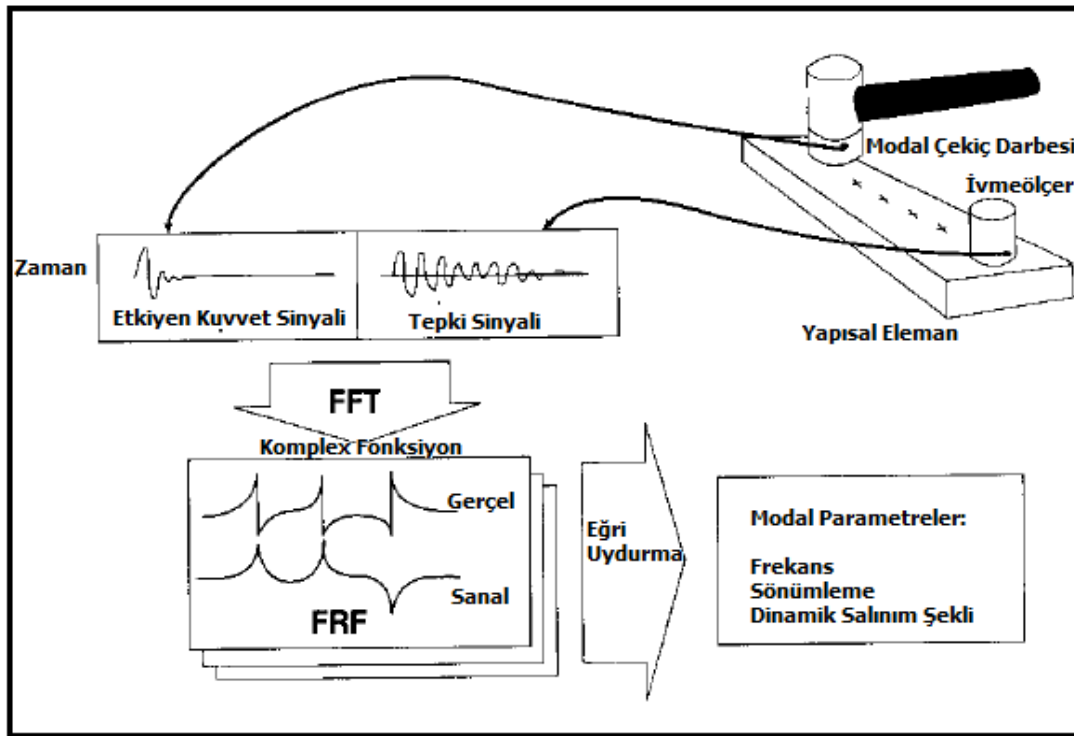
Deneysel Yöntem

Yapılar etkiyen dinamik kuvvetler ve bağlantı şeklini belirleyen sınır koşulları altında belirli frekanslara sahip modal salınımların toplamı şeklinde hareket ederek titreşirler. Etki dinamik kuvvetlerine karşılık tepki kuvvet sinyalleri arasında bir ilişki vardır ve frekans cevap fonksiyonu şeklinde tanımlanır. Modal salınım frekansları bu transfer fonksiyonunun tepe noktalarıdır. Deneysel sinus tarama dinamik yüklemesi ile elde edilebilmektedir (Şekil 6). Bu salınım şekilleri özellikle rezonans durumunda daha da belirginleşir [Avitabile, P.,2001]. Yapıların hasar görmesinin sebebi bu salınım şekillerinin kritik bölgelerde yüksek gerilme ve gerinme yaratacak genlikte olmasıdır.



Şekil 6 Dinamik etki - tepki şeması

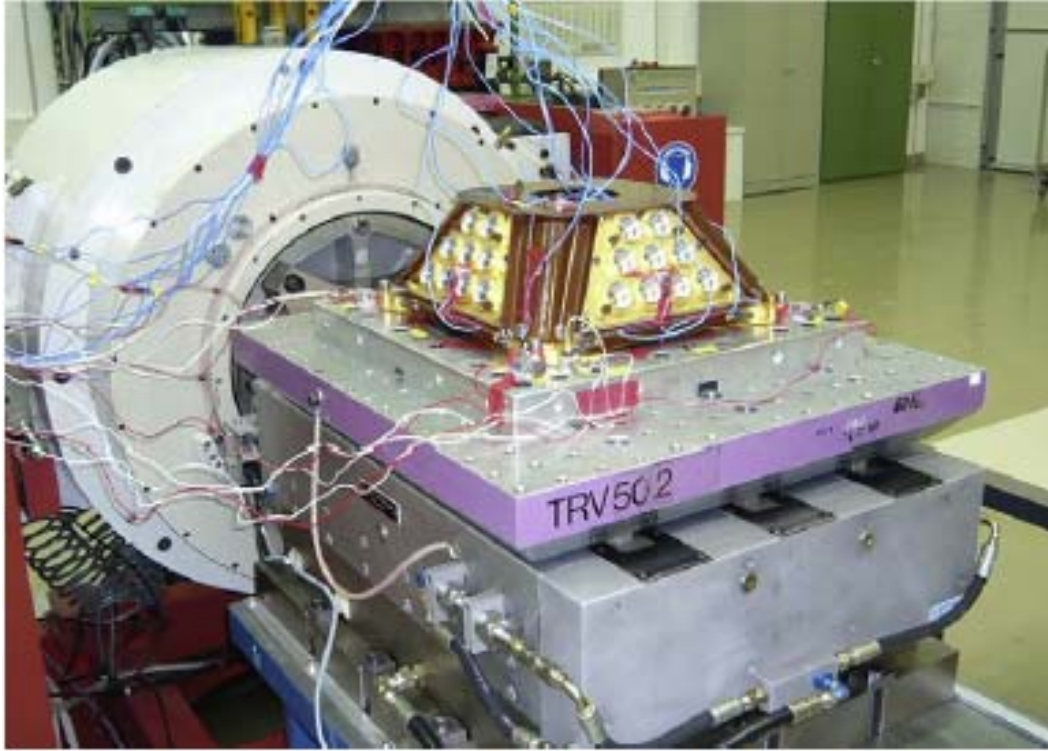
Deneysel modal analiz sayısal modal analizlere paralel olarak tasarımlara ait prototip yapıların kontrollü ortamda deneysel olarak, modal çekiç veya sarsıcı kullanılarak tahrik edilmesi ve ivmeölçerler vasıtasıyla dinamik sinyal ölçümü suretiyle gerçekleştirilen teste dayalı analiz yöntemidir. Bu yöntem ile yapıların dinamik cevabı ve sahip olduğu modal salınım şekilleri, doğal frekanslar, sönümlenme parametreleri gibi dinamik parametreler daha gerçekçi elde edilebilmektedir. [Ewins,D.J.,2000], (Şekil 7) [Schwarz,B.J., Richardson,M.H.,1999].



Şekil 7 Deneysel modal analiz yöntemi

Elde edilen doğal frekans ve salınım şekilleri tasarımların maruz kaldığı titreşim tahrik frekans içeriği ile karşılaştırılarak görev esnasında yüksek genlikli dinamik cevaplara sebebiyet veren rezonans durumlarının varlığı araştırılır ve varsa tasarım değişikli, titreşim sönümlenme vb gibi önlemler alınır [Çelik, 2004].

DeneySEL yöntemler aynı zamanda tasarıma ait üretilen prototipler üzerinde gerçek fiziksel koşullarda veya laboratuvar ortamında benzetildiği şekli ile benzer yükler altında, uygun kuvvet, basınç, sıcaklık algılayıcıları ve veri toplama sistemlerinin kullanılması sureti ile ölçümlere dayalı gerçekleştirilen, tasarıma ait üretim hatalarının ve zayıf bölgelerin ve dinamik davranışının daha gerçekçi belirlenmesine olanak sağlayan bir yöntemdir. Özellikle uydu sistemleri gereksinimlerinin en önemli adımlarından biri prototiplerin tanımlanmış olan dinamik yük testlerinden geçmesidir. Prototip, sarsıcı düzleminde 3 eksende zorlu titreşime ve şok yüklerine maruz bırakılmakta, sensörler, ivmeölçerler kullanılarak yapı üzerinde meydana gelen etkilerin kabul edilir seviyelerde olup olmadığı kontrol edilmektedir (Şekil 8) [Scharlemann, C.,2011].



Şekil 8: Sarsıcı titreşim testi

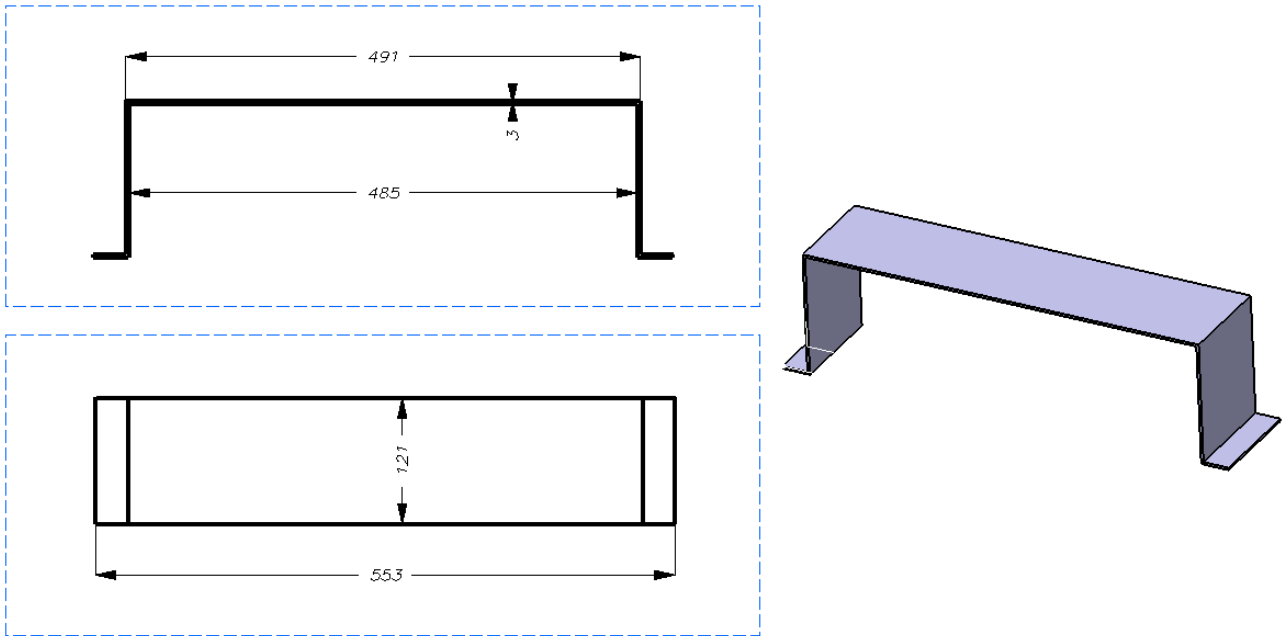
Hava, uzay platformlarında özellikle yüksek mukavemet ve düşük ağırlık gereksinimleri mevcuttur. Bu sebeple daha ince metalik ve kompozit hafif tasarım alternatifleri avantaj sağlamaktadır. Buna karşın bu tür yapıların titreşim, şok vb. gibi dinamik yükler altında en çabuk ve şiddetle etkilenen yapısal eleman olmaları sebebiyle dinamik yükler altındaki davranışlarının doğru belirlenmesi ve uygun tasarım faaliyetleri ile kontrol altında tutulması, tasarımın gerçek fiziksel koşullarda maruz kalacağı yükler altında görevini istendiği şekli ile yerine getirmesi açısından önem arz etmektedir.

Tasarım geliştirme faaliyetleri kapsamında sonlu elemanlar yöntemi deneysel yöntemlere göre daha hızlı ve düşük maliyetli çözümler sunduğu için yaygın olarak

kullanılmaktadır. Bu çalışmada örnek büküm alüminyum bir plakanın, rastsal titreşim ve şok yükleri altında gösterdiği dinamik davranışının, bilgisayar destekli sayısal sonlu elemanlar benzetim çözümü ve deneysel test yöntemi kullanılarak irdelenmesi, her iki yöntem sonuçlarının karşılaştırılarak tasarım süreçlerinde kullanılmak üzere tasarımın uygunluğunun değerlendirilmesine yönelik en pratik, doğru, güvenilir, etkin bir çözüm yönteminin geliştirilmesi hedeflenmiştir. MIL-STD-810 F askeri standardında verilmiş olan rastsal titreşim, dinamik şok yükleri, ABAQUS 6.11[®] sonlu elemanlar yazılımında ve çevresel koşul laboratuvarında prototip büküm plaka üzerine uygulanarak yapısal dinamik cevaplar karşılaştırılmıştır. Şok yükleri, farklı iki formatta, zaman düzleminde ve frekans düzleminde, literatürde kabul gören uygun SRS formu kullanılarak uygulanmış ve her iki uygulama şekli ayrıca karşılaştırılmıştır.

YÖNTEM

İnce büküm alüminyum bir parçanın bilgisayar ortamında CAD modeli oluşturulmuştur (Şekil 9). Ardından ABAQUS 6.11[®] yazılımı kullanılarak sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş, malzeme özellikleri, sınır şartları tanımlandıktan sonra yapıya ait doğal frekans ve salınım şekillerini bulmak amacı ile sırasıyla, dinamik modal analiz ve frekans tepki fonksiyonu elde etmek amacı ile frekans cevap analizi, sonrasında tanımlanan titreşim ve şok yükleri altındaki dinamik cevabını bulmak amacı ile rastsal titreşim ve anlık dinamik (modal) analizleri gerçekleştirilmiştir. Paralel olarak yapıya ait bir prototip üretilerek benzer yüklemeler laboratuvar ortamında sarsıcı kullanılarak tekrar edilmiş ve ivmeölçerler kullanılarak dinamik cevaplar belirli noktalar için kayıt altına alınmıştır. Veri işleme prosedürlerinin ardından elde edilen tüm test verileri sayısal sonlu elemanlar analiz ile elde edilmiş olan veriler ile karşılaştırılmıştır.

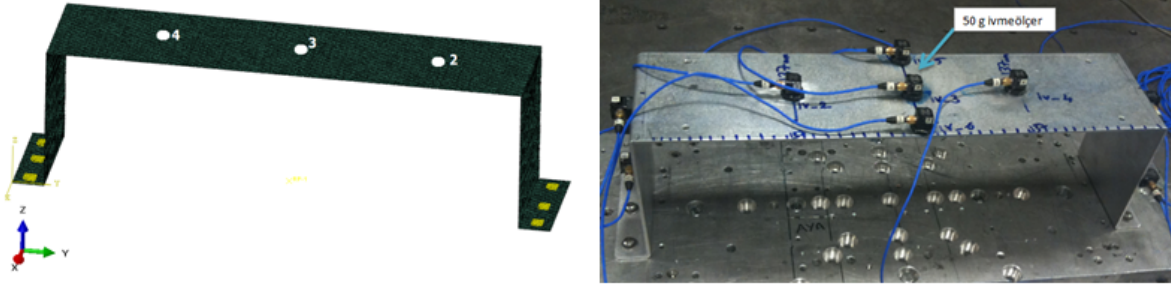


Şekil 9: Test Modeli

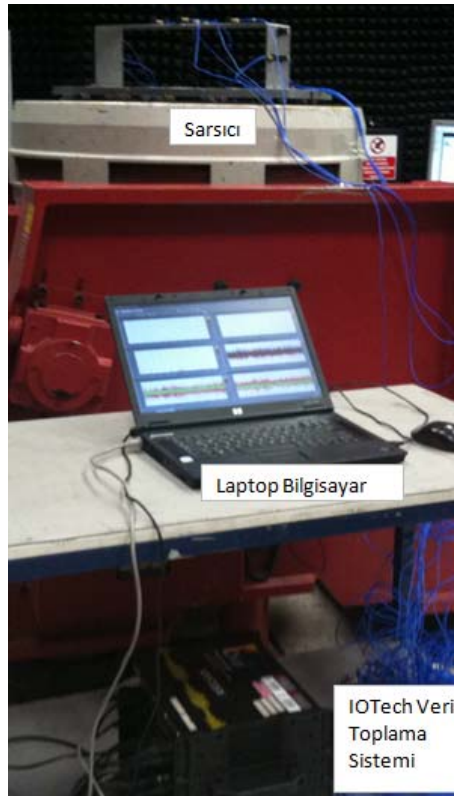
UYGULAMALAR

Sayısal ve Deneysel Yöntem

Büküm alüminyum parçaya ait geometrik model bilgisi ABAQUS 6.11 sayısal analiz ortamına aktarılmıştır. Yapı, ince cidarlı olduğundan kabuk teorisine uygun doğrusal quad, S4R tipi elemanlar ile örülmüştür. Yapı alt büküm yüzeyinden sağdan 3 adet, soldan 3 adet olmak üzere toplam 6 noktadan yine tüm hareket ve dönel serbestlik derecelerinden sabitlenerek referans rigid-body noktasına tutturulmuştur. Yapı üzerinde dinamik cevapların alınacağı bazı noktalar belirlenmiştir (Şekil 10). Bu noktalardan dinamik cevap analizlerinde frekansa bağlı sayısal veriler rapor edilerek sarsıcı üzerinde de benzer sınır koşulları altında 50 g kapasiteli ivmeölçerler ve IOTech® veri toplama sistemi kullanılarak Z eksenine titreşim, şok testleri sonucu elde edilen veriler ile karşılaştırılmıştır (Şekil 11).



Şekil 10: Sayısal sonlu elemanlar ve prototip model

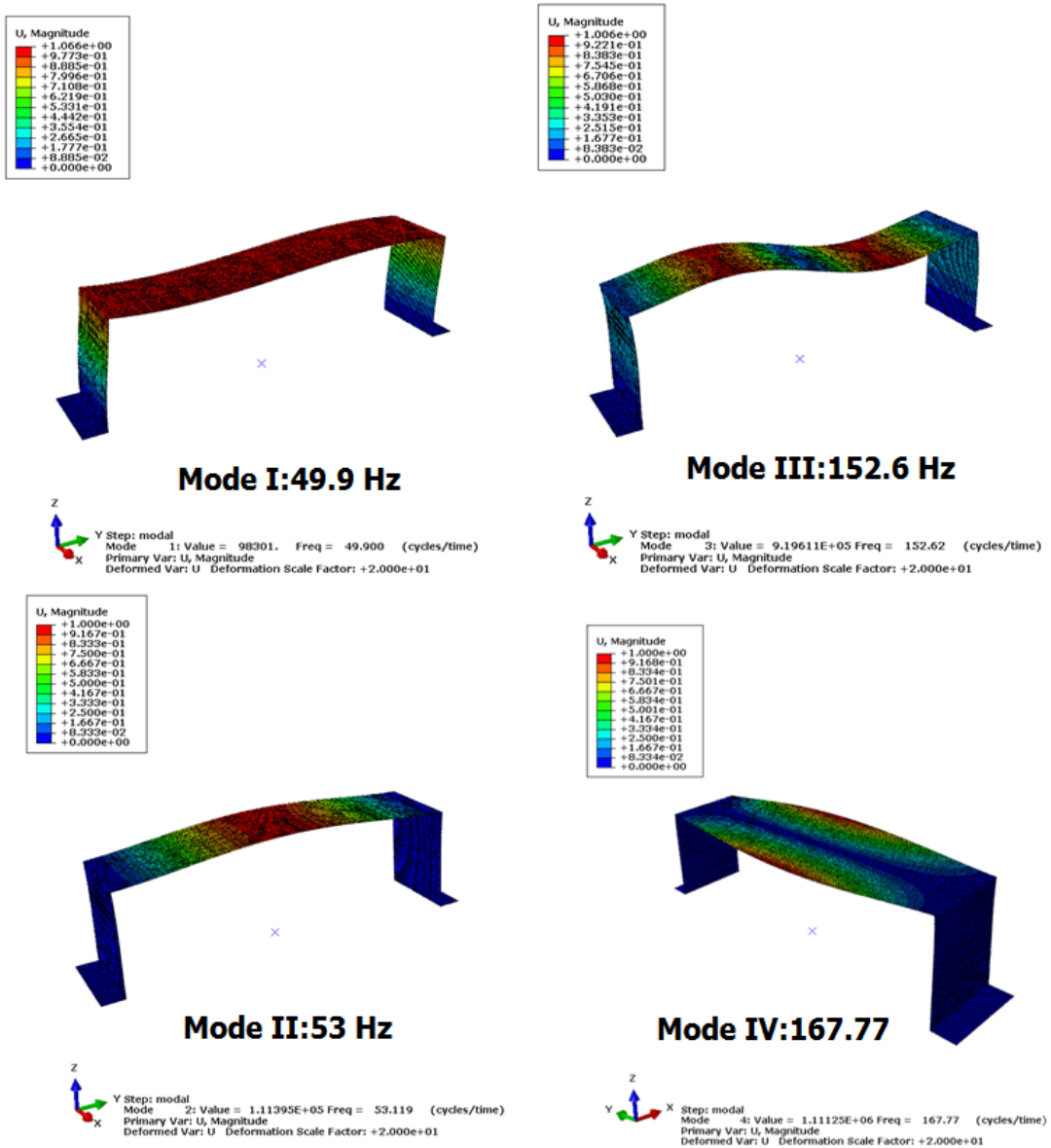


Şekil 11: Z Dikey eksenine titreşim testi

Tüm sayısal analizler ve deneyler aşağıdaki başlıklar altında incelenmiştir:

- Modal analiz,
- Frekans cevap analizi,
- Rastsal titreşim (PSD: power spectral density) analizi,
- Anlık dinamik (şok) analizleri,
- Frekans tabanlı şok (SRS: Shock Response Spectrum)

Sayısal modal analiz ve frekans cevap analizleri yapının doğal frekans, modal salınım şekilleri ve transfer tepki fonksiyonunu bulmak amacı ile gerçekleştirilmiş olup yapıya ait doğal frekanslar ve salınım şekilleri listelenmiştir (Şekil 12).

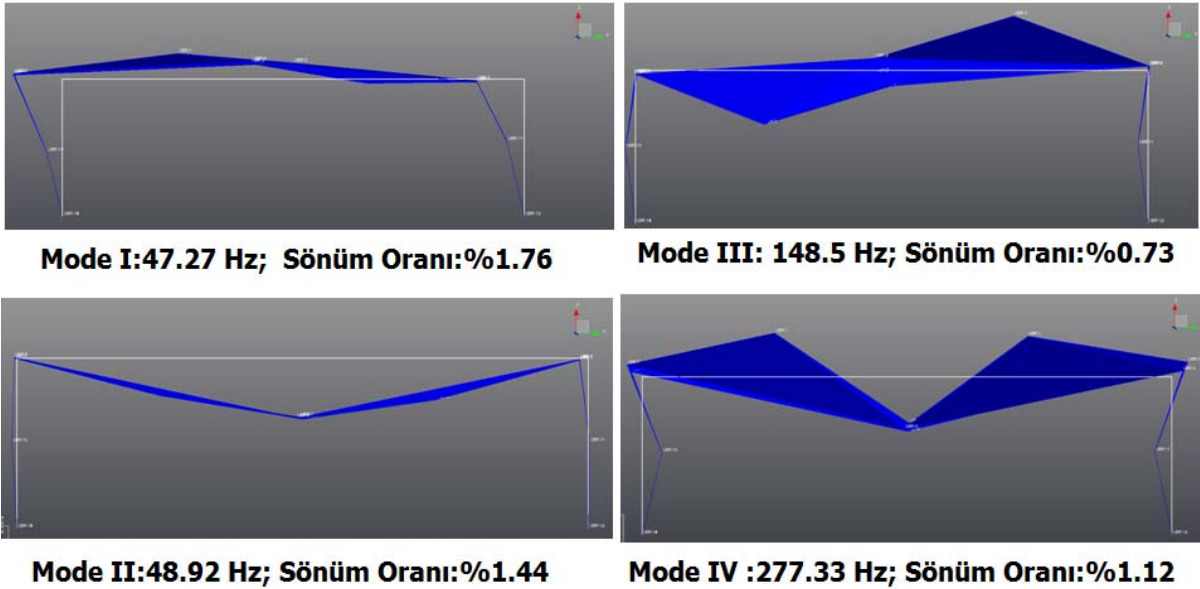


Şekil 12: Doğal frekans ve salınım şekilleri

Deneysel modal analiz ile modele ait gerçek sönümlenme oranlarının elde edilmesi amaçlanmıştır. Ön eleme frekans cevap analizlerinde sönümlenme oranının genlikleri etkilediği görülmüştür. Modal çekiç ile tahrik edilen yapıya ait doğal frekans, doğal salınım ve sönümlenme parametreleri LMS Test Lab® yazılımı kullanılarak elde edilen verilerin sentezlenmesi ile elde edilmiş ve sayısal sonuçlar ile karşılaştırılmıştır (Tablo 2) , (Şekil 13).

Tablo 2. Deneysel Modal Frekans Değerleri

Mod#	Doğal Frekans Sayısal [Hz]	Doğal Frekans Deneysel [Hz]	Sönüm Oranı(%)	%Fark
Mod I	49.90	47.27	1.76	5.56
Mod II	53.00	48.92	1.44	8.34
Mod III	152.60	148.50	0.73	2.76
Mod IV	167.77	277.34	1.12	39.51



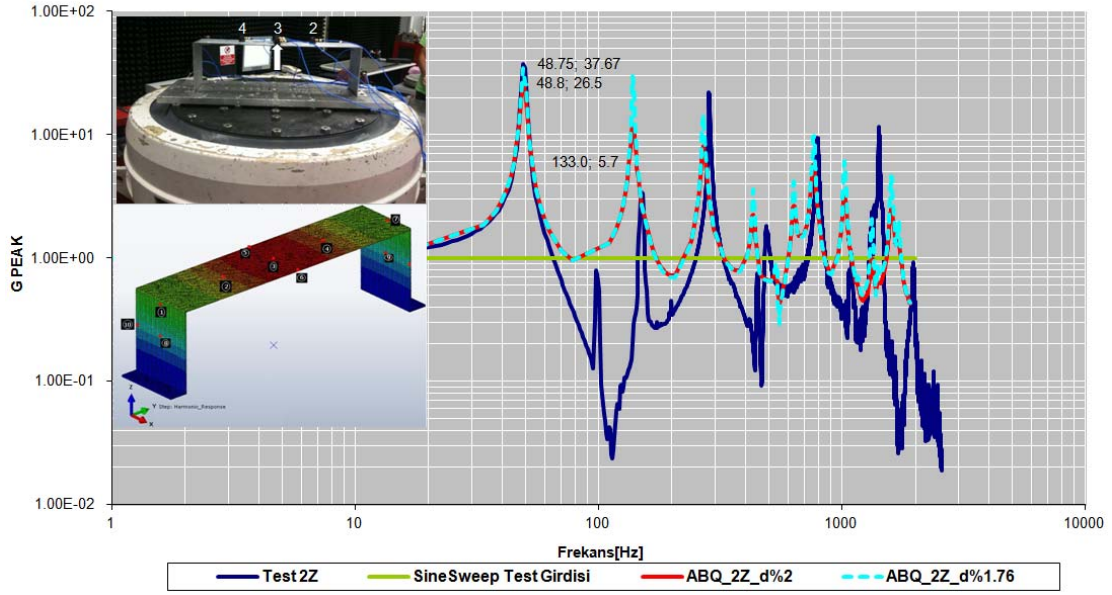
Şekil 13: Deneysel modal analiz sonuçları

Sayısal ve deneysel modal analizler karşılaştırıldığında 4. modal salınım ve frekans değeri hariç hesaplanan sayısal frekans ve modal salınımların gerçekçi değerlere yakın olduğu görülmüştür. Deneysel olarak elde edilen sönümlenme oranları incelendiğinde genel itibarı ile tüm frekans bandı için %2 sönüm oranı kabulü ile sayısal analizler gerçekleştirilmiştir.

Yapının üst bölgesinde yer alan 2, 3 ve 4 nolu bölgeler Z dikey ekseninde gerçekleştirilecek sayısal analiz ve test verilerinin karşılaştırılması için uygun veri noktaları olarak seçilmiştir.

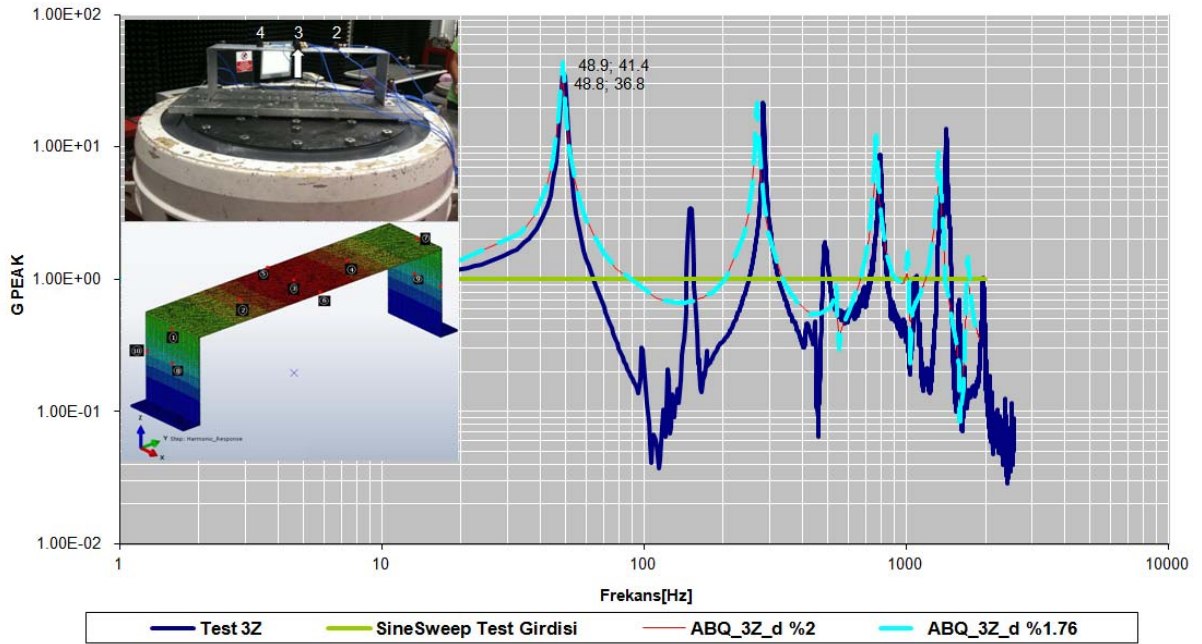
Frekans cevap analizi ve titreşim testleri gerçekleştirilerek 5-2000 Hz aralığında sayısal olarak 1g'lik yükleme sonucu elde edilen frekans cevaplar yine sarsıcı üzerinde uygulanan, 2 octave/min tarama hızı ile gerçekleştirilen rezonans tarama testi sonrasında elde edilen titreşim test verileri ile karşılaştırılmıştır. 2 nolu bölge için

%1.76 ve %2 sönüm oranları ile elde edilen veriler incelendiğinde yüksek sönümlenme katsayısı ile elde edilen verilerin daha düşük genlikte olduğu ve test verileri ile (Şekil 14) 'deki gibi uyumlu olduğu görülmüştür.



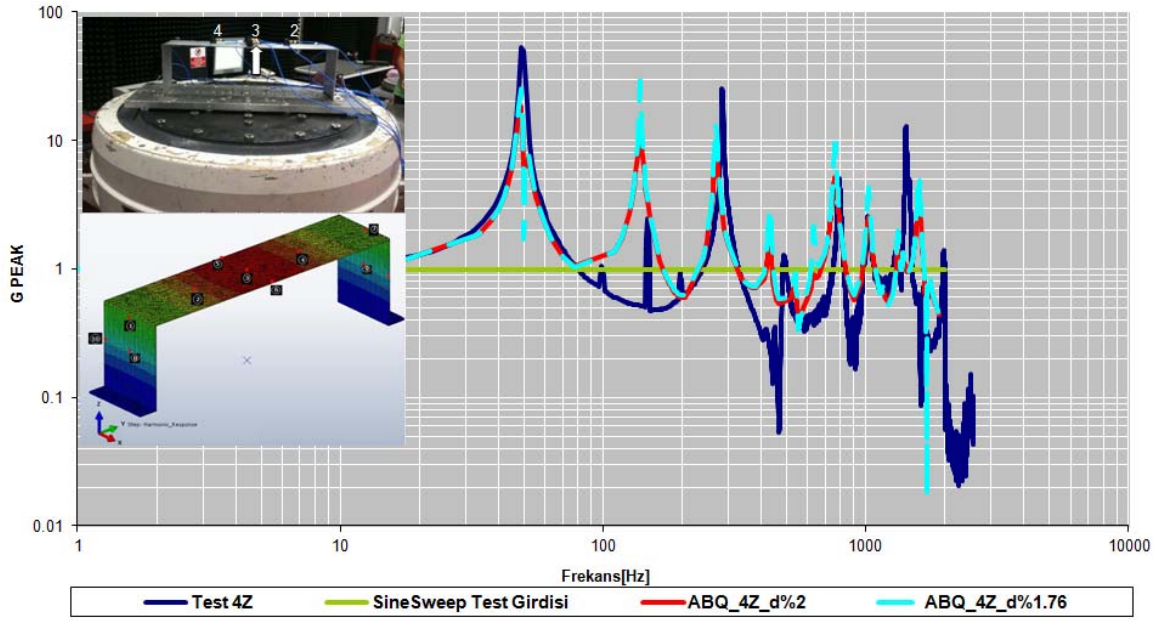
Şekil 14:2 nolu bölge frekans cevap analiz ve test sonuçları

Benzer şekilde 3 nolu bölge için yaklaşık benzer sayısal ve test dinamik cevapları alınmıştır (Şekil 15).



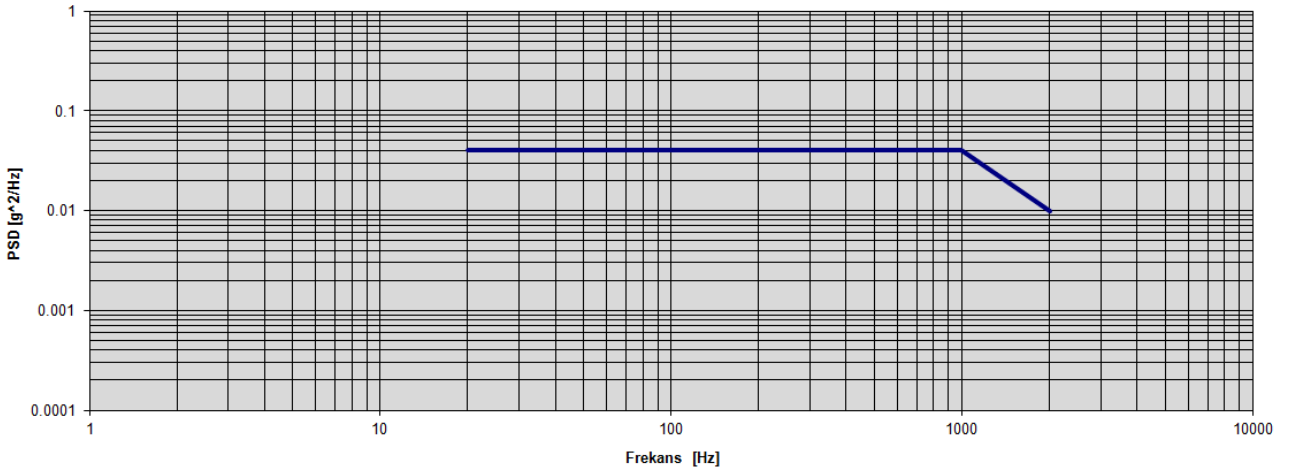
Şekil 15:3 nolu bölge frekans cevap analiz ve test sonuçları

4 nolu bölge için yaklaşık benzer sayısal ve test dinamik cevapları alınmıştır (Şekil 16).



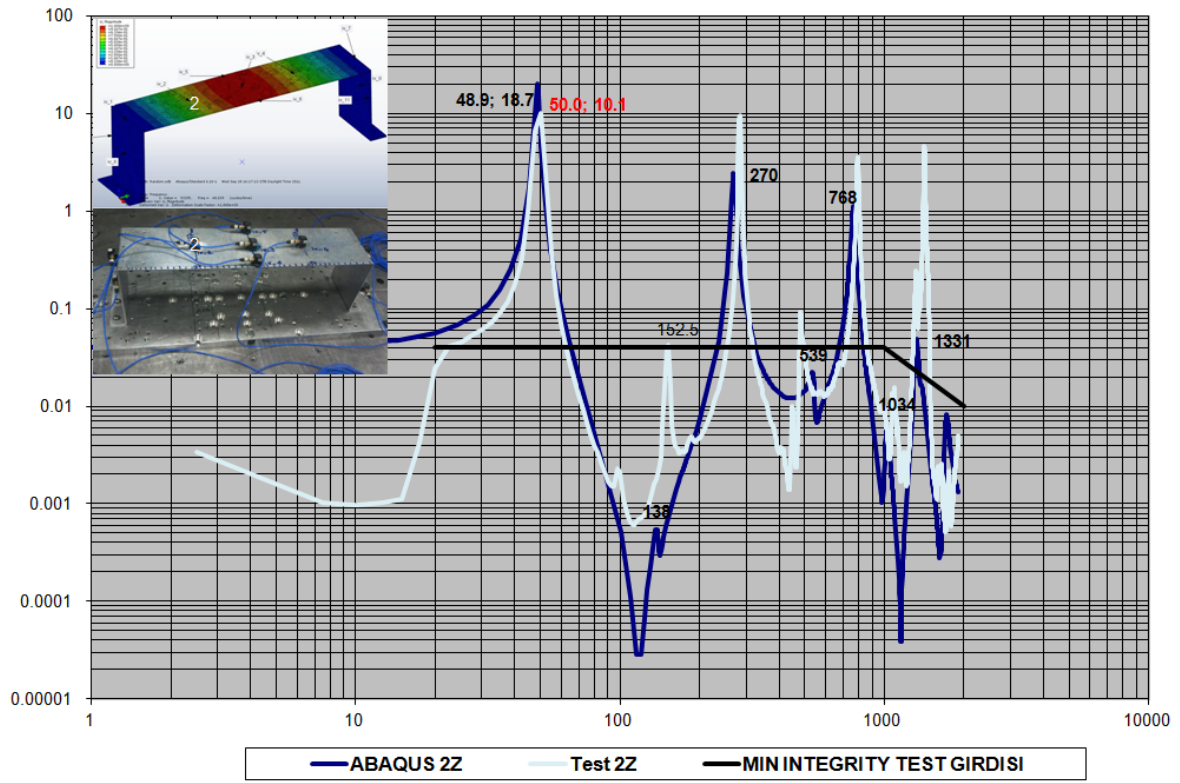
Şekil 16:4 nolu bölge frekans cevap analiz ve test sonuçları

Rastsal titreşim cevap analizi ve test verileri: MIL-STD-810 G standardında tanımlanan ve hava platformlarına entegre sistemlerin testleri için önerilen "Minimum Integrity Test" profili (Şekil 17) kullanılmış ve gerek sayısal ortamda ve gerekse de sarsıcı üzerinde deneysel olarak yapıya uygulanmıştır.



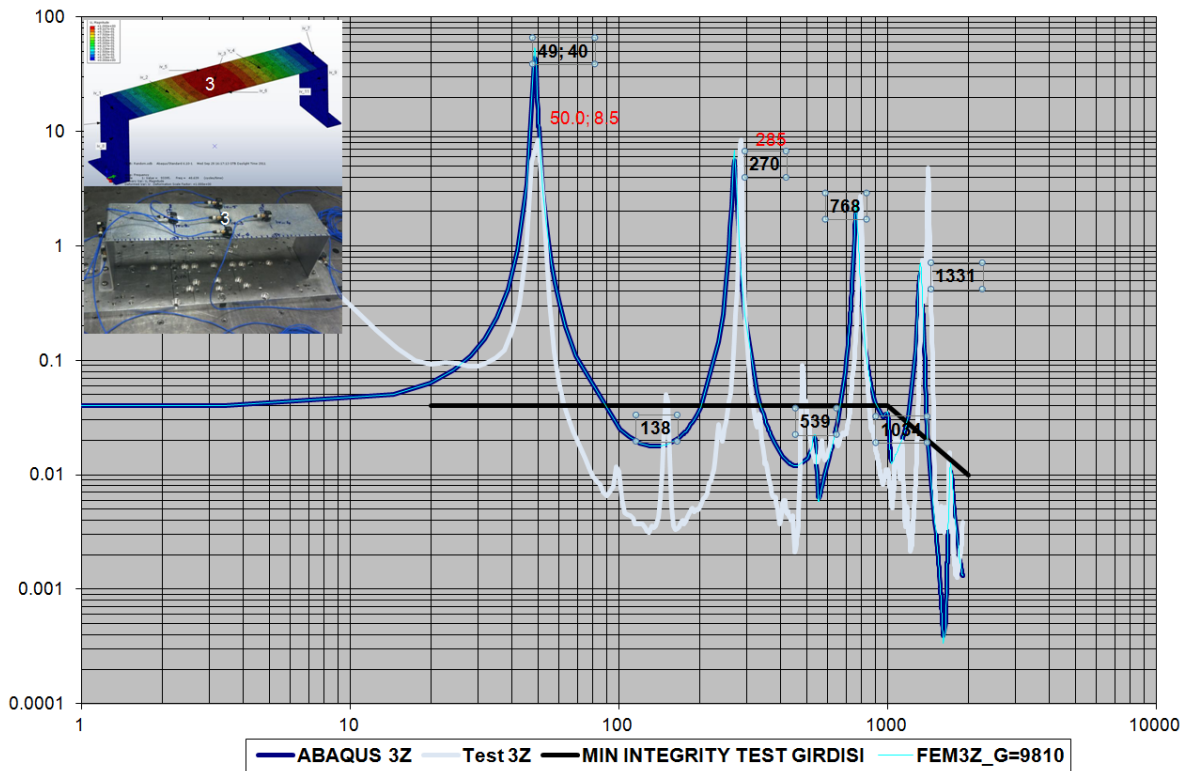
Şekil 17: MIL-STD-810 G Minimum Integrity PSD profili

2 nolu bölge için %1.76 ve %2 sönüm oranları ile elde edilen verilerin benzer genlik ve karakteristikte olduğu ve test verileri ile (Şekil 18) 'deki gibi uyumlu olduğu görülmüştür.



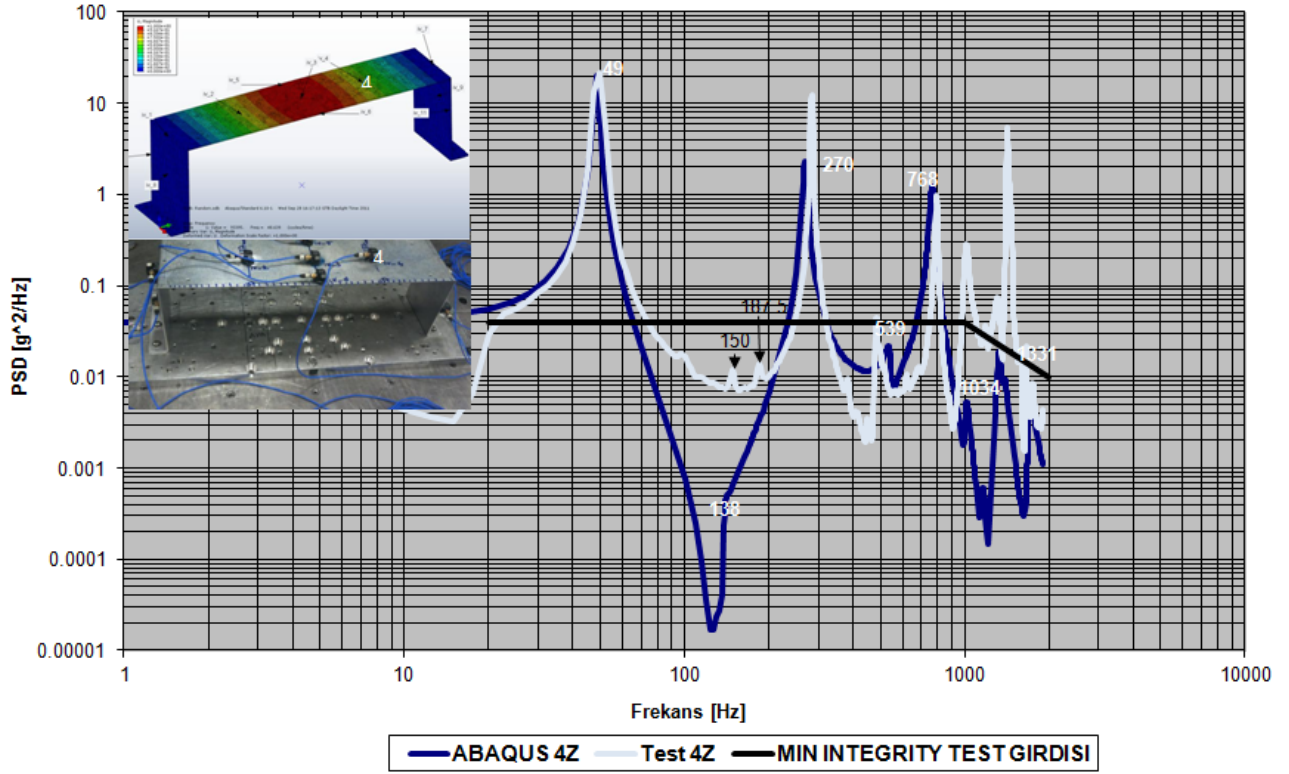
Şekil 18:2 nolu bölge rastsal titreşim cevap analiz ve test sonuçları

Benzer şekilde 3 nolu bölge için nispeten güvenli tarafta kalacak şekilde yaklaşık benzer sayısal ve test dinamik cevapları alınmıştır (Şekil 19).



Şekil 19:3 nolu bölge rastsal titreşim cevap analiz ve test sonuçları

4 nolu bölge için nispeten güvenli tarafta kalacak şekilde yaklaşık benzer sayısal ve test dinamik cevapları alınmıştır (Şekil 20).



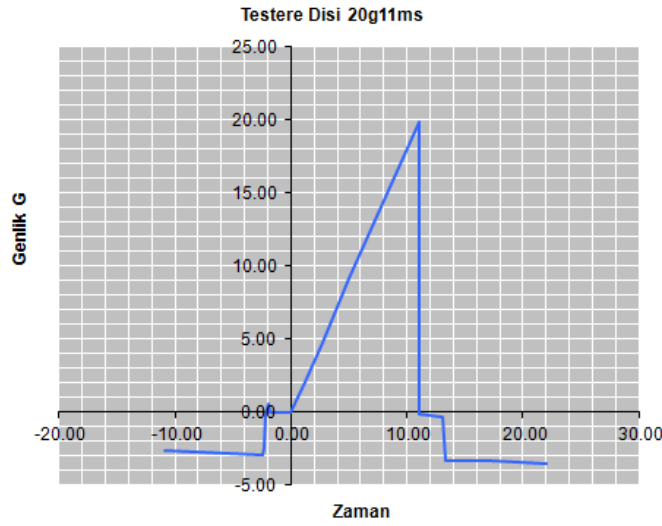
Şekil 20:4 nolu bölge rastsal titreşim cevap analiz ve test sonuçları

Frekans cevap, rastsal titreşim analiz ve test sonuçları incelendiğinde belirlenmiş olan kritik noktlara ait dinamik cevaplar benzer frekanslarda yaklaşık olarak hesaplanabilmektedir. Bazı frekans değerlerinde yer alan farklılıklar ve genlik değerleri gerek sayısal modellemedeki sınır koşullarının tam benzetilememesi, ivmeölçer kütlelerinin sayısal modele dahil edilmemesi, çözüm ağının yetersiz olması vb. gibi hatalar ve yaklaşımlar sebebi ile olduğu düşünülmektedir.

Dinamik Şok Analizleri

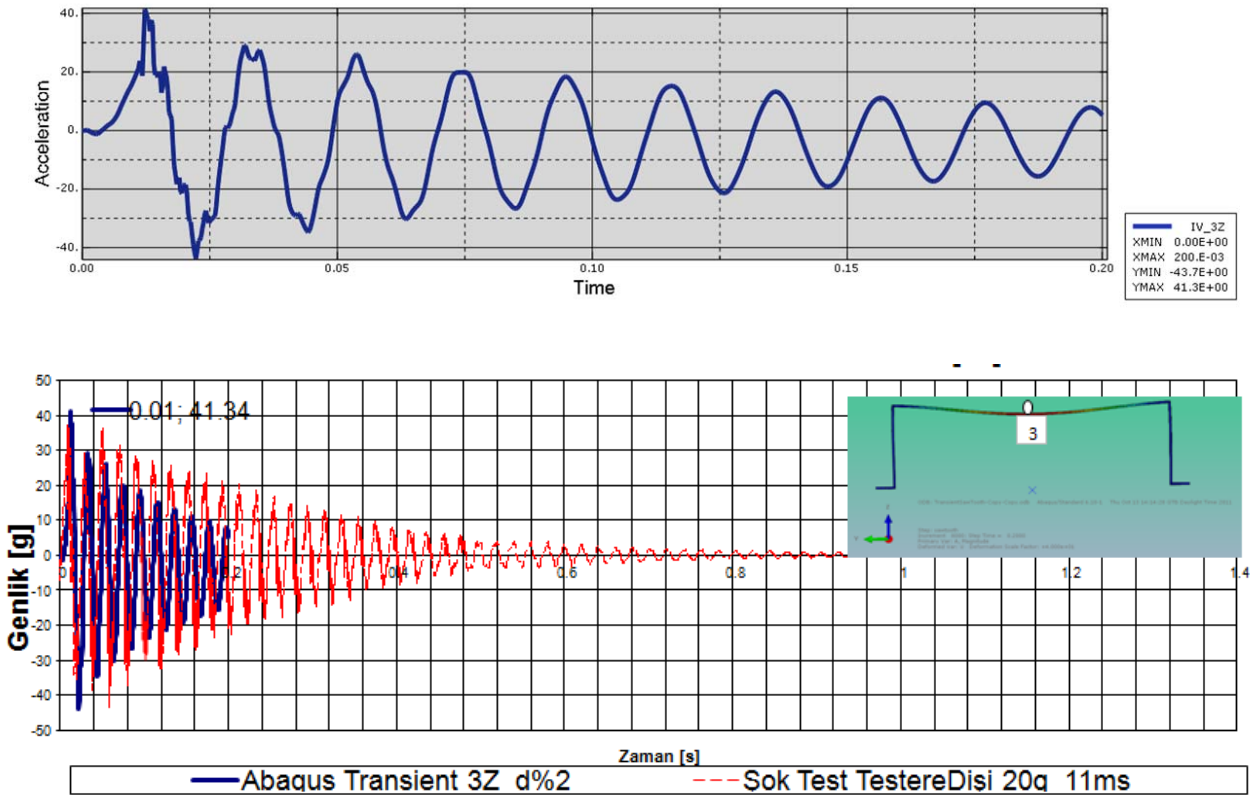
Dinamik şok analizleri iki farklı yöntem kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Birinci yaklaşımda standart şok profili (Şekil 21) zaman düzleminde yapıya aktarılarak yapının dinamik cevabı hesaplanmıştır. Literatürde bir diğer yaklaşım yöntemi frekans düzleminde SRS şok formu kullanımınıdır [William,K.,1998].İkinci adımda sayısal analiz ortamında dinamik şok 20g,11ms testere dışı formuna ait SRS formu (Şekil 23) uygulanmıştır. Zaman düzlemindeki şok profilinin frekans düzlemine aktarılması nCode Glyphworks® veri işleme yazılımı ile gerçekleştirilmiştir.

Zaman düzleminde dinamik şok cevap analizi ve şok testi MIL-STD-810 G standardında tanımlanan farklı şok benzetim profillerinden 20g11ms testere dışı formundaki profil kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sayısal dinamik analizlerde, sisteme ait cevap, modal şekillerin doğrusal toplamını kullanarak hesaplayan modal dinamik yöntem kullanılarak elde edilmiştir.Paralelde benzer şok yükü laboratuvar ortamında sarsıcı kullanılarak prototip büküm plağa uygulanmıştır.



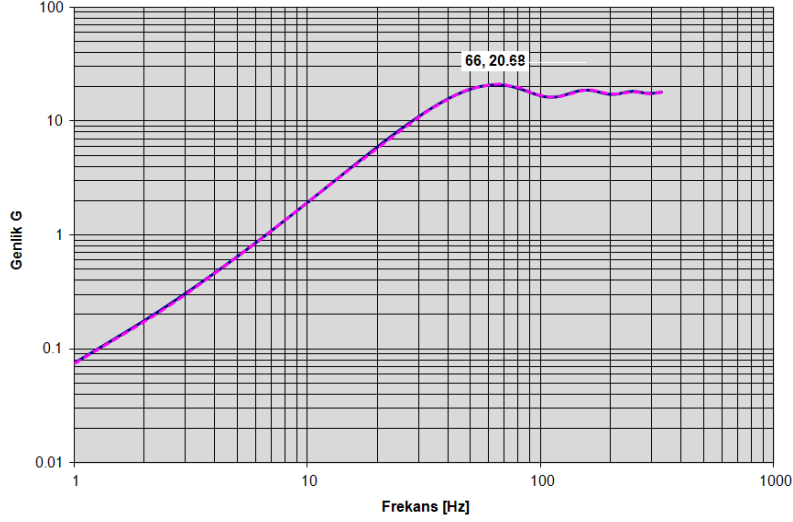
Şekil 21: MIL-STD-810 G Testere dişi şok profili

Z ekseninde zaman düzleminde gerçekleştirilen ve standart testere dişi 20g,11 ms'lik dinamik yükleme sonucunda yapının orta noktasından sayısal dinamik ivme cevabı okunmuş ve benzer şekilde deneysel olarak aynı noktadan ölçülen ivme ölçer verisi ile karşılaştırılmıştır. %2 sönümlenme parametresi ile gerçekleştirilen sayısal çözüm, şok tepki genliğini yaklaşık 41.3g olarak doğru tahmin etmiş ancak beklendiği gibi sayısal analiz ortamında nispeten yüksek sönüm oranının kullanımı sonucu, ivme-zaman verisi incelendiğinde sayısal çözümün daha erken sönümlendiği görülebilmektedir. (Şekil 22).



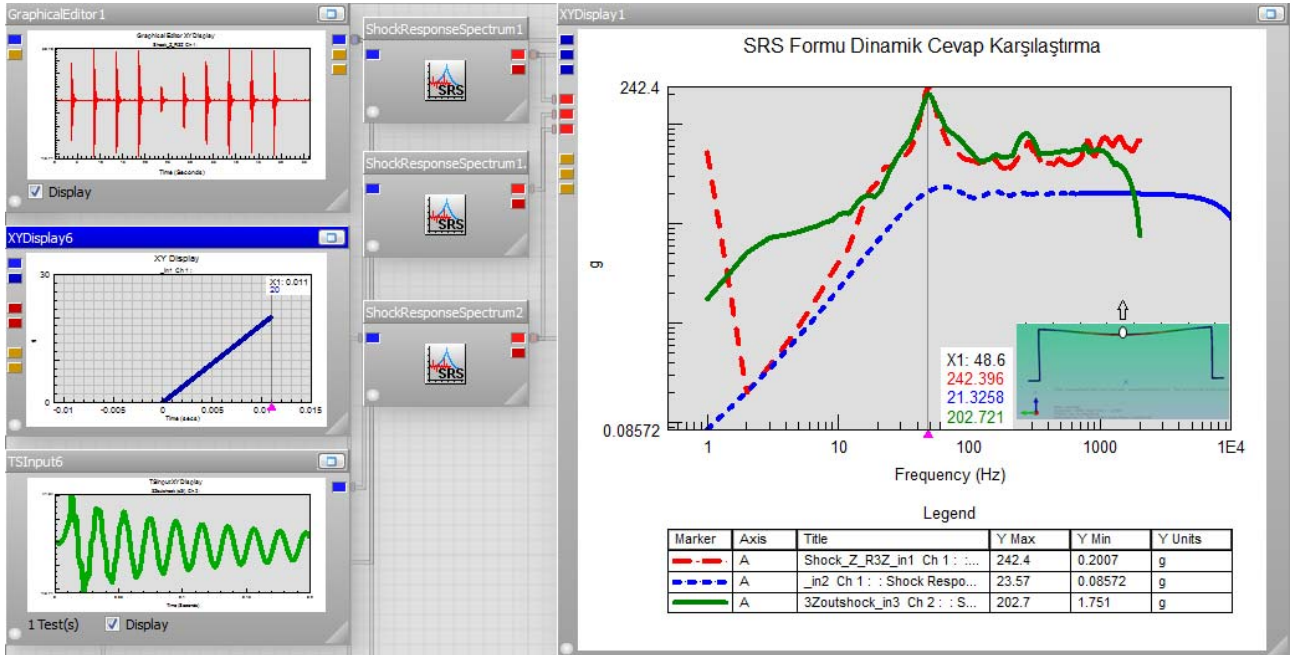
Şekil 22:3 nolu bölge dinamik şok cevabı sonuçları

Frekans düzleminde dinamik şok cevap analizi ve testi ile yine MIL-STD-810 G standardında tanımlanan farklı şok benzetim profillerinden zaman düzlemindeki 20g,11ms testere dişi formundaki profil nCode Glyphworks® veri işleme yazılımı kullanılarak frekans düzleminde tanımlı SRS formuna dönüştürülmüş ve yapıya uygulanmıştır (Şekil 23).



Şekil 23: 20g, 11ms testere dişi SRS şok profili

Elde edilen SRS şok spektrum eğrisi gerek sayısal analizlerde gerekse de deneysel sarsıcı testlerinde benzer şekilde kullanılmıştır. Yapının orta bölgesindeki 3 nolu noktanın zaman düzlemindeki dinamik cevabı frekans düzlemine aktarılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır (Şekil 24).



Şekil 24: 3 nolu bölge dinamik SRS şok cevabı sonuçları

3 nolu bölgeye ait dinamik cevaplar frekans düzleminde karşılaştırılmıştır (Şekil 23). Grafik incelendiğinde sayısal analiz sonuçlarının (yeşil), deneysel testler ile elde edilen dinamik cevap sonuçları (kırmızı) ile benzer karakteristikte ve özellikle 48.6Hz modal frekans değerinde en tepe noktasına ulaştığı görülmektedir. Bu frekansta sayısal sonuç 202.7g, deneysel sonuç 242 g olarak hesaplanmış olup sonuçlardaki farklılığın sönümlenme oranının sayısal ortamda nispeten yüksek kullanılmasından kaynaklandığı anlaşılmaktadır.

SONUÇ

Bu çalışmada titreşim ve şok yükleri altında tasarımlar üzerinde oluşan etkilerin sayısal ve deneysel olarak irdelenmesi, elde edilmesi ve sayısal analiz yönteminin konsept tasarım dinamik davranış tahminleri için en pratik çözüm yolu olarak kullanılması amaç edinilmiş olup yöntemin deneysel çalışma ile doğruluğu belirli kıstaslar altında sağlanmıştır. Yapıya ait sönümlenme parametresinin genlikleri etkilediği görülmüştür. Deneysel modal testler her salınım frekansının farklı sönümlenme katsayısına sahip olduğunu göstermiştir. Sayısal analizlerde bu değerlerin altında veya üstünde ve sabit sönüm oranının kullanımı sonucunda salınım frekanslarında daha düşük veya yüksek genlikteki dinamik cevaplar elde edilmiş, bu sonuç özellikle SRS analiz çıktılarında belirgin olmuştur. Testlerde %1.76 sönümlenme katsayısı yerine sayısal ortamda %2 sönümlenme katsayısı kullanmak yapının sayısal ortamda daha erken sönümlenmesine ve de düşük genlikte veriler alınmasına sebep olmuştur. Ayrıca sayısal modelin uygun eleman tipi ile oluşturulması, sınır koşulu ve yeterli modun hesaba katılmasının sonuçları etkilediği ve de testler sırasında yeterli sayıda ivmeölçerin yapı üzerinde doğru yerde kullanımının yapıların dinamik salınım şekillerinin ve dolayısı ile de frekanslarının daha net bir şekilde elde edileceği sonucu elde edilmiştir. Kontrollü ve doğru sonuçların elde edilmesi gerçekleştirilen analizlere olan güveni artırmanın yanında tasarım-analiz arasındaki döngüyü minimize etmekte ve doğru tasarım değişikliklerinin hangi bölgede yapılması konusunda ışık tutmaktadır. Üretim öncesinde sayısal ortamda dinamik karakteristiğin doğru belirlenmesi, hataların belirlenmesine ve uygun dinamik karakteristiğe sahip ürünün çıktı olarak elde edilmesine zemin hazırlamakta, zaman ve maliyet açısından avantaj kazandırmaktadır.

Bilgilendirme

Bu çalışma ASELSAN, Radar, Elektronik Harp ve İstihbarat Sistemleri (REHİS), Hava Uzay Platformları Entegrasyon Mühendisliği Müdürlüğü tarafından desteklenmiştir. Bu çalışmamıza katkılarından dolayı teşekkürlerimizi sunarız.

Kaynaklar

- Aykan,M., M. Çelik, 2009, "*Vibration Fatigue Analysis and Multiaxial Effect in Testing of Aerospace Structures*", *Mechanical System and Signal Processing*, Vol.23,Issue 3, pp 897-907.
- Avitabile,P.,2001, "*Experimental Modal Analysis, A Simple Non-Mathematical Presentation*", *Sound and Vibration*.
- Bathe,K.J.1996,"*Finite Element Procedures In Engineering Analysis*",Prentice-Hall
- Calvi,Adriano,2011,Spacecraft Load Analysis, An Overview, University of Liege Satellite Engineering Class Lecture Notes.
- Çelik, M.,2004, "Operational Vibration Analysis of Naval Platforms for System Integration", NATO-RTO, Applied Vehicle Technology Panel-110, Prag, Czech Republic.
- Çelik, M., 2010, "*Numerical Vibration Analysis of a SAR Antenna*", *2010 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and CNC/USNC/URSI Radio Science Meeting,Toronto, Canada*.
- Çelik,M.,Genç,C.,Sun,E.2010," *Helikopter Kuyruk Bölgesi Entegrasyon Yapısal Analizleri*, UHUK-2010-107.
- Çelik,M.,2003 "*Mekanik Şok ve Titreşim Tasarım Kılavuzu*", MST-MTM Aselsan
- Do,T., Perl,E., Peterson,A., Welch,J.,2005, " *Environmental Testing for Launch and Space Vehicles*"
- Ewins, D.J.,2000, *Modal Testing*, 2nd Edition, Research Studies Press Ltd, Baldock
- Harris,M.,Piersol,A.G,2002, *Shock and Vibration Handbook* The McGraw-Hill Companies,5th edition.
- Irvine,T,2009, "An introduction to Shock Response Spektrum",Revision Q
- MIL-STD-810G, 2008, *Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests*, Department of Defense Test Method Standard, USA.
- Mahendran, Mahen, 2007, "*Applications of finite element analysis in structural engineering*" In Siva Prasad, N. and Sekar, A.S. and Krishnapillai, S., Eds. Proceedings International Conference on Computer Aided Engineering, pages pp. 38-46, Chennai, India
- Schwarz,B.J.,Richardson,M.H.,1999, "Experimental Modal Analysis",Vibrant Tech.Inc.,CSI Reliability Week, Orlando,FL..
- Scharlemann,C.,Buldrini,N.,Killinger,R.,Jentsch,M.,Polli,A.Ceruti,L.,Serafini,L., DiCara, D.,Nicolini,D.,2011"*Qualification test series of the indium needle FEED micro-propulsion system for LISA Pathfinder*".
- Tentechllc,Case Studies, http://www.tentechllc.com/case_studies.html