



**BİR FÜZENİN DİNAMİK KARAKTERİZASYONUNDA ÇOK EKSENLİ
TAHRİK DURUMU İÇİN MODAL DAVRANIŞIN SAYISAL VE
DENEYSEL İNCELENMESİ**

Özgürca YILDIZ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2021

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Özgürca YILDIZ

30/06/2021

BİR FÜZENİN DİNAMİK KARAKTERİZASYONUNDA ÇOK EKSENLİ TAHRİK DURUMU İÇİN MODAL DAVRANIŞIN SAYISAL VE DENEYSEL İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Özgürca YILDIZ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2021

ÖZET

Füze teknolojilerindeki gelişmelerle birlikte yapısal dinamik çalışmalara olan ilgi günden güne artmaktadır. Deneysel modal analiz teorisi havacılık ve uzay alanında yapısal dinamik çalışmaların pek çoğunun temelini oluşturmaktadır. Uçuş boyunca aerodinamik tahrike maruz kalan füzelerin modal testlerinde, doğru girdilerin uygulanabilmesi için tahrik koşullarının en iyi şekilde benzetilmesi önem arz etmektedir. Bu tez kapsamında, modal testler sırasında dinamik karakterizasyonu yapılan test kalemine, tahrikin aynı anda çok eksenli uygulanması senaryosu üzerinde çalışılmıştır. Sonlu elemanlar analizleri ve deneysel modal analizler ile yapının farklı tahrik durumlarındaki dinamik karakterinin tahmin edilmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır. Çalışmada geliştirilen test modellerinde öncelikle basit bir giriş modeli üzerinden deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Sonlu elemanlar analizleri ile yapılan çözümlemeler modal testler ile doğrulanmıştır. Sonrasında uçaktan atılan mühimmat çeşitlerinden olan MK-82 modeli kullanılarak test ve modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Modal davranışın tek eksenli tahrik ve çok eksenli tahrik uygulandığı durumlardaki karşılaştırmaları ortaya konulmuştur. Böylece bir füzenin dinamik karakterizasyonunda çok eksenli tahrik durumu için modal davranışın hem deneysel olarak hem de sayısal modelleme ile ortaya konulması sağlanmıştır. Çoklu eksenli çoklu girdi ile yapılan sarsıcı testlerinde tüm eksenlerdeki eğilmelerin daha belirgin şekilde elde edildiği gözlenmiştir. Tez kapsamında ortaya konan deneysel çalışma literatürde geçen çoklu eksenli tahrik uygulamalarının etkin faydalarını doğrulamaktadır.

Bilim Kodu : 91422

Anahtar Kelimeler : Modal test, modal analiz, dinamik karakterizasyon, çok eksenli titreşim testi, frekans cevap fonksiyonu, mod şekli, çoklu girdi çoklu çıktı testi, füze

Sayfa Adedi : 81

Danışman : Doç. Dr. Tuncay KARAÇAY

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF MODAL BEHAVIOR
WITH MULTI-AXIS EXCITATION IN DYNAMIC CHARACTERIZATION OF A
MISSILE

(M. Sc. Thesis)

Özgürcañ YILDIZ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2021

ABSTRACT

With the rise in missile technologies, interest in structural dynamic studies is increasing day by day. Experimental modal analysis theory forms the basis of most of the structural dynamics studies in the field of aviation and space. In modal tests of missiles that are subjected to aerodynamic effects during flight, it is important to simulate the aerodynamic effects in the best way in order to apply the correct input excitation. Within the scope of this thesis, the scenario of applying the input excitation in multiple axes at the same time to the test item, whose dynamic characterization was performed during modal tests, was studied. Studies have been carried out to estimate the dynamic character of the structure with finite element analysis and experimental modal analysis. In the test models developed in the study, first, experimental studies were carried out on a simple beam model. Analyses made with finite element analysis were verified with modal tests. Afterwards, testing and modeling studies were carried out using the MK-82 model, which is one of the ammunition types thrown from the aircraft wing. Comparisons of modal behavior when single-axis input excitation and multi-axis input excitation are applied are presented. Thus, in the dynamic characterization of a missile, the modal behavior for the multi-axis excitation case has been demonstrated both experimentally and by numerical modeling. It was observed that bending in all axes was obtained more clearly in the shaker tests performed with multiple inputs in multiple axes. The experimental study presented within the scope of the thesis confirms the effective benefits of multi-axis input excitation applications mentioned in the literature.

Science Code : 91422

Key Words : Modal testing, modal analysis, dynamic characterization, multi-axis vibration testing, frequency response function, mode shape, multiple input multiple output testing, missile

Page Number : 81

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Tuncay KARAÇAY

TEŞEKKÜR

Isaac NEWTON'un “Eğer biraz daha uzağı görebildiysem bu, benden önceki devlerin omuzlarından bakabildiğim içindir.” sözünden ilhamla her tökezlediğimde ilerlemem için desteğini esirgemedен omuz veren, kusurlarımı örten ve değerli tecrübelerini aktaran tez hocam Doç. Dr. Tuncay KARAÇAY'a, bana yurt sevgisinin ona hizmetle ölçüldüğünü daima hissettiren, çalışmalarım boyunca bilgisini desteğini esirgemedен yol gösteren değerli hocam, çalışma arkadaşım ve ağabeyim Mümtaz Afşın ESI'ye, çalışma ahengiyle beni adeta bir orkestranın üyesi gibi hissettiren ve birlikte çalışmaktan dolayı kendimi çok şanslı hissettiğim ROKETSAN A.Ş Yapısal Mekanik Birimi'ne, bana sunduğu imkanlardan dolayı ilk işyerim ve yuvam olan ROKETSAN A.Ş'ye ve manevi destekleriyle daima yanımda olan biricik aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	3
3. SİSTEMLERİN DİNAMİK DAVRANIŞI	9
3.1. Sistemlerin Dinamik Modellemesi.....	9
3.2. Modal Analiz Teorisi.....	11
3.3. Deneysel Modal Analizde Sinyal İşleme Teknikleri.....	15
3.4. Modal Test Uygulaması.....	17
3.5. Modal Analizde Modal Parametrelerin Belirlenmesi ve Değerlendirilmesi	18
3.6. Modal Analizde Tahrik Yöntemleri	19
3.6.1. Darbe çekici ile tahrik	19
3.6.2. Modal sarsıcı ile tahrik.....	20
4. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	23
4.1. Kiriş Dinamik Karakterizasyonu.....	23
4.1.1. Kiriş sonlu elemanlar ağ modeli	24

Sayfa

4.1.2. Kiriş serbest sınır koşullarında modal analiz sonuçları	25
4.1.3. Kiriş serbest sınır koşullarında tek eksenle modal frekans cevap analizi.....	27
4.1.4. Kiriş serbest sınır koşullarında iki eksenle modal frekans cevap analizi.....	28
4.1.5. Kiriş yay destekli sınır koşullarında modal analiz sonuçları	29
4.1.6. Kiriş yay destekli sınır koşullarında tek eksenle modal frekans cevap analizi.....	32
4.1.7. Kiriş yay destekli sınır koşullarında iki eksenle modal frekans cevap analizi.....	34
4.1.8. Kiriş modal test düzeneği.....	35
4.1.9. Kiriş darbe çekici ile modal test.....	36
4.1.10. Kiriş tek eksenle modal sarsıcı ile tahrik durumu için modal test.....	39
4.1.11. Kiriş tek eksenle iki noktadan modal sarsıcı ile tahrik durumu için modal test.....	43
4.1.12. Kiriş modal sarsıcı ile çok eksenli tahrik durumu için modal test.....	44
4.2. MK-82 Mühimmatı Dinamik Karakterizasyonu.....	45
4.2.1. MK-82 mühimmatı teknik özellikleri	45
4.2.2. MK-82 mühimmatı sonlu elemanlar ağ modeli.....	47
4.2.3. MK-82 mühimmatı serbest sınır koşullarında modal analiz sonuçları	48
4.2.4. MK-82 mühimmatı modal test modeli.....	52
4.2.5. MK-82 mühimmatı darbe çekici testi	52
4.2.6. MK-82 mühimmatı tekli girdi çoklu çıktı sarsıcı testi	59
4.2.7. MK-82 mühimmatı tek eksenle çoklu girdi sarsıcı testi.....	59
4.2.8. MK-82 mühimmatı çoklu eksenle çoklu girdi sarsıcı testi	60
5. BULGULAR YORUMLAR VE TARTIŞMA	63
5.1. Kiriş Dinamik Karakterizasyonu Bulguları	63

	Sayfa
5.2. MK-82 Mühimmatı Dinamik Karakterizasyonu Bulguları	68
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	75
KAYNAKLAR	77
ÖZGEÇMİŞ	81

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Test çalışmalarında kullanılan donanım listesi.....	23
Çizelge 4.2. Kiriş test ve analiz çalışmaları matrisi.....	24
Çizelge 4.3. Kiriş serbest sınır koşullarında modal analiz sonuçları	25
Çizelge 4.4. Kiriş yay destekli sınır koşullarında modal analiz sonuçları	30
Çizelge 4.5. Kiriş yay destekli sınır koşullarında modal test ve analiz sonuçları	38
Çizelge 4.6. MK-82 mühimmatı fiziksel özellikleri.....	46
Çizelge 4.7. MK-82 mühimmatı dinamik karakterizasyonu kapsamında yapılan testler.....	46
Çizelge 4.8. MK -82 Serbest sınır koşullarında modal analiz sonuçları.....	48
Çizelge 4.9. MK-82 Darbe çekici testleri doğal frekansları ve mod şekilleri.....	54
Çizelge 5.1. Kiriş yay destekli sınır koşullarında modal analiz sonuçları ile serbest sınır koşullarında modal analiz sonuçlarının karşılaştırılması	64
Çizelge 5.2. Kiriş deneysel modal testleri ve sonlu elemanlar analizi doğal frekanslarının karşılaştırılması	65
Çizelge 5.3. MK-82 deneysel modal testleri ve sonlu elemanlar analizi gövde eğilme doğal frekanslarının karşılaştırılması.....	68

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Tek serbestlik dereceli sistem	9
Şekil 3.2. Tek serbestlik dereceli sistemin frekans ve zaman düzleminde gösterimi	11
Şekil 3.3. Deneysel modal analiz aşamaları.....	12
Şekil 3.4. Frekans cevap fonksiyonunun elde edilmesi	15
Şekil 3.5. Analog ve dijital sinyal gösterimi.....	16
Şekil 3.6. Modal sarsıcı testi gösterimi	21
Şekil 4.1. Kiriş analiz katı modeli ve sonlu elemanlar ağ modeli.....	24
Şekil 4.2. Serbest sınır koşullarında tek eksenle modal frekans cevap analizi modeli	28
Şekil 4.3. Serbest sınır koşullarında tek eksenle modal frekans cevap analizi	28
Şekil 4.4. Serbest sınır koşullarında iki eksenle modal frekans cevap analizi modeli	29
Şekil 4.5. Serbest sınır koşullarında iki eksenle modal frekans cevap analizi.....	29
Şekil 4.6. Yay destekli kiriş modeli	30
Şekil 4.7. Yay destekli sınır koşullarında tek eksenle modal frekans cevap analizi modeli	33
Şekil 4.8. Yay destekli sınır koşullarında tek eksenle modal frekans cevap analizi ve serbest sınır koşulu ile karşılaştırılması	33
Şekil 4.9. Yay destekli sınır koşullarında iki eksenle modal frekans cevap analizi modeli	34
Şekil 4.10. Yay destekli sınır koşullarında iki eksenle modal frekans cevap analizi ve serbest sınır koşulu ile karşılaştırılması	35
Şekil 4.11. Kiriş 1 konumu için X,Y ve Z eksenlerinde tahrik edildiğinde nokta frekans cevap fonksiyonu	37
Şekil 4.12. Kiriş 1 konumu Z ekseninde tahrik edildiğinde gerinimölçer cevapları	37
Şekil 4.13. MAC matrisi	39

Şekil	Sayfa
Şekil 4.14. Farklı sinyal tipleri için FCF'ler ve bağdaşım fonksiyonları.....	42
Şekil 4.15. Aralıklı gelişigüzel titreşim sinyalinde hanning ve düz referans pencereleme yöntemlerinin karşılaştırılması	43
Şekil 4.16. Aralıklı gelişigüzel titreşim altında kademeli olarak artan (0.5 V-9.0 V) enerji seviyelerinde FCF'ler	44
Şekil 4.17. MK-82 mühimmatı	45
Şekil 4.18. MK-82 analiz katı modeli ve sonlu elemanlar ağ modeli.....	47
Şekil 4.19. Darbe çekici testlerinden alınan FCF'lerin karşılaştırılması	53
Şekil 4.20. Darbe çekici testlerinden alınan FCF'ler ve stabilizasyon diyagramı	53
Şekil 4.21. MAC matrisi	58
Şekil 5.1. Tek eksen de frekans cevap analizi ve darbe çekici testinin karşılaştırılması	65
Şekil 5.2. Testlerdeki frekans cevap fonksiyonları karşılaştırmaları (Z ekseni).....	67
Şekil 5.3. Testlerdeki frekans cevap fonksiyonları karşılaştırmaları (Y ekseni)	67
Şekil 5.4. Sarsıcı testlerinin tekrarlanabilirliği	69
Şekil 5.5. Tekli sarsıcı testlerinde doğrusallık	69
Şekil 5.6. Tek eksen de çoklu sarsıcı testlerinde doğrusallık	70
Şekil 5.7. Çoklu eksen de çoklu sarsıcı testlerinde doğrusallık.....	71
Şekil 5.8. Farklı şekillerde kullanılan sarsıcılar için FCF'lerin karşılaştırılması	73
Şekil 5.9. Tek eksen de tekli sarsıcı kullanım durumu için toplanmış ve bölgesel FCF'ler.....	74
Şekil 5.10. Çoklu eksen de çoklu girdi sarsıcı testlerinden alınan FCF'lerin karşılaştırılması	74

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Darbe çekici ve aksesuarları	19
Resim 3.2. Modal sarsıcı ve bağlantı aparatlarının gösterimi	20
Resim 4.1. Test kurulumu	35
Resim 4.2. Veri toplama sistemi ve kablolama	36
Resim 4.3. Tek eksenle tek noktadan modal sarsıcı ile tahrik durumu	40
Resim 4.4. Tek eksenle iki noktadan modal sarsıcı ile tahrik durumu	44
Resim 4.5. Modal sarsıcı ile çok eksenli tahrik durumu	45
Resim 4.6. MK-82 Test kurulumu ve test geometrisi	52
Resim 4.7. Tekli girdi çoklu çıktı sarsıcı testi	59
Resim 4.8. Tek eksenle çoklu girdi sarsıcı testi	60
Resim 4.9. Çoklu eksenle çoklu girdi sarsıcı testi	61

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
c	Sönümlleme oranı
c_c	Kritik sönüm
f	Kuvvet
H	Transfer fonksiyonu
Hz	Hertz
k	Yay katılık sabiti
kg	Kilogram
m	Metre
mm	Milimetre
N	Newton
s	Saniye
t	Zaman
V	Volt
ω_d	Sönümlü doğal frekans
ω_n	Doğal frekans
x	Yer değiştirme
$\dot{x}$	Hız
$\ddot{x}$	İvme
ζ	Kritik sönümlleme oranı
σ	Sönümlleme faktörü
φ	Mod şekli matrisi
Σ	Toplam simgesi

Kısaltmalar**Açıklamalar****FCF**

Frekans Cevap Fonksiyonu

FFT

Hızlı Fourier Dönüşümü

MAC

Modal Güvence Kriteri

MEMA

Çoklu Eksende Çoklu Girdi Sarsıcı Testi

MESA

Tek Eksende Çoklu Girdi Sarsıcı Testi

NASA

Amerika Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi

RMS

Kare Ortalamalarının Karekökü

SIMO

Tekli Girdi Çoklu Çıktı Sarsıcı Testi

1. GİRİŞ

Mühendislikte füze teknolojilerindeki gelişmelerle birlikte, dinamik karakterizasyon sürecine etkili ve hızlı bir çözüm bulmak çok önemli hale gelmektedir. Dinamik karakterizasyon süreçlerinde statik kuvvetlerin etkileri göreceli olarak daha kolay tahmin edilebilirken, dinamik kuvvetler için sistem cevabını öngörmek karmaşık bir hale gelebilmektedir. Sonlu elemanlar çözümlemeleri, yapılan testler ile doğrulamalara ihtiyaç duymaktadır. Bu noktada referans olarak kullanılan testlerin doğruluğunun önemi artmaktadır. Füzelerin modal testlerinde serbest uçuş koşullarının laboratuvar ortamında en iyi şekilde uygulanabilmesi için doğru girdi ve doğru sınır şartlarının sağlanması oldukça önem arz etmektedir. Deneysel modal analizde Frekans Cevap Fonksiyonu (FCF) (ing. Frequency Response Function, FRF), giriş ve çıkış arasındaki “transfer fonksiyonu” olarak ifade edilen ve sistemin girdi ve çıktı ilişkisini frekans alanında ifade eden bir fonksiyondur. Bu fonksiyon yapının doğal frekansını, sönümünü ve mod şeklini tanımlamak için kullanılır. Bu parametreler yapının dinamik karakterinin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

Son yıllarda normal çalışma koşulları altında aerodinamik tahrike maruz kalan yapılar için farklı test yöntemleri geliştirilmektedir. Bir füze uçuşu boyunca çok eksen ve çoklu noktalardan bozucu kuvvetlere maruz kalmaktadır. Bu nedenle titreşim testleri sırasında çalışma koşulları en gerçekçi şekilde çok eksenli sarsıcılar ile sağlanmaktadır. Serbest uçuş boyunca mühimmatların deneyimlediği aynı anda farklı eksenlerden bozucu kuvvetlere maruz kalma senaryosu, deneysel modal testlerde farklı eksenlerden bağlanan modal sarsıcılar ile gerçekleştirilebilmektedir. Bu çalışma, füze teknolojileri için titreşim ve modal testlerin çok eksen ve aynı anda uygulanması kavramı üzerine bir vaka çalışması sunmaktadır. Deneysel çalışma ile elde edilen parametreler değerlendirilerek farklı test yöntemleri ortaya konulmaktadır. Bu doğrultuda hazırlanan çalışma için öncelikle basit giriş modeli üzerinden deneysel çalışmalar yürütülmüş olup, ardından MK-82 mühimmatı modeli üzerinden test ve modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Deneysel modal analiz, 1950’lerden günümüze uzanan gelişmeler ile yapılarda en önemli dinamik karakterizasyon araçlarından biri haline gelmiştir. Deneysel modal analiz sayesinde bir tahrik karşısında yapının vermiş olduğu karmaşık cevap, modal çözümleme adı verilen yöntemle daha kolay betimlenebilir hale gelmiştir. Bu durum zamanla yapılardaki titreşim cevabının daha kolay belirlenebilir ve optimize edilebilir olmasını sağlamıştır.

Kennedy ve Pancu, 1947 yılında yapmış oldukları detaylı çalışma ile titreşim testleri sırasında uçan bir yapı için normal modları “titreştirici” adını verdikleri dört adet elektrikli hoparlör tipinde cihaz ile tahrik ederek ortaya koymuştur. Bu çalışma titreşim ölçümlerinde vektörel çözümlemelerin önemini koyarak pek çok yeni tanımlama getirmiştir. Çalışmada normal modlar için her normal modun uygulanan kuvvet karşısında tek bir serbestlik derecesindeki sistemin verdiği cevabı oluşturduğundan bahsedilmektedir. Toplam cevap ise bu her bir serbestlik derecesinin belirli oranlardaki katılımından oluşmaktadır. Normal modlarda, basit bir harmonik titreşim için sistemdeki tüm noktalar birbirine göre aynı fazda veya tam olarak zıt fazda hareket eder. Bu da sistemdeki her noktanın denge pozisyonundan en uzak olduğu anın aynı anda gerçekleşmesini ve böylelikle belirli bir modda benzersiz bir konumlanma meydana getirmesini sağlamaktadır. Çalışmaya göre “mod şekli” olarak adlandırılan bu konumlanmanın, uygulanan kuvvetin büyüklüğünden, frekansından veya yönünden bağımsız olduğu açıklanmıştır [1].

1960’lara gelindiğinde hem modal çözümlemelerde hem de ölçüm sistemlerinde köklü bir değişimin başına gelinmişti. 1963’te Bishop ve Gladwell yayınladıkları çalışma ile “Rezonans Test Teorisi” adını verdikleri detaylı bir inceleme gerçekleştirerek farklı yöntemleri de içine alan bir araştırma sunmuştur [2]. Cooley ve Tukey’nin 1965 yılında açıkladığı Hızlı Fourier Dönüşümü (ing. Fast Fourier Transform, FFT) algoritması, deneysel modal analiz çözümlemeleri için en önemli unsurlardan biri olan ve sistemin transfer fonksiyonunu ifade eden FCF’leri elde etmek için önemli bir dönüm noktası olmuştur [3].

1970'lerde hızla gelişen ve devlet destekli laboratuvarların tekelinden çıkarak akademik dünya ve özel sektörde yaygınlaşan bilgisayar ve ölçüm sistemlerinin olumlu etkilerinden, deneysel modal testler de nasibini almıştır. Hamma, Smith ve Stroud'un 70'lerin ikinci yarısında yayınlamış oldukları modal karakterizasyon çalışmalarındaki tahrik ve analiz metotlarını merkeze alan araştırma, çok eksenli sarsıcı kullanımının önemli potansiyeline dikkat çekmiştir [4].

Çoklu modal sarsıcı ile yapılan testlere olan ilginin artışı ve modal teorisinin sağlam temeller üzerine oturmaya başlaması 1980'lerde gerçekleşmiştir. 1980 yılı sonbaharında, daha sonraları uzun yıllar modal testler ile ilgili sayısız yayına imza atacak olan Allemang, deneysel modal analizlerde çoklu giriş ve çoklu çıkış durumu için elde edilen FCF'leri konu alan doktora teziyle önemli bir köşe taşı oluşturmuştur [5]. Ardından 1983 yılında çok sarsıcı kullanılarak yapılan modal testleri konu alan Craig'ın Amerika Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (NASA) Havacılık Araştırma Merkezi bünyesinde yayınlamış olduğu teknik rapor ile çoklu sarsıcı kullanımı, dinamik karakterizasyon çalışmalarında hakkında çokça konuşulan bir konu haline gelmiştir [6]. Aynı yıl Hunt ve Peterson çoklu sarsıcı ile yapılan modal testlerde deneysel modal testin ön kabullerinden biri olan tersinebilirlik ve tutarlılık konularında çoklu sarsıcı kullanımının daha güvenilir sonuçlar doğurduğunu göstermiştir. Ayrıca bu çalışma ile çoklu sarsıcı kullanımında testlerdeki önemli zaman tasarrufu da açıkça belirtilmiştir. Çalışma, geniş bantta tahrik edilecek karmaşık yapılar için genellikle matematik modellerin kullanılmasından ve bu noktada bir sarsıcı testi sırasında ilgilenilen tüm modları tam olarak tahrik edecek bir tahrik noktası bulunmamasından bahsetmektedir. Çoklu sarsıcı ile oluşan modal vektörlerin bağımsız ve ortogonal olduğunu test etmek amacıyla Modal Güvence Kriteri (ing. Modal Assurance Criterion, MAC) matrisleri incelenmiş ve çoklu sarsıcı kullanımında enerjinin geniş bir bantta daha iyi yayılmış olduğu gösterilmiştir [7]. 1984 yılına gelindiğinde ise 40 yılı aşan kariyerinde 200'ü aşkın akademik çalışması ile dinamik karakterizasyon konusunda önemli bir uzman olan Ewins'ın modal teori ve uygulaması hakkında yazmış olduğu kitap, teorisinin sağlam temeller üzerine oturmasında ön ayak olmuştur [8]. Aynı yıl yapılan Kabe'nin çalışmasında, test kalemi çoklu sarsıcı yardımıyla geniş bantta gelişigüzel titreşime maruz bırakılmıştır. Çoklu sarsıcı ile yapılan testlerin tekli sarsıcıya göre teorik sonuçlar ile karşılaştırıldığında daha iyi sonuç verdiği görülmüştür [9]. Yine 1984 yılında Voorhees ve Clark'ın bir uzay aracı yapısında modal test tekniklerini tartıştıkları çalışmada; çok sarsıcı ile sinüs sinyali, tek sarsıcı ile gelişigüzel titreşim girdisi ve çoklu sarsıcı ile gelişigüzel titreşim girdisi altında

meteorolojik bir uzay yapısı üzerinde testler gerçekleştirilmiştir. Çalışmada her sarsıcı testinin diğeriyle karşılaştırması ve uygulama süreleri ortaya konulmuştur. Çalışma ile her tahrik çeşidinin avantaj ve dezavantajları olmasına karşın, kısa sürede yüksek kaliteli sonuçlar isteniyorsa çoklu sarsıcı ile gelişigüzel titreşim girdisi altında yapılan testlerin öne çıktığı anlatılmaktadır. Ayrıca testlerde özellikle birbirine yakın olan modların belirlenmesinde problemler olduğu açıkça belirtilmektedir [10]. Bu dezavantaj ise sonraları çok eksenli çok sarsıcı ile yapılan testlere rehber olacaktır. 1985 yılına gelindiğinde Craig, 2 yıl önce çoklu sarsıcı modal testleri üzerine yapmış olduğu çalışmanın [6] devamı niteliğinde bir başka rapor ile zaman ve frekans alanında mod sentezleri üzerine araştırmalarını sunmuştur [11]. Bu dönemde Brillhart, Hunt, Jensen, ve Mason'ın yapmış olduğu çalışma ile bir katı yakıtlı roket motorunun çoklu girdi ile modal karakteri belirlenmiştir. Çalışma kapsamında katı yakıtlı roket motoru gibi sönümleme oranı yüksek olan viskoelastik bir test kalemi için çoklu sarsıcı kullanımının avantajları ortaya konulmuştur [12].

1990 yılına gelindiğinde gelişen kapalı devre kontrol sistemlerinin de yardımı ile daha kaliteli ölçümler için olanaklar oluşmuştur. To ve Ewins'ın yayınlamış oldukları makalede kapalı devre olarak kontrol edilen titreşim testlerinde daha iyi FCF tahminlerinin elde edildiği saptanmıştır. Aynı geribildirim hem tek sarsıcı hem de ikili sarsıcı ile testi yapılarak yöntem doğrulanmaya çalışılmıştır. Çoklu sarsıcı testi uygulanma sebebi birçok bağlantıya sahip karmaşık bir yapıdan elde edilen genlik değerlerinin tahrik noktasına göre büyük farklılıklar göstermesi olarak açıklanmıştır. Yapıya tahrik çoklu sarsıcı ile verildiğinde, tüm yapının doğru enerji seviyesinde tahrik edildiği belirtilmiştir [13]. Carne bir otomobil şasesi üzerinde yapmış olduğu çalışmada, modal test modeli ile sonlu elemanlar çözümü modeli arasındaki doğrulamalar için doğru girdi ve yanıt konumlarının seçilmesine dikkat çekmiştir [14].

2000'li yıllara gelindiğinde modal analiz teknikleri önemli yol kat etmişti. Mai ve Silva'nın çalışmasında olduğu gibi modal analiz teknikleri tek girdi tek çıktı, tek girdi çoklu çıktı ve çoklu girdi çoklu çıktı durumlarında frekans ve zaman alanları için çalışmalarda açıkça yer almaktaydı [15]. Bu dönemde sarsıcı teknolojilerindeki gelişmelerle birlikte çoklu sarsıcılar, çevresel testler için de kullanılmaya başlamıştır. Bu sarsıcılar elektromanyetik prensiple çalışabildiği gibi HYDRA örneğinde olduğu üzere çok eksenli hidrolik prensipte sarsıcılar ile de hem modal karakter belirlenebiliyor hem de çeşitli titreşim testleri yapılabiliyordu

[16]. Modal teorisinin gelişimiyle birlikte güvenilir ve tekrarlanabilir bir modal çözümleme ortaya koymak için FCF'lerin doğru şekilde ölçülmesi önem kazanmıştır. İyi bir FCF elde edebilmek için sağlanması gereken önkoşullardan biri de yapıyı doğru şekilde tahrik edebilmektir. Varoto ve Oliveira modal testler sırasında tahrik kuvvetinin test kalemine yayılması olgusuna yönelerek belirli bölgelerde doğru tahriki oluşturmanın zorluklarına dikkat çekmiştir [17]. Bir modal sarsıcıyı darbe çekici gibi farklı noktalarda gezdirerek yapıya tahrik uygulamak ve bu referansları birleştirmek pratikte problemler oluşturmaktadır. Sınır koşullarındaki veya çevresel etmenlerdeki küçük değişimler toplanan verilerde ve FCF'lerinde tutarsızlıklara sebep olabilmektedir. Irretier'in de sunmuş olduğu üzere frekans alanındaki verilerin doğru modal parametrelere indirgenmesinde pek çok yöntem bulunmaktadır [18]. Bir modal karakterizasyon işleminde genel bir kural oluşturmak oldukça zordur. Modal test yöntemleri, yapının şekline ve malzeme özelliklerine göre değişebilmektedir [19]. Hali hazırda çoklu giriş çoklu çıkış sistemleri için girdi veya çıktıda sinyalin gürültü içermesi de göz önüne alınarak birçok farklı frekans cevap analizi elde etme yöntemi çalışılmıştır [20].

Modal teorisinin uygulamasından bu yana geçen 40 yıl boyunca, deneysel modal analizin geçmişten günümüze yeri daima yapısal dinamiğin en çok üzerinde çalışılan konuları içerisinde yer almaktadır [21]. Çok eksenli uygulamalar yalnızca havacılık uygulamalarında değil aynı zamanda medikal, inşaat, otomotiv ve uzay uygulamalarında da geniş yer bulmuştur [22]. Çok eksenli titreşim uygulamalarındaki gelişmeler Yao, Li ve Diao çalışmasında da geçtiği üzere test edilen cihazın modal frekansı yakınında daha iyi performans elde etmek için adaptif yakınsama davranışına sahip iyileştirilmiş algoritmalar ile desteklenmiştir [23]. Sun, Li, Jiang ve Zhang'ın çalışmasında da olduğu gibi kimi zaman tek sarsıcı ile test edilen bir test kalemine çok eksenle tahrik vermek amacıyla bir fiktür tasarımına gidilmiştir. Çok eksenli titreşim fiktürünün zaman ve maliyet açısından birçok avantajı vardır. Ancak, bu çok eksenli titreşim tertibatının da bazı sınırlamaları bulunmaktadır. Örneğin, çalışmada aktarıldığı üzere gelişigüzel titreşim frekansı spektrumu ve fazdaki üç karşılıklı ortogonal eksen boyunca farklılıkları doğru şekilde aktaramamaktadır. Ayrıca, çok eksenli titreşim birleşme problemini çözmemektedir [24].

Son on yılda yapılan çalışmalarda çok eksenli titreşim üzerine önemli yol kat edilmiştir. 2014 yılında Daborn, Roberts, Ewins, ve Ind yeni nesil gelişigüzel titreşim çalışmaları olarak adlandırdıkları araştırmalarında, uçak kanadının altında servis ömrünü sürdürecektir bir

mühimmatın titreşim testleri için girdi yöntemlerini incelemiştir. Buna göre, yeni metotta empedans da titreşim testine dahil edilmiş olup, tüm eksenlerde aynı anda tahrik verilmektedir. Bağlantılar çok az bir oranlama içermektedir. Testin kontrolü ise birçok cevap noktasından yapılmaktadır. Bu çalışmada çoklu eksenle verilen tahrik senaryosunun gerçek uçuştaki aerodinamik tahrike en iyi yaklaşım yöntemi olduğu vurgulanmıştır [25]. Çoklu sarsıcı kullanımı, yapıya daha fazla kuvvet vermek anlamına gelmemektedir. Tek bir sarsıcı kullanım durumunda, her ölçüm noktasında iyi bir tahrik seviyesi oluşturmak amacıyla tek noktadan uygulanan kuvvet, çoklu sarsıcı kullanıldığında daha düşük bir sarsıcı kuvveti ile yapıya eşit şekilde yayılabilmektedir. 2014 yılında Peres, Kallmeyer, Witter, Carneiro, Marques ve Oliveira'nın çalışmasında tek girişli tek çıkışlı tekniklerle karşılaştırıldığında, çok giriş çok çıkışlı sistemin yapı boyunca daha homojen bir şekilde dağıtılmış enerji sağladığı ve kuvvet seviyelerinin daha düşük tutulabilir hale geldiği açıklanmıştır [26]. Bu durum özellikle modal testlerde doğrusal olmayan davranışın tetiklenmemesi için önemli olmaktadır. Bir titreşim testinde kullanılan sarsıcı, operasyonel olarak yapının çalışma koşullarının test kalemi üzerine en iyi şekilde uygulanması prensibine göre kullanılır. Daborn, Ind ve Ewins çalışmalarında aerodinamik bir tahrikin bir hava aracı üzerinde en iyi uygulama yönteminin çoklu sarsıcı ve lokal piezo sarsıcıları ile oluşturulduğu ve yapılan çoklu girdi çoklu çıktı titreşim testleri ile aerodinamik ortamın en iyi şekilde benzetildiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu çalışmalarda bir test kalemine aynı anda farklı eksenlerden verilen tahrikin tek eksenli sarsıcı ile yapılan testlere oranla daha doğru genlik değerleri ve tayf cevabı verdiği görülmüştür. Seçilen basit dikdörtgen prizma şeklinde bir kirişe piezoelektrik kristaller yardımıyla çoklu tahrik uygulanmıştır. Aynı zamanda ivmeölçerler yardımıyla ivme verisi toplanmıştır. Bu işlem sonucunda çoklu girdi ve çoklu çıktı ile aerodinamik tahrik taklit edilmiştir. Bu veri öncelikle tek eksenli tek sarsıcı ile sürülmüştür, ardından farklı eksenlerde tahrik veren ikili sarsıcı ile sürülmüştür. Bunun sonucunda çoklu sarsıcı kullanımının daha yüksek doğruluğa sahip olduğu görülmüştür. Kiriş için uygulanan bu test algoritması basit bir füze modeli için de uygulandığında benzer sonuçlara ulaşılmıştır [27, 28]. Geleneksel sarsıcılara ve darbe tahriklerine alternatif olarak çoklu sarsıcı testlerinde hibrit bir şekilde pnömatik silindirler de kullanılmakla birlikte bu yöntem sarsıcı testlerine göre daha gürültülü sonuçlar doğurmaktadır [29]. Çok eksenli testlerin bilinirliği son 10 yılda giderek artmaktadır [30]. Bu gelişmelerle altı eksenle birden hareketi sağlayan sarsıcılar gelişigüzel titreşim testlerinde kullanılmaya başlanmıştır [31]. Geride bıraktığımız yıllarda özellikle aerodinamik tahrike maruz kalan yapılarda bu bozucu kuvvetleri test kalemi üzerine

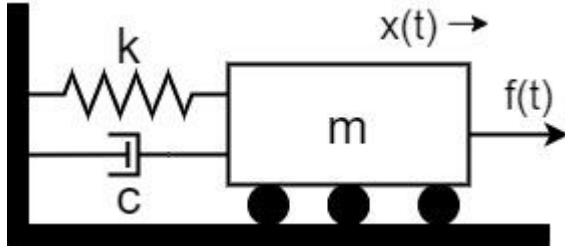
uygulamanın en iyi yolu çok eksenli çoklu sarsıcı kullanımı ile sağlanmıştır [32]. Serbest sınır koşullarında yapılan modal testlerin sonlu elemanlar analizleri ile modellenmesi için de pek çok yöntem bulunmaktadır [33]. Çok eksenli bir testte sarsıcının doğru konumdan tahriki sağlaması da testlerin doğruluğunu etkileyen önemli etkenlerden biridir [34]. Çok eksenli sarsıcı testleri uzay araştırmalarında yerini her geçen gün sağlamlaştırmaktadır [35]. Çoklu sarsıcı testlerindeki kuvvet tahmini algoritmaları giderek daha güvenilir hale gelmektedir [36].

3. SİSTEMLERİN DİNAMİK DAVRANIŞI

Bu bölümde sistemlerin dinamik davranışının elde edilmesi için gerekli temel bilgiler verilmiştir. Öncelikle sistemlerin dinamik davranışının yığınlaştırmış cisimler yöntemi ile matematiksel modellenmesi kısaca gösterilmiştir. Ardından modal analiz teorisinin temelleri açıklanmıştır. Modal analiz teorisinin uygulama kısmında veri toplama ilkeleri ve sinyal işlemenin terimleri kısaca açıklanmıştır. Sonrasında modal test uygulamasının parametreleri incelenmiştir. Modal testin değerlendirilmesi ve modal modelin ortaya konulması hususunda modal parametrelerin değerlendirme yöntemleri ortaya konulmuştur. Son olarak çalışmanın temelini oluşturan deneysel modal analiz uygulamasındaki tahrik yöntemleri detaylı olarak anlatılmıştır.

3.1. Sistemlerin Dinamik Modellemesi

Deneysel modal analizin temelini açıklamak amacıyla Şekil 3.1 ile gösterilen tek serbestlik derecesine sahip bir sistemin titreşim karakteri Newton'un ikinci hareket yasasına göre incelenebilir.



Şekil 3.1. Tek serbestlik dereceli sistem

Zamanın t , yer değiştirmenin x , kütlenin m , yay katılığının k , sönümleyici sabitinin c ve zamana göre türevlerin ise aksan işareti ile gösterildiği tek serbestlik dereceli bir sistemin hareket denklemleri; yığınlaştırmış cisimler kütle yaklaşım yöntemine göre yay ile sönümleyicinin doğrusal olduğu kabulü ile incelenirse,

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = f(t) \text{ veya } m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f(t) \quad (3.1)$$

Eş. 3.1 ile gösterilen ikinci derece diferansiyel denklem ile sistem tanımlanabilir. Bu eşitlik herhangi bir zorlama kuvveti olmadığı durum için Laplace dönüşümü ile üstel bir homojen çözüme sahip ise Eş. 3.2 olduğu şekilde yazılabilir. Üstel fonksiyonun katsayısı Eş. 3.3 ile gösterildiği üzere 0'a eşitlenirse karakteristik denklemin kökleri Eş. 3.4 ile gösterildiği şekilde bulunur.

$$(ms^2 + cs + k)Xe^{st} = 0 \quad (3.2)$$

$$ms^2 + cs + k = 0 \quad (3.3)$$

$$s_{1,2} = -\frac{c}{2m} \pm \sqrt{\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m}} \quad (3.4)$$

Bu köklere göre sistem ilk zaman anında yer değiştirme ve hızının sıfır olduğu kabul edilerek Eş. 3.5 ile tekrar yazılabilir. Sistemin sönümsüz durumdaki çözümü doğal frekansı verir. Sönümlenme oranı ve doğal frekans ile ilgili tanımlar Eş. 3.6'dan Eş. 3.10'a kadar gösterilmiştir. Buna göre düşük sönüm oranları için sönümlü doğal frekans değeri ile sönümsüz doğal frekans değeri oldukça yakındır. Sistem katılığının artışı doğal frekansı artırırken kütlenin artışı doğal frekansı düşürmektedir [37, 39].

$$s_{1,2} = -\zeta\omega_n \pm \sqrt{(\zeta\omega_n)^2 - \omega_n^2} = -\sigma \mp j\omega_d \quad (3.5)$$

$$\sigma = \zeta\omega_n \quad \text{sönümlenme faktörü} \quad (3.6)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{doğal frekans} \quad (3.7)$$

$$\zeta = \frac{c}{c_c} \quad \text{kritik sönümlenme oranı} \quad (3.8)$$

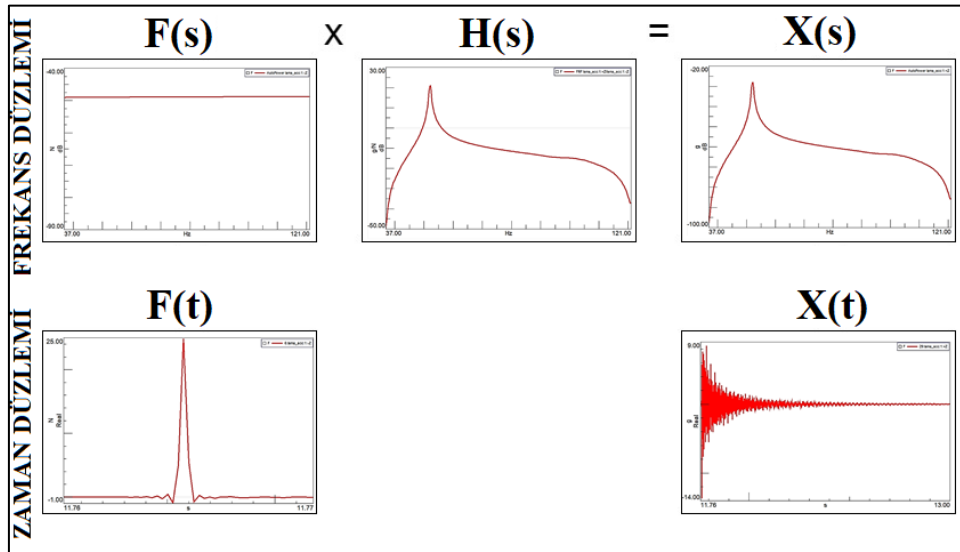
$$c_c = 2m\omega_n \quad \text{kritik sönüm} \quad (3.9)$$

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad \text{sönümlü doğal frekans} \quad (3.10)$$

Sistem için en basit haliyle transfer fonksiyonu sistem cevabının sistem girdisine bölümü ile bulunmaktadır. Eş. 3.2 için (ms^2+cs+k) katsayı olarak düşünülerek transfer fonksiyonu H ile tanımlanırsa Eş. 3.11 ile gösterilir. Transfer fonksiyonu deneysel açıdan FCF'nin temelini oluşturmaktadır.

$$H(s) = \frac{X(s)}{F(s)} = \frac{\frac{1}{m}}{s^2 + \left(\frac{c}{m}\right)s + \frac{k}{m}} \quad (3.11)$$

Tek serbestlik dereceli bir sistemde, F girdisi darbe çekici ile uygulanan bir kuvvet, X çıktısı ise sistemden toplanan ivme cevabı olarak değerlendirilirse bu ilişki deneysel açıdan frekans ve zaman düzleminde Şekil 3.2 ile gösterilebilir. Girdi kuvveti transfer fonksiyonu ile çarpıldığında titreşim çıktısına ulaşılmaktadır.



Şekil 3.2. Tek serbestlik dereceli sistemin frekans ve zaman düzleminde gösterimi

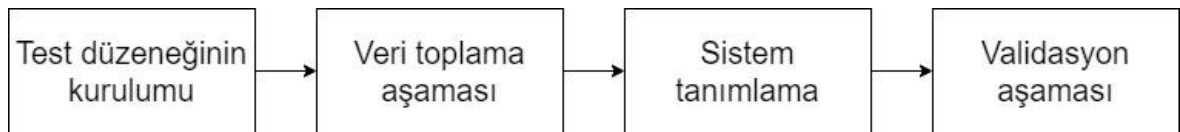
3.2. Modal Analiz Teorisi

Yapısal dinamik, yapısal bir sisteme uygulanan yüklemeye karşı o sistemin vermiş olduğu cevabı inceler. Yapısal dinamik çalışmaları ilk zamanlarından bu yana mühendislikte üç temel konuda çözümler üretmektedir. Bu üç konu Ewins'ın çalışmalarında şu şekilde

özetlenmiştir [8]. İlk olarak bir sistemin dinamik karakterinin ortaya konulması ve buna bağlı olarak titreşim cevabının belirlenmesi yapısal dinamiğin ana konusunu oluşturmaktadır. İkinci aşamada modal analiz teorisinin kullanıma amaçlarından biri teorik modellerin doğrulanarak sistemin titreşim cevabının tahmin edilebilir hale gelmesidir. Son olarak dinamik bir yükleme altında malzemelerin vereceği cevaplardan sönümlenme kapasitelerinin, sürtünme karakteristiğinin ve yorulma dayanımlarının bulunmasıdır.

Bir sistem herhangi bir dinamik yükleme karşısında yüklemenin frekans içeriğine bağlı olarak farklı frekanslarda farklı cevaplar verir. Sistem cevabı adı verilen bu yanıtlar sistemin dinamik karakterine bağlıdır. Bu dinamik karakter sistemin doğal frekansı, sönümlenme oranı ve mod şekillerinin bir bütünü olarak tanımlanmaktadır. Sistem dinamik karakterini belirlemek için modal analiz yöntemi kullanılır. Modal analiz, bir sistemin dinamik karakterine bağlı olarak vereceği cevabın uygulanan yükten bağımsız olarak karakterize edilmesidir. Sistem belirli frekanslarda oransal olarak tanımlanabilen bir yer değiştirme gösterir. Bu karakteristik yer değiştirme oranı sistemin o mod için mod şeklini göstermektedir. Modal analizden elde edilen mod şekilleri girdiden bağımsız olması sebebiyle gerçek fiziksel bir deformasyondan ziyade oransal bir şekli açıklar. Sistemin gerçek cevabı yalnızca gerçek girdi yükü bilindiğinde ortaya çıkmaktadır [37].

Modal analiz teorisinde iki farklı yaklaşım bulunmaktadır. Birinci yaklaşım analitik yaklaşımdır. Analitik yaklaşıma göre sistemin geometrisi, sınır koşulları ve malzeme özellikleri dağılımı (kütle, katılık ve sönüm) bilinmektedir. Bu bilgiler ışığında sistemin modal parametreleri olan doğal frekans, sönüm oranı ve mod şekilleri çıkarılır. İkinci yaklaşım ise test yaklaşımıdır. Test yaklaşımına göre modal analizi yapılacak sistemden FCF'lerin belirlenmesi için ölçümler alınır. Bu FCF'ler de modal parametreleri belirlemede kullanılır. Deneysel modal analizin aşamaları kısaca Şekil 3.3 ile belirtilmiştir.



Şekil 3.3. Deneysel modal analiz aşamaları

Şekil 3.3 ile görüldüğü üzere deneysel modal analiz deney düzeneğinin kurulumu ile başlamaktadır. Kurulum aşamasında test düzeneğinin uygun sınır koşullarının oluşturulması, ölçer yerleşimi ve veri toplama sistemi bağlantılarının kurulumu yer almaktadır. Ardından veri toplama aşaması ve sistem FCF'lerinin elde edilmesi sağlanmaktadır. Sonrasında sistem tanımlanarak toplanan verilerin değerlendirilmesi ile birlikte validasyon adı verilen doğrulamalar yapılır. Son olarak sistem dinamik karakteri ortaya konulmuş olur.

Modal analiz teorisinin uygulanması için sistemin belirli ön koşulları bulunmaktadır. Bu ön koşullar aşağıdaki maddelerde açıklanmaktadır [38].

- a) Doğrusal olma: Sisteme yapılan girdilerin herhangi bir birleşimi yine çıktıların aynı şekilde birleşimine eşit olmalıdır. Teoriye göre sistem dinamiği, doğrusal ikinci derece bir diferansiyel denklem ile ifade edilebilir olmalıdır. Bu nedenle her modal analiz sistemin doğrusallığının kontrol edilmesi ile başlar.
- b) Zamandan bağımsız olma: Sistem dinamik özellikleri zamana bağlı değişmemelidir. Yani sistemi tanımlayan doğrusal ikinci dereceli bir diferansiyel denklemin sabit katsayıları zamandan bağımsız olmalıdır.
- c) Gözlenebilir olma: Sistem karakteristiğini belirlemede kullanılacak veri uygun serbestlik derecesine göre tanımlanmalıdır.
- d) Tersinebilir olma: Bir A noktasından yapılan girdinin B noktasına göre cevabı ile B noktasından yapılan girdinin A noktasına göre cevabı aynı olmalıdır. Bu varsayım simetrik bir kütle, katılık ve sönüm oranı matrisi sunmaktadır. Aynı anda çoklu sarsıcı ile yapılan testler bu durumu en iyi kontrol etme yöntemlerinden biridir.

Modal test teorisinin kullanım uygulamaları Ewins tarafından beş ana konu ile ifade edilmiştir [8].

- 1) Modal test teorisinin en yaygın kullanımı yapının dinamik karakterinin belirlenmesiyle birlikte teorik modeller olan sonlu elemanlar çözümlerinin kıyaslanmasıdır. Bu kullanım genellikle teorik modellerin modal testler ile doğrulanarak, yapının karmaşık girdiler altında vereceği cevapların sonlu elemanlar analizi ile tahmin edilmesine yardımcı olur.
- 2) Modal test teorisinin bir diğer kullanımı teorik modellerin test ile karşılaştırılmasından ziyade modellerin testlerden alınan çıktılar doğrultusunda güncellenmesine dayanmaktadır.

Sistem dinamik karakteri testlerle belirlenen bir teorik modele bu parametreler dahil edilerek korelasyon sağlanabilir.

3) Modal test teorisinden elde edilebilecek bir diğer fayda ise yapısal bir sistemi oluşturan parçaların matematiksel modellerinin elde edilerek büyük bir yapısal sisteme dahil edilmesidir. Bu yöntem alt karmaşık sistemlerin incelenmesinde kullanılmaktadır. Bu yöntemin uygulanması ilgilenilen bant genişliği dışındaki modların yapının toplam davranışına olan etkisi sebebiyle oldukça detaylı bir inceleme süreci gerektirmektedir.

4) Madde 3 ile belirtilen uygulamanın bir diğer kullanımı, sistemdeki potansiyel bir kütle ve katılık değişikliğinde oluşacak etkilerin tahmin edilmesidir. Bu işleme modifikasyon tahmini adı verilmektedir. Bu amaçla yapılan yorumlamalarda sistem dinamik karakterizasyonunun oldukça detaylı gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Uygulamanın zorlayıcı bölümü dönel serbestlik derecelerindeki ölçümlerin testlerde kolaylıkla belirlenememesinden kaynaklanmaktadır.

5) Modal test yöntemi ile yorumlanacak bir başka metot ise kuvvetin belirlenmesidir. Titreşim ölçümlerinde direkt olarak girdi kuvvetin belirlenmesi çoğu zaman pratik bir yöntem olarak görülmemektedir. Ancak böyle bir ihtiyacın olduğu durumlarda matematiksel modelden transfer fonksiyonları ile kuvvet tahmini yapılabilmektedir.

Bir sistemin dinamik yapısını çözümlmek için sistemi zaman düzleminde incelemek mümkün olsa da bu yöntem çoğunlukla karmaşık bir yöntemdir. Sistemler çoğunlukla gelişigüzel titreşimler altında girdi ile tahrik edilir. Buna bağlı olarak da gelişigüzel titreşim cevapları üretir. Girdiler ve çıktılar frekans düzleminde incelenirse sistemlerin titreşim karakteri zamandan bağımsız olarak ortaya konulabilir. Sistemlerin dinamik cevapları şaşırtıcı sonuçlar içermektedir. Örneğin bir sisteme uygulanan yükün büyüklüğü tamamen aynı kalmasına karşın, uygulanan yükün uygulama sıklığını yani frekansını değiştirmek sistemin cevabını tümüyle değiştirmektedir.

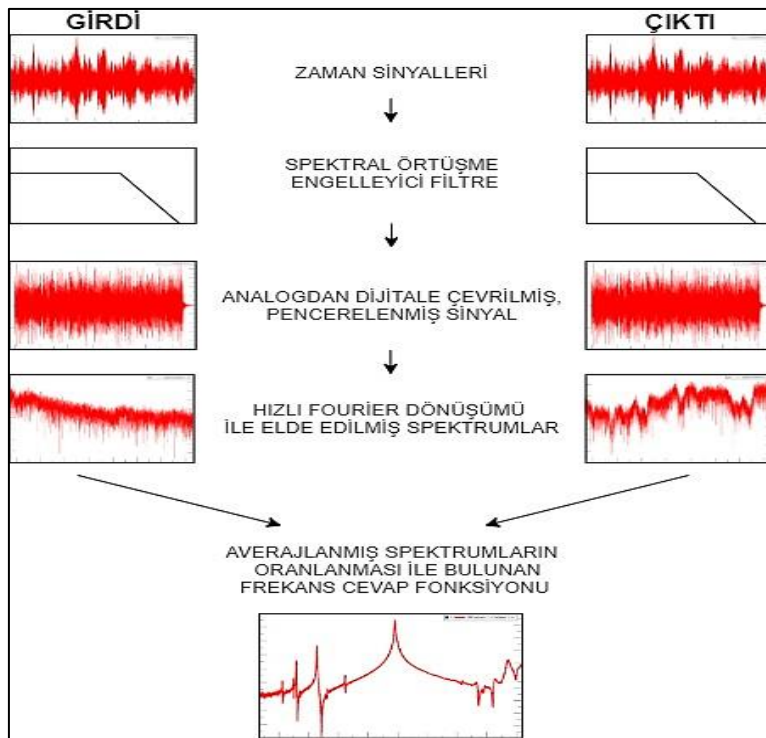
Bir sistemin mod şeklini doğru şekilde tanımlayabilmek için sistemde birden fazla cevap noktasına ihtiyaç bulunmaktadır. Bu da dinamik karakteri belirlenmek istenen sisteme yerleştirilen ölçerler ile mümkün olmaktadır.

FCF sistemin vermiş olduğu cevabın sisteme uygulanan girdiye bölümünü ifade eden transfer fonksiyonudur. Ölçülen zaman girdisi ve çıktısı FFT ile frekans düzlemine çevrilerek oranlanır. Bu dönüşüm ile FCF karmaşık sayılardan oluşan bir transfer

fonksiyonu olarak elde edilir. FCF bir karmaşık sayı olarak gerçek ve imajinal bileşenlerle ifade edilebileceği gibi genlik ve faz açısı ile de tanımlanabilir. Bir FCF ölçümünde doğal frekansın doğru saptanabilmesi için FCF'nin paydasını oluşturacak sistem girdisinin ve payını oluşturacak sistem cevabının doğru noktaya uygulanması gereklidir. FCF ölçümünde sistemin en çok doğal frekansının saptanabildiği konum en iyi referans noktasını ifade eder [37].

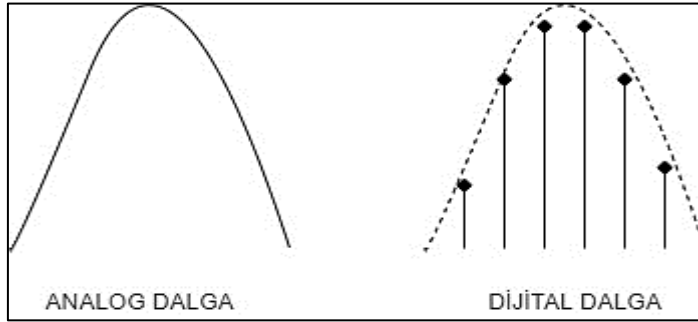
3.3. Deneysel Modal Analizde Sinyal İşleme Teknikleri

Zaman sinyalleri belirli bir fiziksel olayın algılanması için değerlendirilmesi güç sinyallerdir. Bu nedenle çoğu zaman karmaşık zaman sinyalleri frekans düzleminde incelenir. Bu amaçla zaman sinyalleri yoğunlukla FFT uygulanarak frekans düzlemine çevrilir. Bir FCF elde edilmesi için izlenen yollar özetle Şekil 3.4 ile gösterilmiştir. Bu akışa göre bir ölçerden ölçülen analog sinyal uygun filtrelerden geçerek dijital hale dönüştürülür. Ardından gerekli ise sinyalin uygun hale getirilmesi amacıyla çeşitli pencereleme yöntemleri uygulanır. Daha sonra bu zaman sinyalleri Fourier dönüşümü ile frekans düzleminde ifade edilebilir hale gelir. Bu işlem birkaç kez yapılarak ortalama alınır ve nihayetinde FCF'yi oluşturmak üzere çıktı ve girdi birbirine oranlanır [37].



Şekil 3.4. Frekans cevap fonksiyonunun elde edilmesi

Bir sinyalin dijital hale dönüştürülmesi esnasında dikkat edilmesi gereken belirli konular bulunmaktadır. Bu konulardan biri niceleme ve örnekleme olarak geçmektedir. Bir analog sinyal kesintisiz iken dijital sinyal bu analog sinyalin belirli zaman aralıklarında ölçülüp kaydedilmesine dayalıdır (Bkz. Şekil 3.5). Bu nedenle niceleme ve örnekleme adı verilen bu işlem yeterince hızlı olmaz ise gerçekte oluşan büyüklük ve frekansta bir ölçüm oluşmaz. Doğru bir frekans düzlemi ölçümü için Shannon Teoremi'ne göre örnekleme frekansı ölçülen sinyalin içeriğinden en az iki kat yüksek olmalıdır.



Şekil 3.5. Analog ve dijital sinyal gösterimi

Örnekleme frekansının ölçümlendirilen olayın frekansının iki katından az olduğu durumda basamaklandırma (ing. aliasing) hatası meydana gelmektedir. Bu olay için en genel örnek bir helikopter palinin video görüntüsü kaydedildikten sonra dönmekte olan pervanenin duruyor halde görünmesidir. Burada kameranın saniyede kaydetmiş olduğu kare sayısı ile iki pal arasındaki geçiş frekansı aynı ise pal duruyor halde görünür. Saniye kare sayısı pal geçiş frekansından bir miktar az ise bu kez helikopter pervanesi yavaş şekilde geriye dönüyor halde gözlemlenir. Bu durum hatalı örnekleme frekansı seçilirse, titreşim sinyalleri için de meydana gelmekte ve ölçülen sinyalin frekans içeriği olduğundan farklı görünebilmektedir.

Periyodik olmayan sinyallerin FFT dönüşümü sırasında genlik ve frekans ile ilgili hatalar meydana gelebilir. Bu hata genellikle frekans sızıntısı olarak tanımlanır. Kısaca bir frekansta bulunması gereken enerji dağılımının komşu frekanslara dağılmasını tanımlamaktadır. Doğru spektrumun elde edilmesi için daha iyi bir frekans çözünürlüğü ve pencereleme adı verilen düzeltme fonksiyonları kullanılır [37].

3.4. Modal Test Uygulaması

Modal test uygulamaları farklı şekillerde gerçekleştirilebilmektedir. Bir modal testten elde edilebilecek temel çıktılar doğal frekanslar, sönümlleme oranları ve mod şekilleridir. Bu çıktılar pek çok zaman hata analizi, sonlu elemanlar doğrulamaları, yapısal değişimler, hassasiyet analizi, model indirgeme, zorlanmış tepki analizleri, alt sistem ayrıştırması, hasar tespiti ve aktif kontrol gibi amaçlarla kullanılabilir [40]. Dinamik Test Ajansı El Kitabı'na göre modal test gelişmişlik düzeyi beş seviyede sınıflandırılmaktadır [41].

- a) Seviye 0: Modal test uygulamasının ilk seviyesi doğal frekansların ve sönümlleme oranının tahmin edilmesine dayalıdır. Bu uygulama diğer yöntemlere kıyasla daha az ölçüm noktası ve zaman gerektirmektedir.
- b) Seviye 1: Modal test uygulamasının ikinci seviyesi doğal frekansların ve sönümlleme oranının yanında mod şekillerinin de tahmin edilmesine dayalıdır. Bu seviyede bulunan mod şekilleri yalnızca niteleyici özelliktedir.
- c) Seviye 2: Modal parametrelerin animasyonlu mod şekli gösterimi için ölçülmesi esasına dayanır. Mod şekillerinin normalleştirilmiş olması gerekmemektedir.
- d) Seviye 3: Normalleştirilmiş mod şekillerini içeren modal modelin ölçümü sağlanır. Bu seviyedeki modal model analitik mod korelasyonu için kullanılabilir.
- e) Seviye 4: Modal modelin dinamik analizlerde kullanımı için modal modelin tam ölçümüne dayanmaktadır. Yüksek model kalitesine sahiptir. Aynı zamanda ölçülememiş modların katılım etkileri hesaba katılmalıdır.

Modal test uygulaması öncesinde testin amacı ve içeriğinin belirlenmesi önem arz etmektedir. Modal testi uygulayan analist bu ihtiyaçlar doğrultusunda uygun ön hazırlığı gerçekleştirmelidir. Bir modal test uygulaması genellikle uygun sınır koşullarının sağlanması ile başlar. Ardından doğru ölçümün gerçekleşmesi için girdi ve çıktıyı ölçebilecek özellikte, sayıda ve doğru konumlandırılmış ölçerlere ihtiyaç duyulmaktadır. Ölçerler; ivme, kuvvet, basınç, gerinim vb. gibi fiziksel bir büyüklüğün değerlerini eşdeğer elektrik enerjisine dönüştüren cihazlardır. Hemen her fiziksel büyüklüğün ölçülmesinde kullanılan bir çeşit ölçer bulunabilir. Modal testlerde genellikle girdi kuvvetölçer ile ölçülürken, cevaplar ivmeölçerler yardımı ile kayıt altına alınır. Ancak son yıllarda hız ölçen lazer sistemler ve dinamik gerinim ölçen ölçerler de modal testler için sıkça kullanılmaktadır [43, 44].

Uygun sınır koşullarında ve doğru şekilde ölçerler ile hazırlanmış bir modal test kurgusunda bir sonraki aşamada doğru tahrik yönteminin uygulanması bulunmaktadır. Bu noktada en çok kullanılan iki yöntem darbe çekici ve modal sarsıcı ile tahrik yöntemleridir.

3.5. Modal Analizde Modal Parametrelerin Belirlenmesi ve Değerlendirilmesi

Modal teoride sistem FCF elde edildikten sonra doğal frekansların belirlenmesi önem kazanmaktadır. Sistem parametreleri bu transfer fonksiyonlarının kökleri belirlenerek bulunmaktadır. Bu işleme modal parametrelerin tahmini adı verilmektedir. Bu noktada sistem FCF'sine uygun bir matematiksel fonksiyon belirlenmeye çalışıldığı için bu işleme “eğri ayarlama” da denmektedir.

Özellikle toplanan verinin gürültülü olduğu durumlarda eğri uydurma işlemi zorlaşmaktadır. Eğri uydurma işlemi sırasında genellikle en küçük kareler metodu ve türevleri kullanılır. Bu yöntemde genellikle deneysel modal analizi gerçekleştiren analistin model derecesini, analize dahil edilecek frekans bandını ve arta kalan frekans bandının etkisini göz önünde bulundurması gerekir. Modal parametre çıkarma yöntemlerinden PolyMAX çözüm süresini artırmadan oldukça yüksek keskinlikte tahminler oluşturabilmektedir [45].

Modal parametreler elde edilerek mod şekilleri matrisleri oluşturulduktan sonra bu vektörlerin doğru şekilde tanımlandığını kontrol etmek amacıyla çeşitli vektör korelasyon araçları bulunmaktadır. Bu araçlardan biri Modal Güvence Kriteri (MAC) olarak adlandırılır. Eş. 3.12 ile gösterilen MAC formülasyonu iki mod şeklinin birbiri ile olan korelasyonunu ifade etmektedir. Testler ile analizleri kendi içinde veya karşılıklı olarak kıyaslamak için kullanılabilir. Genellikle yüzdelik olarak ifade edilen MAC 100 ise tam benzer, 0 ise tamamen farklı anlamına gelmektedir [8].

$$MAC(A, X) = \frac{|\sum_{j=1}^n (\varphi_X)_j (\varphi_A)_j^*|^2}{(\sum_{j=1}^n (\varphi_X)_j (\varphi_X)_j^*) (\sum_{j=1}^n (\varphi_A)_j (\varphi_A)_j^*)} \quad (3.12)$$

3.6. Modal Analizde Tahrik Yöntemleri

Modal teoride FCF'nin elde edilmesi için doğru tahrik yönteminin kullanılması esastır. Bu amaçla en genel olarak darbe çekici ve modal sarsıcılar kullanılır. Her iki, yöntemin de öne çıkan avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır.

3.6.1 Darbe çekici ile tahrik

Darbe çekici ile yapılan modal testler, çekiç şeklinde bir yapının ucunda kuvvet ölçen bir ölçer ile yapıya uygulanan vuruşlar ile gerçekleştirilmektedir. Bu tahrik şekli transfer fonksiyonlarının elde edilmesi için uygulanan girdinin bir çekicin ucuna yerleştirilen kuvvetölçer ile sağlanması yöntemine dayanır. Çekiç ile yapıya anlık kısa süreli darbeler uygulanır ve yapının bu darbeler karşısındaki cevapları çıkarılır. Uygulamanın oldukça basit olması sebebiyle çok yaygın kullanılmaktadır. Resim 3.1 ile bir darbe çekicinin genel görünümü farklı sertlikteki uçlar ve ek kütle ile gösterilmiştir. Darbe çekiçlerinin boyutu ve kütlesi tahrik edilecek yapının kütlesi ve boyuna göre değişkenlik gösterebilmektedir.



Resim 3.1. Darbe çekici ve aksesuarları

Bir darbe çekici testini etkileyen parametreler darbe ucunun sertliğinin seçilmesi, girdi ile çıktının pencereleme yöntemi, yapıya uygulanan enerjinin istenen bant genişliğinde uygun şekilde dağılımı, kuvvet ölçümünde tetik anının seçilmesi ve çoklu vuruşun engellenmesi şeklinde sıralanabilmektedir.

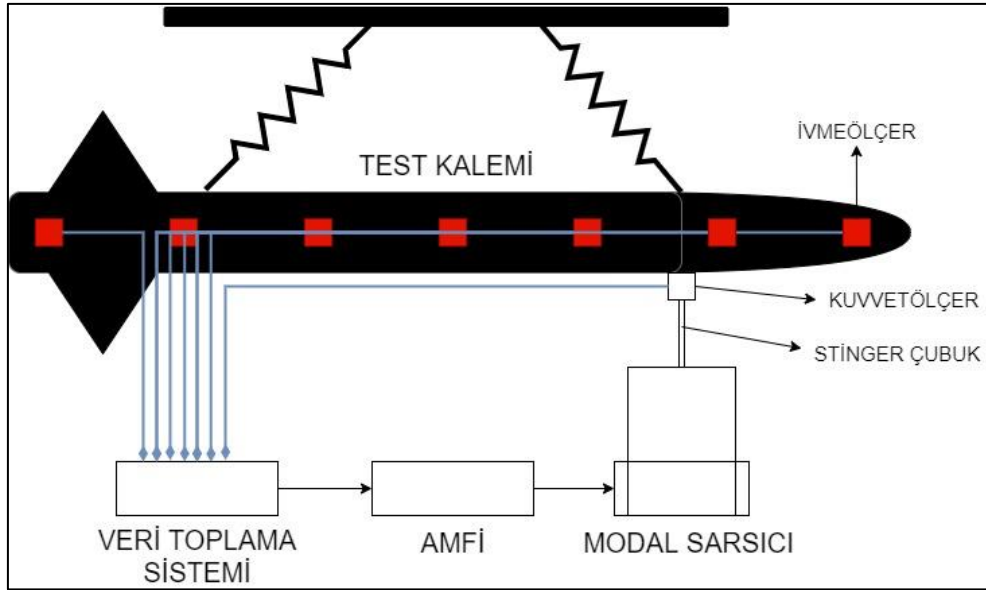
3.6.2. Modal sarsıcı ile tahrik

Deneysel modal analizde bir modal sarsıcıyı sürececek sinyal genellikle veri toplama sistemi tarafından üretilir ve modal sarsıcı amfisi tarafından şartlandırılarak sarsıcıya gönderilir. Sarsıcı kafasından uzanan stinger çubuk üzerinde yer alan kuvvetölçer test edilecek yapıya bağlanır. Yapıya girdinin sağlandığı bu kuvvetölçer için genellikle kuvvet uygulanan noktadan ivme de toplanması amacıyla kuvvet ile birlikte ivme de ölçen empedans ölçerler kullanılır. Modal sarsıcı bağlantı aparatları ve ilgili ölçerler Resim 3.2 ile gösterilmiştir.



Resim 3.2. Modal sarsıcı ve bağlantı aparatlarının gösterimi

Stinger çubuk, yalnızca kuvvetin uygulama doğrultusunda katılığa sahiptir. Bu da kuvvetin uygulama ve ölçüm doğrultusunun aynı olmasını sağlayarak kesme ve eğilme yönünde kuvvet taşımamasını önler. Test kalemi üzerinde çeşitli bölgelere yerleştirilen ivmeölçerler yardımıyla yapının cevabı ölçülür. Ardından FCF elde edilir [37]. Modal sarsıcı test sisteminin genel gösterimi Şekil 3.6 ile verilmiştir.



Şekil 3.6. Modal Sarsıcı Testi Gösterimi

Modal sarsıcıda kullanılan farklı sinyal tiplerinin öne çıkan iyi yönleri ve eksik kaldığı noktalar bulunmaktadır. Sinyaller frekans sızıntı özelliklerine, sinyal/gürültü oranlarına, kontrol edilebilirlik ve hassasiyetlerine göre çeşitli sınıflara ayrılmaktadır. En iyi enerji dağılımının sağlanabilmesi amacıyla doğru sinyal tipinin seçilmesi önem taşımaktadır [38].

Çok noktadan sarsıcı terminolojisi MIL-STD-810-H Çevresel Testler Mühendisliği Değerlendirmeleri ve Laboratuvar Testleri standardı metod 527.2'ye göre kullanılan sarsıcı sayısına, tahrik edilen eksen sayısına ve çıktının ölçümüne göre sınıflandırılmaktadır [42]. Testler tek sarsıcı ile tek eksende tahrik verilerek bir veya birden fazla noktadan çıktı ölçümü ile gerçekleştirilebileceği gibi, aynı anda birden fazla sarsıcının tek eksende veya birden fazla eksende hareketi ile verilerek bir veya birden fazla noktadan çıktı ölçümü ile gerçekleştirilebilir. Standartta göre birden fazla sarsıcının birden fazla eksende kullanıldığı testlerde tüm eksenlerde aynı anda tahrik oluşması sebebiyle test kaleminin gerçek çalışma koşullarının en iyi şekilde uygulanması sağlanmış olmaktadır. Ayrıca test süreleri de oldukça kısalmaktadır.

Bu çalışma kapsamında tek bir sarsıcının tek eksende hareketi ile çoklu ölçüm noktası kullanılarak “Tekli Girdi Çoklu Çıktı Sarsıcı (*ing. Single Input Multi Output, SIMO*)” testi, birden fazla sarsıcının tek eksende hareketi ile çoklu ölçüm noktası kullanılarak “Tek Eksende Çoklu Girdi Sarsıcı Testi (*ing. Multi Exciter Single Axis, MESA*)” ve birden fazla

sarsıcının farklı kartezyen ekseninde hareketi ile çoklu ölçüm noktası kullanılarak “Çoklu Eksende Çoklu Girdi Sarsıcı Testi (*ing. Multi Exciter Multi Axis, MEMA*)” adı verilen testler icra edilmiştir. Bir modal testte uygulanan tahrik için tahrik uygulama noktası ve eksen sayısı artırıldığında birbirine çok yakın modların tespit edilme ihtimali artmaktadır. Ayrıca büyük yapılarda enerji yapı üzerinde daha iyi bir dağılım göstermektedir [8].

Teorik açıdan bir darbe çekici testi ile modal sarsıcı testi arasında transfer fonksiyonları doğru şekilde elde edildiği sürece bir fark bulunmamaktadır. Ancak test uygulamalarında iki yöntemin birbirine göre avantaj sağladığı bazı durumlar bulunmaktadır. Darbe çekici ile yapılan testlerde yapıya herhangi bir bağlantı yapılmadığı için bir kütle etkisi bulunmazken sarsıcı testlerinde özellikle hafif veya plak yapıların testlerinde sarsıcının yapıya düzgün bağlanması önem kazanmaktadır. Darbe çekici testlerinde anlık bir darbe gerçekleştiğinden frekans bant genişliği boyunca bu enerjinin aynı şekilde dağılması mümkün olamayabilir. Bu da sinyal/gürültü oranını artıran bir etkidir.

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu bölümde dinamik karakterizasyon faaliyetlerinde mühimmat yapısal yaklaşımlarında eşdeğer model olarak en çok kullanılan kiriş yapısı ve MK-82 mühimmatı kapsamında yapılan analiz ve test çalışmaları sunulmuştur. Deneysel çalışma sırasında modal analiz ve frekans cevap analizleri için MSC şirketi sonlu elemanlar yazılımları olan MSC Nastran, MSC Patran ve MSC Apex kullanılmıştır. Modal test çalışmalarında kullanılan donanım listesi tanımları Çizelge 4.1 ile birlikte ile verilmiştir.

Çizelge 4.1. Test çalışmalarında kullanılan donanım listesi

Donanım Tanımı	Donanım Detayı
Veri Toplama sistemi ve kontrolcü	Simcenter SCADAS mobil kasa
Modal çekiç	PCB 086C01 modal çekiç
Modal sarsıcı	DynaLabs DYN-MS-250 250 N Sinüs tepe kuvvetli sarsıcı
Modal sarsıcı amfisi	DynaLabs DYN-SA-350 amfi
Kuvvetölçer	PCB 288D01 kuvvet/ivme ICP ölçer
İvmeölçer	PCB 356A16 3 eksenli ICP ölçer
Dinamik gerinimölçer	PCB 74B02 ICP ölçer

4.1. Kiriş Dinamik Karakterizasyonu

Bu bölümde çok eksenli titreşim çalışmaları kapsamında lama adı verilen kiriş modeli üzerinde yapılan sonlu elemanlar analizi ve test çalışmaları sunulmuştur. MSC Patran sonlu elemanlar programı ile önce serbest konumda modal analiz yapılmış ardından, belirli girdiler altında frekans cevap analizleri yapılmıştır. Sonrasında tüm bu analizler serbest durumdan farklı olarak, bir yay desteği ile tanımlanarak yeni sonlu elemanlar modeli için tekrarlanmış ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Dinamik karakterizasyon testlerinde kiriş modeli, serbest sınır koşulları altındaki dinamik davranışın incelenmesi amacıyla elastik yaylar ile asılmıştır. Kiriş üzerine 3 eksenli ivmeölçerler ve dinamik gerinimölçerler yapıştırılmıştır. Ardından darbe çekici ile modal test yapılmıştır. Modal test çalışmaları modal sarsıcı kullanılarak devam ettirilmiştir. Sırasıyla tek eksenli tahrik durumunda tek bir sarsıcı kullanılarak, tek eksenli tahrik durumunda iki modal sarsıcı kullanılarak ve çok eksenli tahrik durumunda iki modal

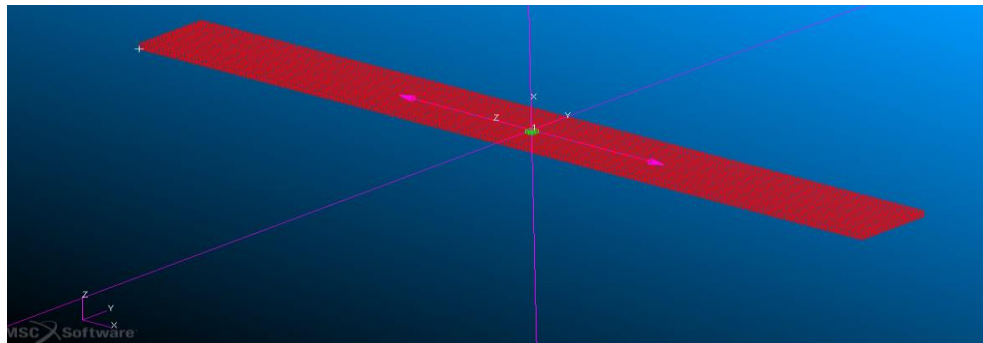
sarsıcı kullanılarak testler yapılmıştır. Modal sarsıcı ile yapılan testler farklı sinyal tiplerinde ve enerji seviyelerinde tekrarlanmıştır. Analiz ve test faaliyetlerinin özeti Çizelge 4.2 ile verilmiştir.

Çizelge 4.2. Kiriş test ve analiz çalışmaları matrisi

Kiriş Analiz Çalışmaları	Kiriş Test Çalışmaları
a) Serbest Sınır Koşullarında Modal Analiz Sonuçları	a) Darbe Çekici İle Modal Test
b) Serbest Sınır Koşullarında Tek Eksende Modal Frekans Cevap Analizi	b) Tek Eksende Tek Noktadan Modal Sarsıcı İle Tahrik Durumu İçin Modal Test
c) Serbest Sınır Koşullarında İki Eksende Modal Frekans Cevap Analizi	c) Tek Eksende İki Noktadan Modal Sarsıcı İle Tahrik Durumu İçin Modal Test
d) Yay Destekli Sınır Koşullarında Modal Analizi	d) Modal Sarsıcı İle Çok Eksenli Tahrik Durumu İçin Modal Test
e) Yay Destekli Sınır Koşullarında Tek Eksende Modal Frekans Cevap Analizi	
f) Yay Destekli Sınır Koşullarında İki Eksende Modal Frekans Cevap Analizi	

4.1.1. Kiriş sonlu elemanlar ağ modeli

Analizlerde kullanılan katı modeli ve sonlu elemanlar ağ modeli Şekil 4.1 ile gösterilmiştir. Modelde 8000 CHEXA elaman ile 12663 sonlu elemanlar düğüm noktası içeren sonlu elemanlar ağ modeli oluşturulmuştur. 10x100x1000 mm boyutlarında ve alüminyum 6061 olarak modellenen kirişte eşyönlü doğrusal elastik malzeme olarak yapılmıştır. Analizlerde birim kg-m-N-s birim sistemi kullanılmıştır.



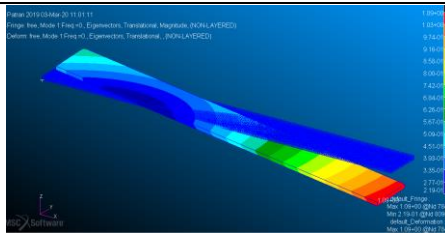
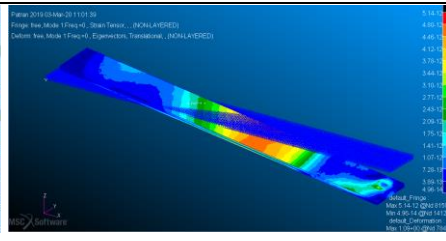
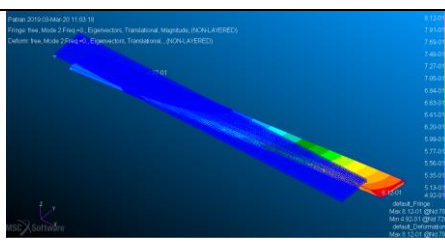
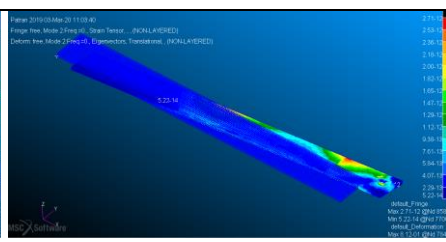
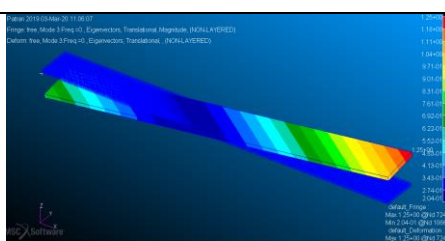
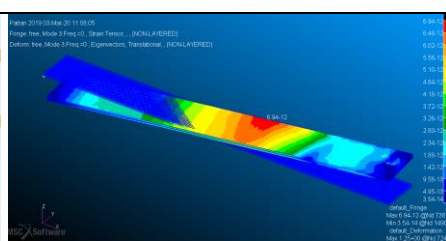
Şekil 4.1. Kiriş analiz katı modeli ve sonlu elemanlar ağ modeli

4.1.2. Kiriş serbest sınır koşullarında modal analiz sonuçları

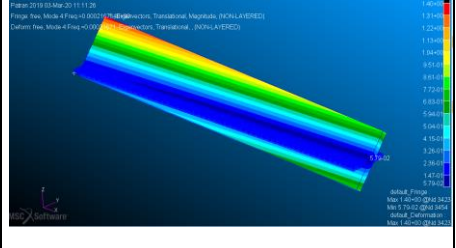
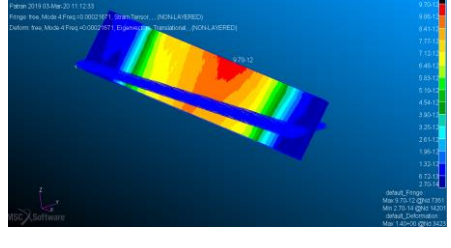
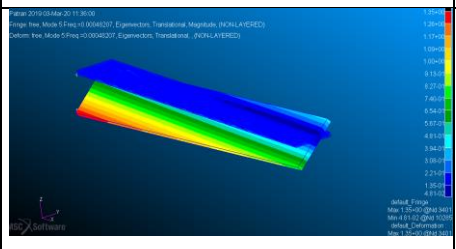
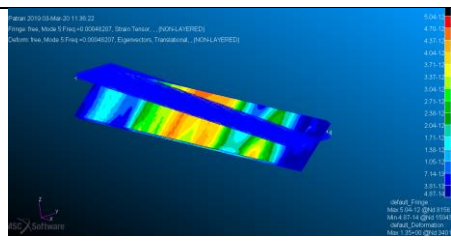
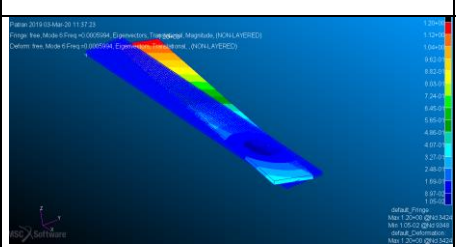
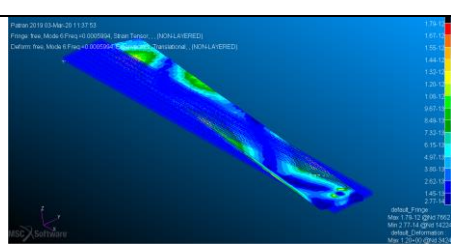
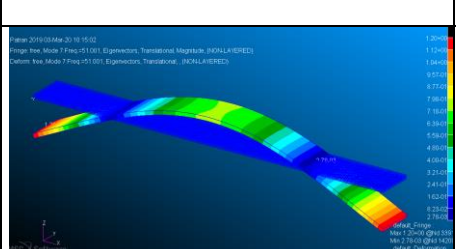
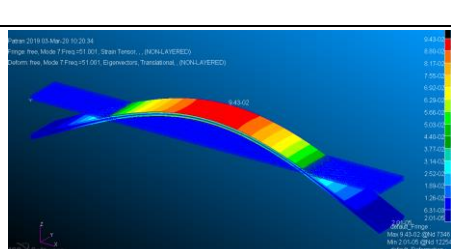
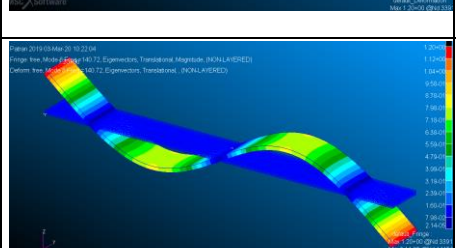
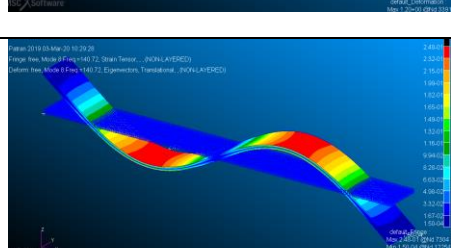
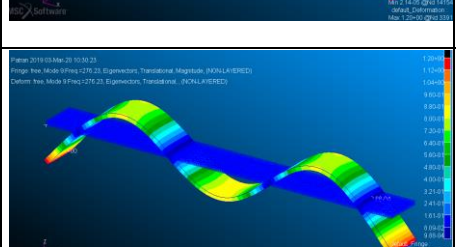
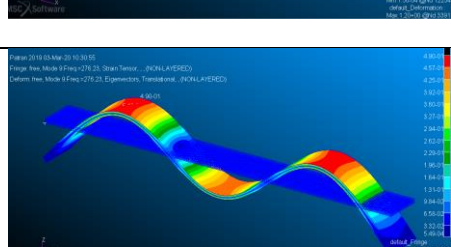
Oluşturulan kiriş modeli için serbest sınır koşullarında modal analiz yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre elde edilen doğal frekans değerleri, mod şekilleri ve düğüm noktaları ile birlikte verilmiştir. İlk altı serbest mod 0 Hz frekansında bulunmuştur.

Serbest modal analizlerde hem yer değiştirme mod şekilleri hem de gerinim dağılımı incelenmiştir. Çözümleme sonuçlarında bant genişliği olarak 0-700 Hz arasındaki modlar incelenmiştir. Bu frekans bandında farklı eksenlerde kiriş eğilme modları ve burulma modları gibi farklı karakteristikte modlar görülmektedir. Düğüm noktaları 1. eğilme modunda burundan 0,225 m olarak bulunmuştur. 2. eğilme modunda biri kütle merkezinde olmak üzere diğer ikisi burundan 0,130 m uzunlukta düğüm noktaları oluşmaktadır. Serbest sınır koşullarında modal yer değiştirme şekilleri ve gerilme tensörleri Çizelge 4.3 ile verilmiştir.

Çizelge 4.3. Kiriş serbest sınır koşullarında modal analiz sonuçları

Modlar	Frekans (Hz)	Öz Vektör, Öteleme Yönü	Gerinim Tensörü
Mod 1 Serbest mod	0,00		
Mod 2 Serbest mod	0,00		
Mod 3 Serbest mod	0,00		

Çizelge 4.3. (devam) Kiriş serbest sınır koşullarında modal analiz sonuçları

Mod 4 Serbest mod	0,00	 
Mod 5 Serbest mod	0,00	 
Mod 6 Serbest mod	0,00	 
Mod 7 1. Eğilme modu	51,00	 
Mod 8 2. Eğilme modu	140,72	 
Mod 9 3. Eğilme modu	276,23	 

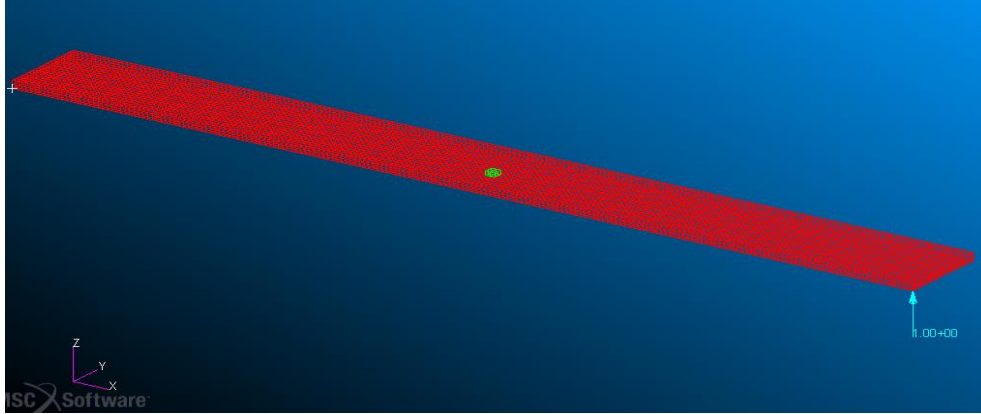
Çizelge 4.3. (devam) Kiriş serbest sınır koşullarında modal analiz sonuçları

Mod 10 1. Burulma modu	294,01		
Mod 11 4. Eğilme modu	457,26		
Mod 12 1. Eksen dışı eğilme modu	492,56		
Mod 13 2. Burulma modu	592,39		
Mod 14 5. Eğilme modu	683,89		

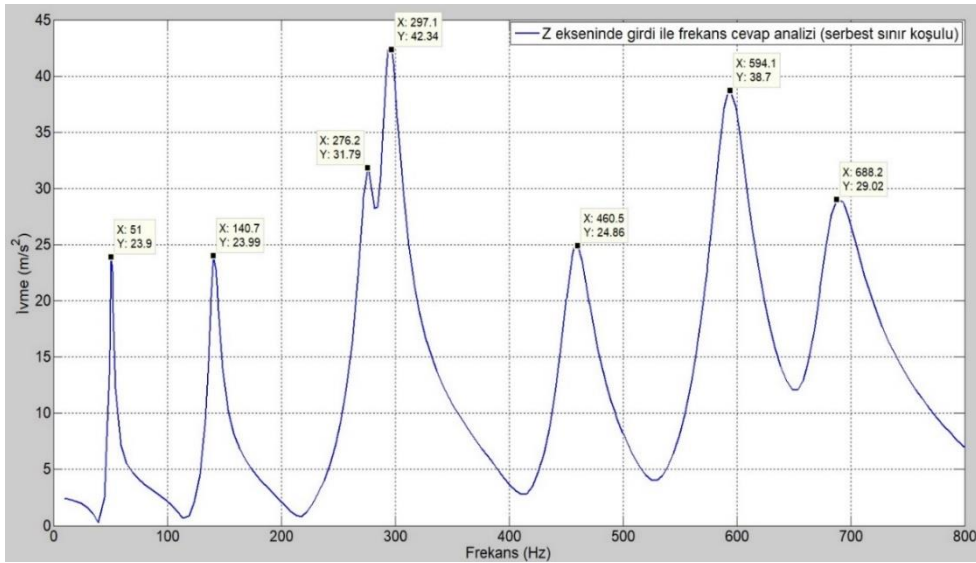
4.1.3. Kiriş serbest sınır koşullarında tek eksenli modal frekans cevap analizi

Kiriş modelinin frekans cevap analizleri MSC Patran sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Tahrik noktası belirlenirken 0-700 Hz arasında herhangi bir modun düğüm noktasına tekabül etmeyen kiriş uç noktası seçilmiştir (Bkz. Şekil 4.2). Bu noktaya z ekseninde 1N'luk birim kuvvet tanımlanarak modal frekans cevap analizi yapılmıştır. Yapılan analizde kritik sönüm 0,03 olarak girilmiştir. Tahrik verilen noktadan bileşke ivme cevabı için FCF'ler çizdirilmiştir. Şekil 4.3 ile verilen FCF'de görüldüğü üzere tahrik

yalnızca z eksenindeyken transfer fonksiyonunda modal analizlerde 492 Hz’de görülen 1. eksen dışı eğilme modu gözlenememiştir.



Şekil 4.2. Serbest sınır koşullarında tek eksenli modal frekans cevabı analizi modeli

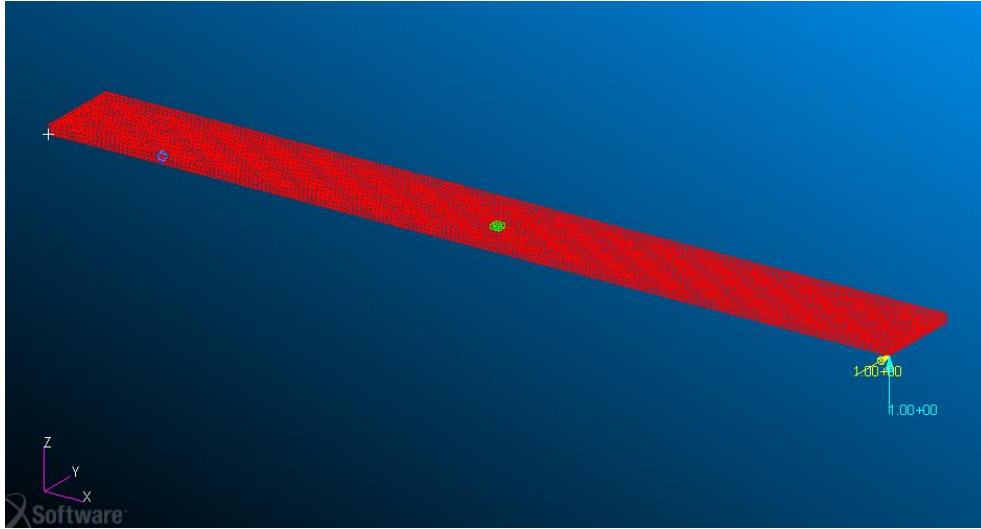


Şekil 4.3. Serbest sınır koşullarında tek eksenli modal frekans cevabı analizi

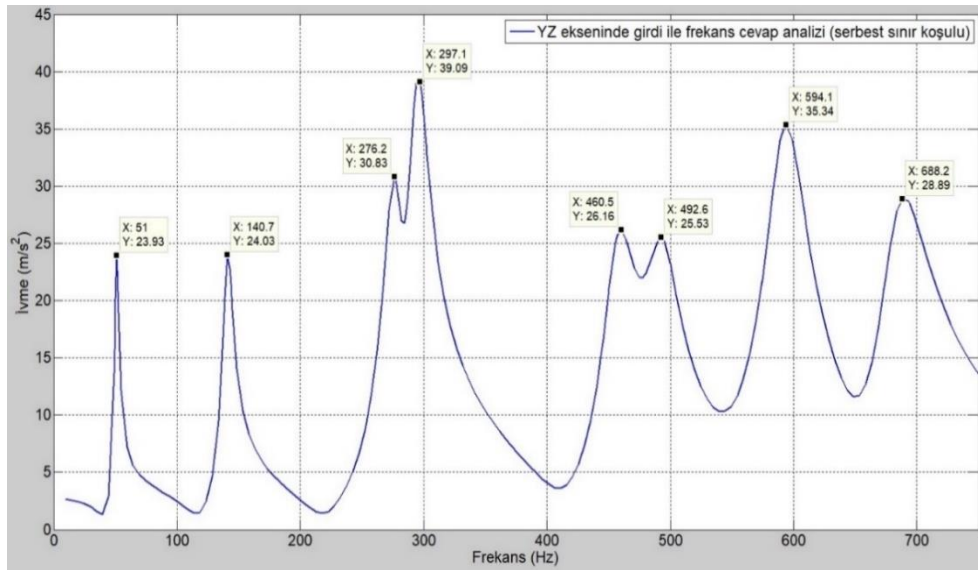
4.1.4. Kiriş serbest sınır koşullarında iki eksenli modal frekans cevabı analizi

Kiriş modelinin frekans cevabı analizleri MSC Patran sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Tahrik noktası belirlenirken 0-700 Hz arasında herhangi bir modun düğüm noktasına tekabül etmeyen kiriş uç noktası seçilmiştir (Bkz. Şekil 4.4). Bu noktaya hem z ekseninde hem de y ekseninde 1N’luk birim kuvvet tanımlanarak modal frekans cevabı analizi yapılmıştır. Yapılan analizde kritik sönüm 0,03 olarak girilmiştir. Tahrik verilen noktadan bileşke ivme cevabı için FCF çizdirilmiştir. Şekil 4.5 ile verilen FCF’de

görüldüğü üzere modal analizlerde 492,6 Hz'de görülen ancak tahrik yalnızca z eksenindeyken transfer fonksiyonunda elde edilemeyen 1. eksen dışı eğilme modu, hem y hem de z ekseninde tahrik durumunda 492,6 Hz'de ortaya çıkmaktadır.



Şekil 4.4. Serbest sınır koşullarında iki eksenli modal frekans cevap analizi modeli

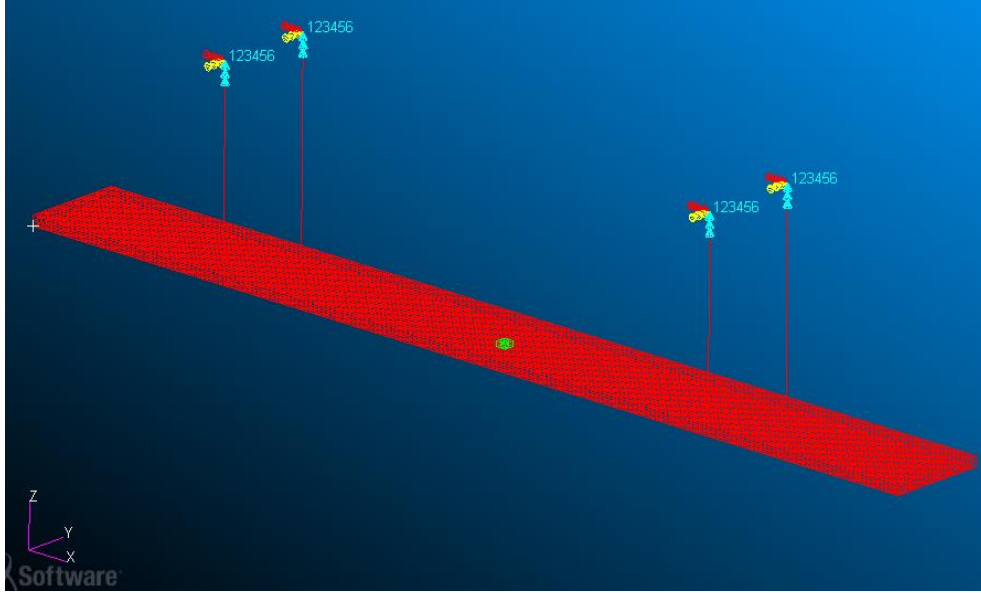


Şekil 4.5. Serbest sınır koşullarında iki eksenli modal frekans cevap analizi

4.1.5. Kiriş Yay Destekli Sınır Koşullarında Modal Analiz Sonuçları

Modal analiz çalışmaları kiriş analiz modeli ve test kurulumunu en iyi şekilde ifade etmek üzere yay desteği de analizlere dahil edilip serbest analiz modeli ve test sonuçları ile farklarını ortaya koymak üzere tekrarlanmıştır. Bu modelde kirişin 1. eğilme modundaki

düğüm noktalarına bar elemanlar eklenmiş ve diğer uçlarından ankastre sınır koşulu verilerek sabitlenmiştir (Bkz. Şekil 4.6). Ardından modal analiz yapılmıştır. Modal yer değiştirme şekilleri ve gerinim tensörleri Çizelge 4.4 ile verilmiştir.

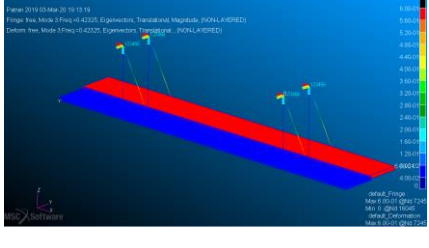
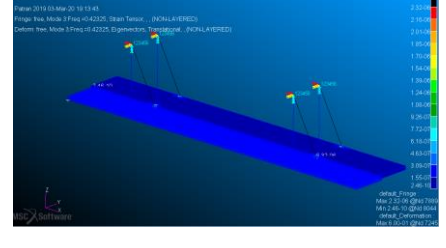
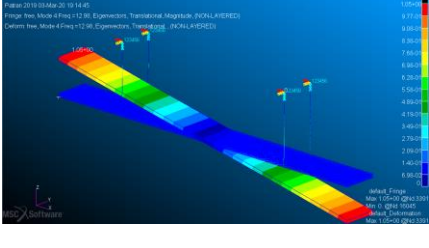
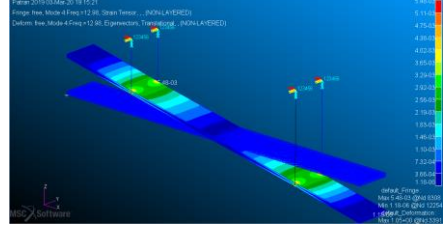
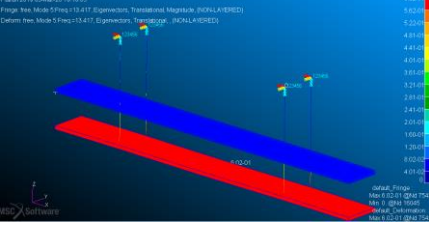
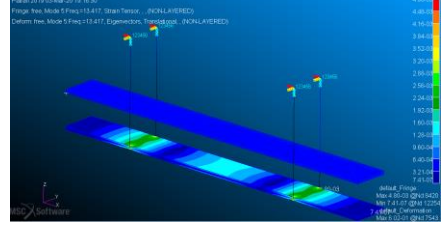
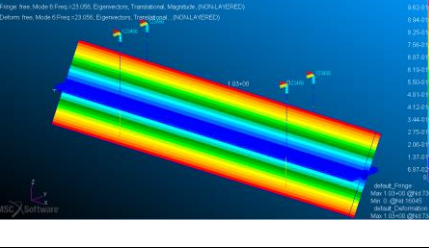
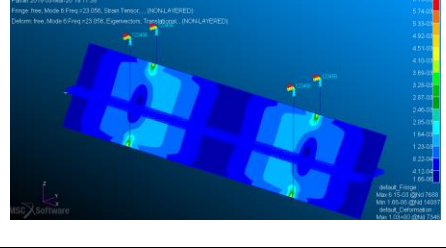
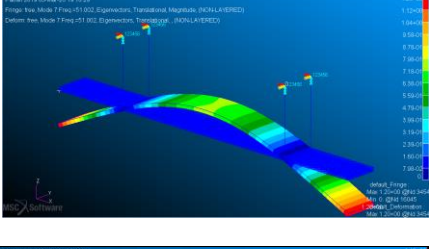
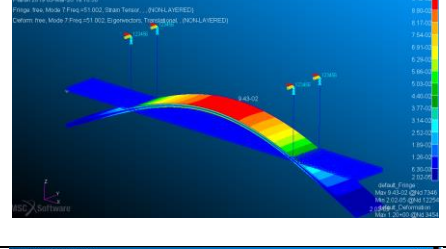
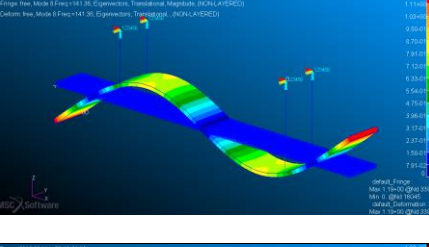
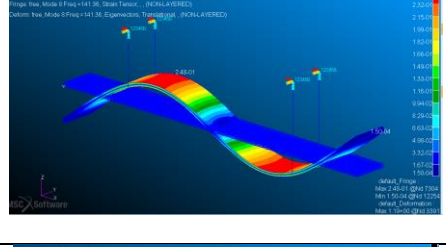
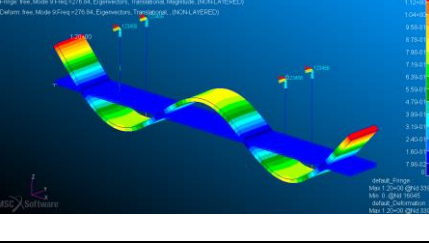
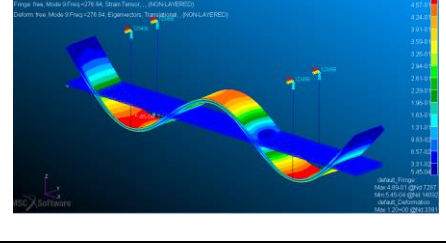


Şekil 4.6. Yay destekli kiriş modeli

Çizelge 4.4. Kiriş yay destekli sınır koşullarında modal analiz sonuçları

Mod Numarası	Frekans (Hz)	Öz Vektör, Öteleme Yönü	Gerinim Tensörü
Mod 1 Serbest mod	0,42		
Mod 2 Serbest mod	0,42		

Çizelge 4.4. (devam) Kiriş yay destekli sınır koşullarında modal analiz sonuçları

Mod 3 Serbest mod	0,42		
Mod 4 Serbest mod	12,98		
Mod 5 Serbest mod	13,42		
Mod 6 Serbest mod	23,06		
Mod 7 1. Eğilme modu	51,00		
Mod 8 2. Eğilme modu	141,36		
Mod 9 3. Eğilme modu	276,84		

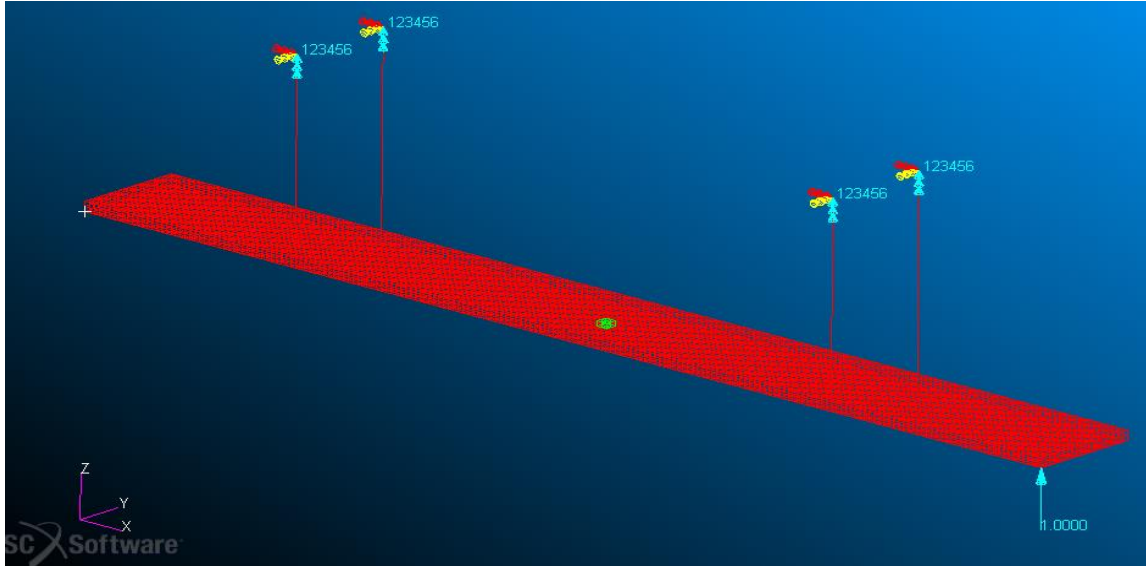
Çizelge 4.4. (devam) Kiriş yay destekli sınır koşullarında modal analiz sonuçları

Mod 10 1. Burulma modu	295,08		
Mod 11 4. Eğilme modu	457,47		
Mod 12 1. Eksen dışı eğilme modu	492,56		
Mod 13 2. Burulma modu	592,43		
Mod 14 5. Eğilme modu	683,89		

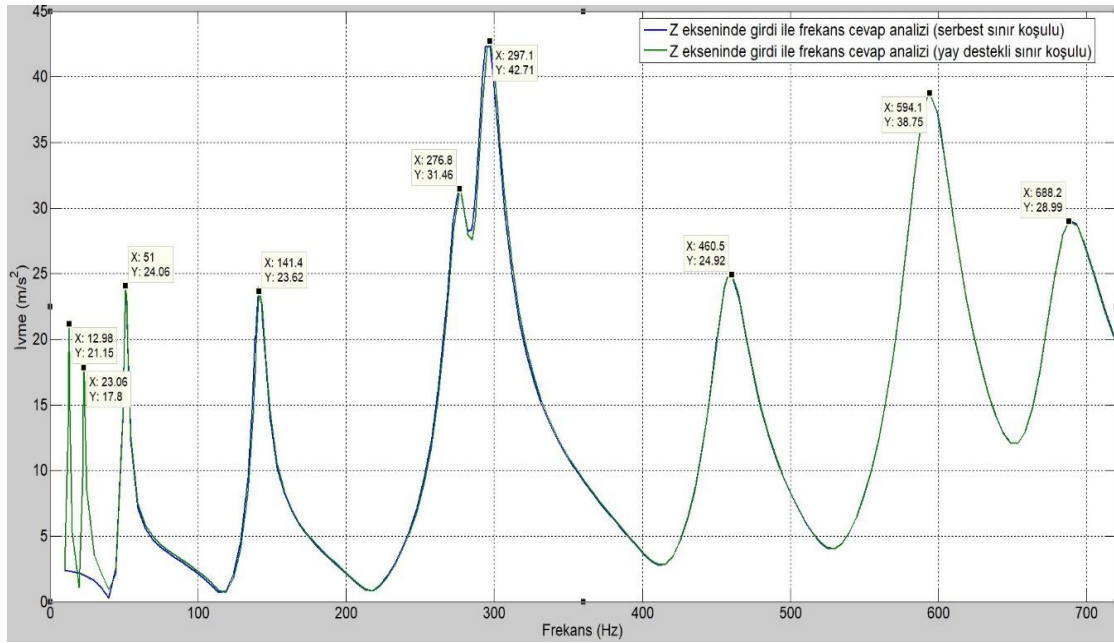
4.1.6. Kiriş yay destekli sınır koşullarında tek eksenli modal frekans cevap analizi

Yay destekli kiriş modelinin frekans cevap analizleri MSC Patran sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Tahrik noktası belirlenirken 0-700 Hz arasında herhangi bir modun düğüm noktasına tekabül etmeyen kiriş uç noktası seçilmiştir. (Bkz. Şekil 4.7) Bu noktaya z ekseninde 1N'luk birim kuvvet tanımlanarak modal frekans cevap analizi yapılmıştır. Yapılan analizde kritik sönüm 0,03 olarak girilmiştir.

Tahrik verilen noktadan bileşke ivme cevabı için FCF çizdirilmiştir. FCF Şekil 4.8 ile verilerek karşılaştırılmıştır. Sonuçlarda serbest cisim modlarında farklılık görülmektedir ancak eğilme ve burulma modlarında önemli bir fark gözlemlenmemiştir.



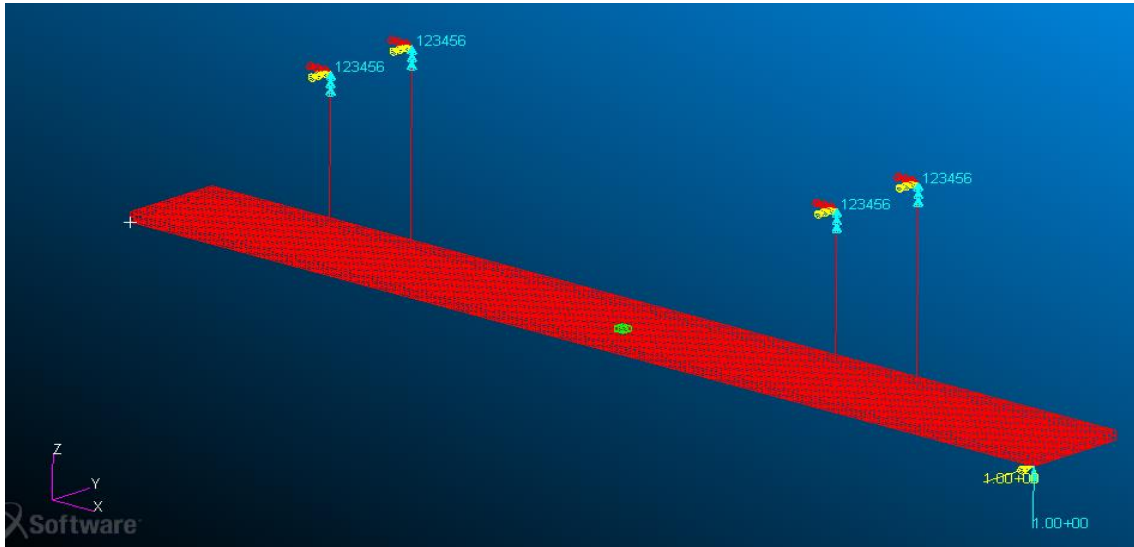
Şekil 4.7. Yay destekli sınır koşullarında tek eksenli modal frekans cevabı analizi modeli



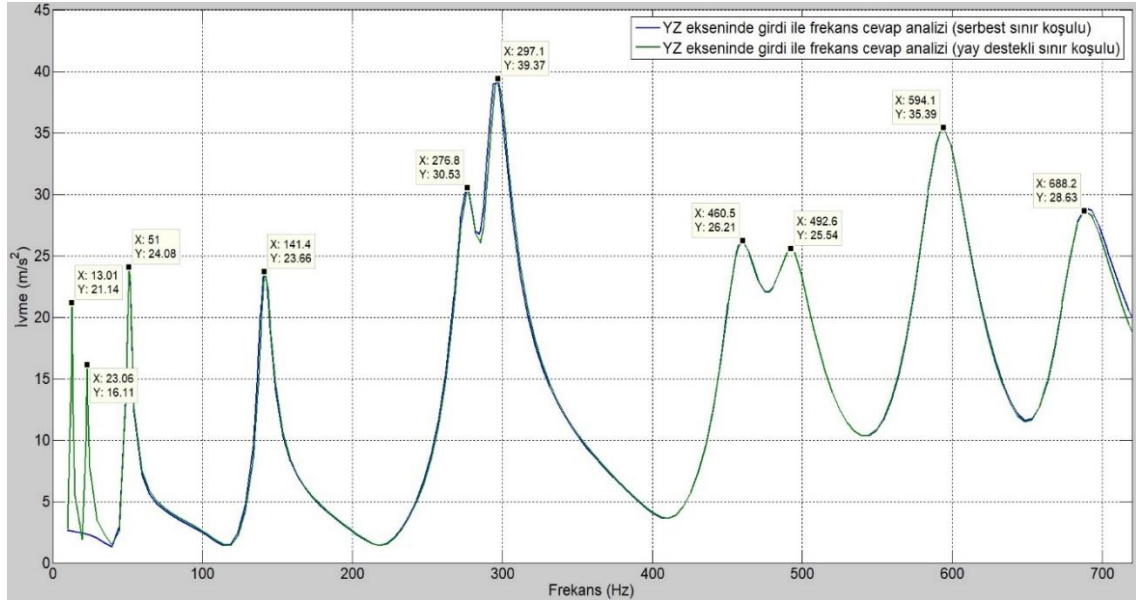
Şekil 4.8. Yay destekli sınır koşullarında tek eksenli modal frekans cevabı analizi ve serbest sınır koşulu ile karşılaştırılması

4.1.7. Yay destekli sınır koşullarında iki ekseninde modal frekans cevap analizi

Yay destekli kiriş modelinin frekans cevap analizleri MSC Patran sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Tahrik noktası belirlenirken 0-700 Hz arasında herhangi bir modun düğüm noktasına tekabül etmeyen kiriş uç noktası seçilmiştir. (Bkz. Şekil 4.9) Bu noktaya hem z ekseninde hem de y ekseninde 1N'luk birim kuvvet tanımlanarak modal frekans cevap analizi yapılmıştır. Yapılan analizde kritik sönüm 0,03 olarak girilmiştir. Hem yay destekli modelin hem de serbest koşullardaki modelin analiz sonuçlarından FCF'leri Şekil 4.10 ile verilerek karşılaştırılmıştır. Sonuçlarda serbest cisim modlarında farklılık görülmektedir ancak eğilme ve burulma modlarında önemli bir fark gözlemlenmemiştir. Serbest sınır koşullarında tek ekseninde ve iki ekseninde birden yapılan analizlerde de görüldüğü üzere tahrik yalnızca z eksenindeyken transfer fonksiyonunda modal analizlerde 492,6 Hz'de görülen 1. eksen dışı eğilme modu gözlenememiştir. Ancak y eksenine eklenen tahrik ile 1. eksen dışı eğilme modu 492,6 Hz'de ortaya çıkmaktadır.



Şekil 4.9. Yay destekli sınır koşullarında iki ekseninde modal frekans cevap analizi modeli



Şekil 4.10. Yay destekli sınır koşullarında iki eksende modal frekans cevap analizi ve serbest sınır koşulu ile karşılaştırılması

4.1.8. Kiriş modal test düzeneği

Modal test için 10x100x1000 mm boyutlarında AL6061 malzeme özelliklerine sahip alüminyum içi dolu bir lama kiriş düğüm noktalarından elastik yaylar ile asılarak serbest sınır koşulları oluşturulmuştur. Test kalemi kütlesi ölçülerek 2,8 kg bulunmuştur. Test kalemi üzerine 11 adet 3 eksenli PCB marka 356A16 model ivmeölçer ve 5 adet PCB marka 740B02 model dinamik gerinimölçer kullanılmıştır. (Bkz. Resim 4.1) Veri toplama sistemi ve kablağı Resim 4.2 ile verilmiştir. Yazılımda kullanılan ölçüm ayarlarına göre 4096 Hz örnekleme frekansı ve 0,25 Hz frekans çözünürlüğü kullanılmıştır. Her ölçer noktasından 10 vuruş yapılmıştır.



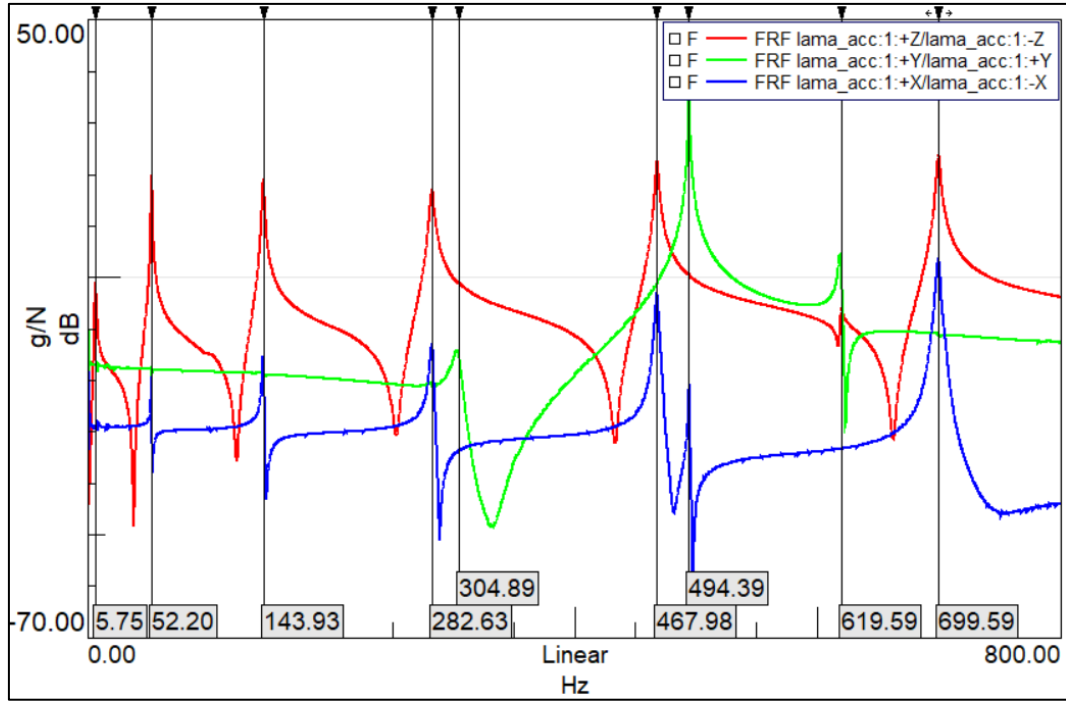
Resim 4.1. Test kurulumu



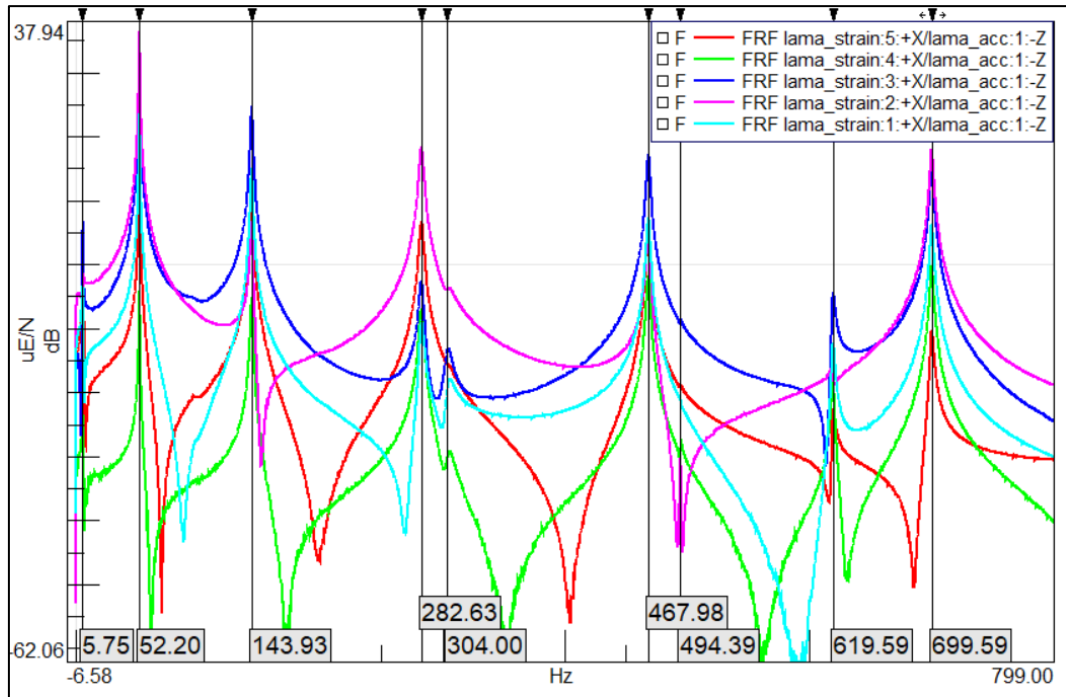
Resim 4.2. Veri toplama sistemi ve kablolama

4.1.9. Kiriş darbe çekici ile modal test

Kiriş darbe çekici ölçümleri sırasında 39 kanaldan veri toplanmıştır. Her ivmeölçer noktasından darbe çekici ile vuruş gerçekleştirilmiştir. Darbe çekici ile hem metal hem de polimer uç kullanılarak vuruşlar yapılmıştır. Askılama sisteminin doğal frekansı 5,75 Hz olarak bulunmuştur. 16 farklı vuruştan 38 cevap toplanarak 608 transfer cevap fonksiyonu elde edilmiştir. Bununla birlikte frekans bandında belirtilen 5 konum için dinamik gerinim cevabı sonuçlar içerisinde bulunmaktadır. Şekil 4.11 ile kirişin uç kısmında yer alan 1 noktasından X,Y ve Z eksenlerinde sırayla tahrik edildiğinde aynı noktadan X, Y ve Z ekseninde ivme cevabı verilmiştir. Şekil 4.12 ile kiriş 1 noktasından tahrik edildiğinde 1-5 numaralı gerinimölçerlerden alınan gerinim cevapları verilmiştir. Darbe çekici testinden elde edilen doğal frekans ve mod şekilleri Çizelge 4.5 ile verilmiştir. MAC matrisi Şekil 4.13 ile verilmiştir.

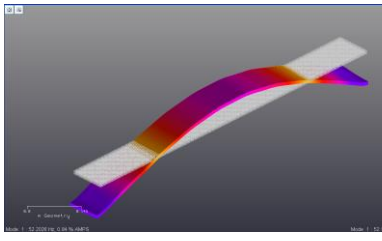
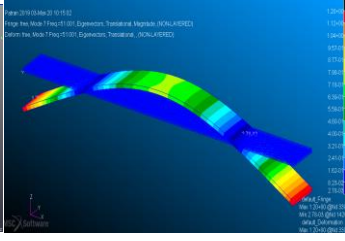
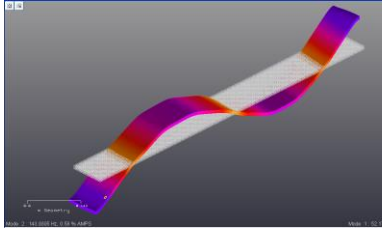
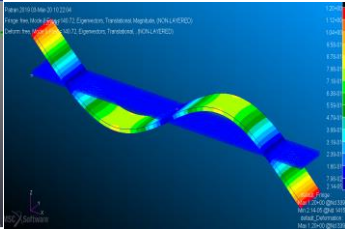
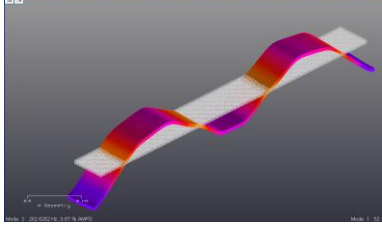
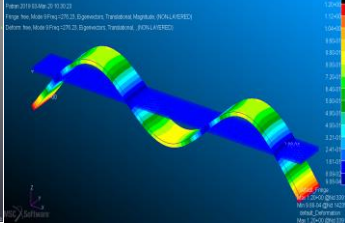
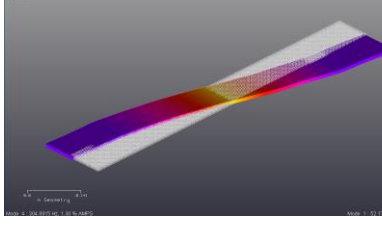
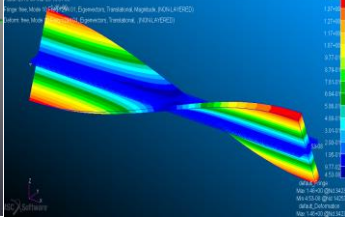
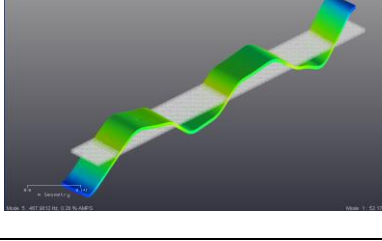
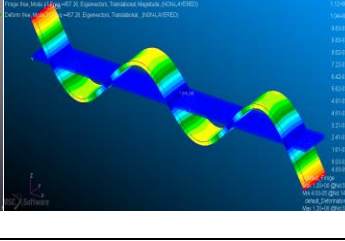
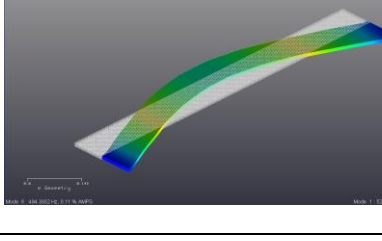
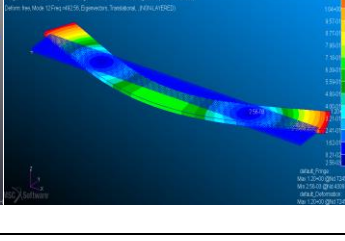


Şekil 4.11. Kiriş 1 konumu için X,Y ve Z eksenlerinde tahrik edildiğinde nokta frekans cevap fonksiyonu

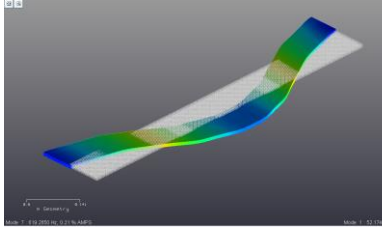
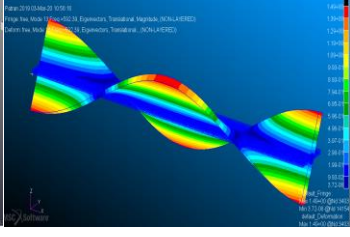
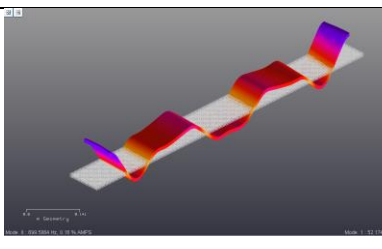
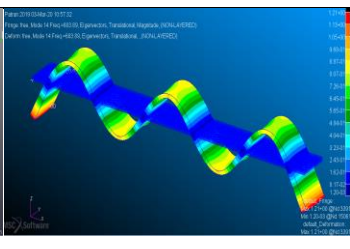


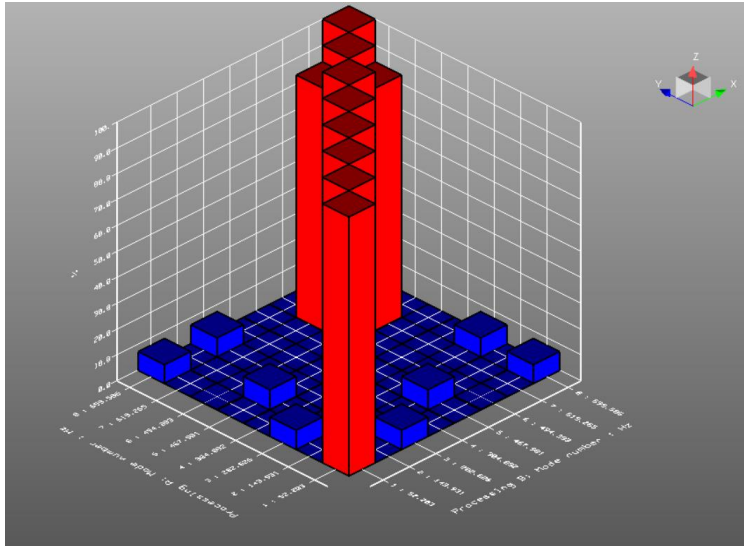
Şekil 4.12. Kiriş 1 konumu Z ekseninde tahrik edildiğinde gerinimölçer cevapları

Çizelge 4.5. Kiriş yay destekli sınır koşullarında modal test ve analiz sonuçları

Mod Numarası	Frekans (Hz)	Modal Test Öz Vektörleri, Öteleme Yönü	Sonlu Elemanlar Analizi Öz Vektörleri, Öteleme Yönü
Mod 7 1. Eğilme modu	52,20 (Test) 51,00 (Analiz)		
Mod 8 2. Eğilme modu	143,93 (Test) 141,36 (Analiz)		
Mod 9 3. Eğilme modu	282,63 (Test) 276,84 (Analiz)		
Mod 10 1. Burulma modu	304,89 (Test) 295,08 (Analiz)		
Mod 11 4. Eğilme modu	467,98 (Test) 457,47 (Analiz)		
Mod 12 1. Eksen dışı eğilme modu	494,39 (Test) 492,56 (Analiz)		

Çizelge 4.5. (devam) Kiriş yay destekli sınır koşullarında modal test ve analiz sonuçları

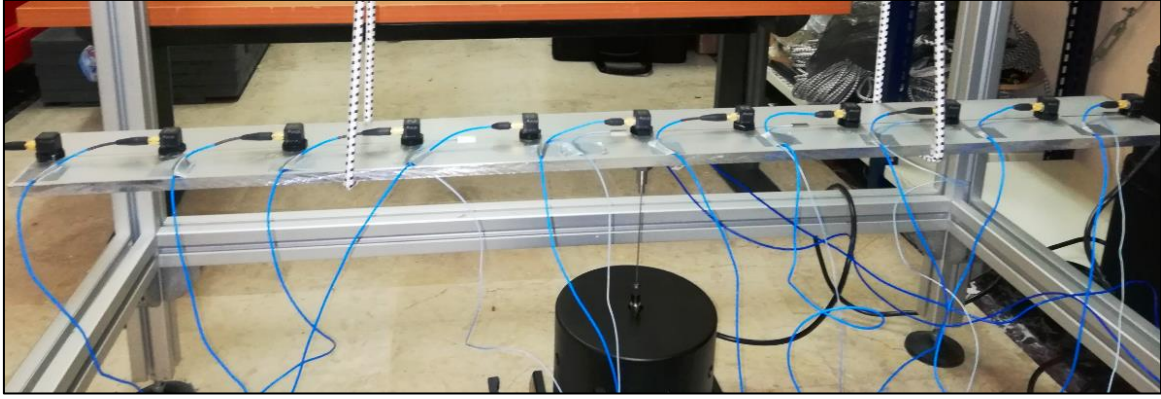
Mod 13 2. Burulma modu	619,59 (Test) 592,43 (Analiz)		
Mod 14 5. Eğilme modu	699,59 (Test) 683,89 (Analiz)		



Şekil 4.13. MAC matrisi

4.1.10. Kiriş tek ekseninde modal sarsıcı ile tahrik durumu için modal test

Modal sarsıcı öncelikle 6 numaralı ölçer konumuna yerleştirilerek testler yapılmıştır. (Bkz. Resim 4.3). Testlere başlarken farklı sinyal tipleri, enerji seviyeleri ve pencereler kullanılmıştır. Sarsıcı bu konumdayken yapılan testler ve detayları sırasıyla verilmiştir.



Resim 4.3. Tek eksenli tek noktadan modal sarsıcı ile tahrik durumu

Aralıklı gelişigüzel titreşim sinyali

Aralıklı gelişigüzel titreşim sinyali ile 10-2048 Hz arası taranmıştır. Testler veri toplama 2048 Hz'lik bant genişliği için 4096 örnekleme frekansında 0,25 Hz frekans çözünürlüğü ile yapılmıştır. Aralıktaki bekleme zamanı toplam sinyalin %80'lik dilimini oluşturmaktadır. Sinyal içeriği beyaz gürültü olarak ile 40 kez art arda uygulanarak ortalaması alınmıştır. Bu sinyal tipiyle öncelikle farklı enerji seviyelerinde düz referans olarak adlandırılan pencere uygulanmamış testler ardından hanning referans pencere uygulanarak maddelerde yer alan testler yapılmıştır;

- a) 0,5 V düz referans pencereleme
- b) 1,0 V düz referans pencereleme
- c) 1,5 V düz referans pencereleme
- d) 3,0 V düz referans pencereleme
- e) 6,0 V düz referans pencereleme
- f) 9,0 V düz referans pencereleme
- g) 0,5 V hanning referans pencereleme
- h) 1,0 V hanning referans pencereleme

Sürekli gelişigüzel titreşim sinyali

Sürekli gelişigüzel titreşim sinyali ile 10-2048 Hz arası taranmıştır. Testler veri toplama 2048 Hz'lik bant genişliği için 4096 örnekleme frekansında 0,25 Hz frekans çözünürlüğü

ile yapılmıştır. Farklı enerji seviyelerinde düz referans olarak adlandırılan pencere uygulanarak maddelerde yer alan testler yapılmıştır.

- a) 0,5 V düz referans pencereleme
- b) 1,0 V düz referans pencereleme
- c) 1,5 V düz referans pencereleme
- d) 3,0 V düz referans pencereleme

Benzetik gelişigüzel titreşim sinyali

10-2048 Hz arası 0,002 V²/Hz girerek taranmıştır. Bu değer 2,01 V rms'e denk gelmektedir. Testlerde veri toplama 3200 Hz'lik bant genişliği için 4096 örnekleme frekansında 0,1953 Hz frekans çözünürlüğü ile yapılmıştır.

Periyodik gelişigüzel titreşim sinyali

Periyodik gelişigüzel titreşim sinyali ile 10-2048 Hz arası 0,002 V²/Hz girerek taranmıştır. Bu değer 2,01 V rms'e denk gelmektedir. Testlerde veri toplama 6400 Hz örnekleme frekansında 0,1953 Hz frekans çözünürlüğü ile yapılmıştır.

Periyodik değişken sinyal

Periyodik değişken sinyali ile 10-2048 Hz arası taranmıştır. Testler veri toplama 2048 Hz'lik bant genişliği için 4096 Hz örnekleme frekansında 0,25 Hz frekans çözünürlüğü ile yapılmıştır. Uygulanan enerji seviyelerine göre yapılan testler şu şekildedir;

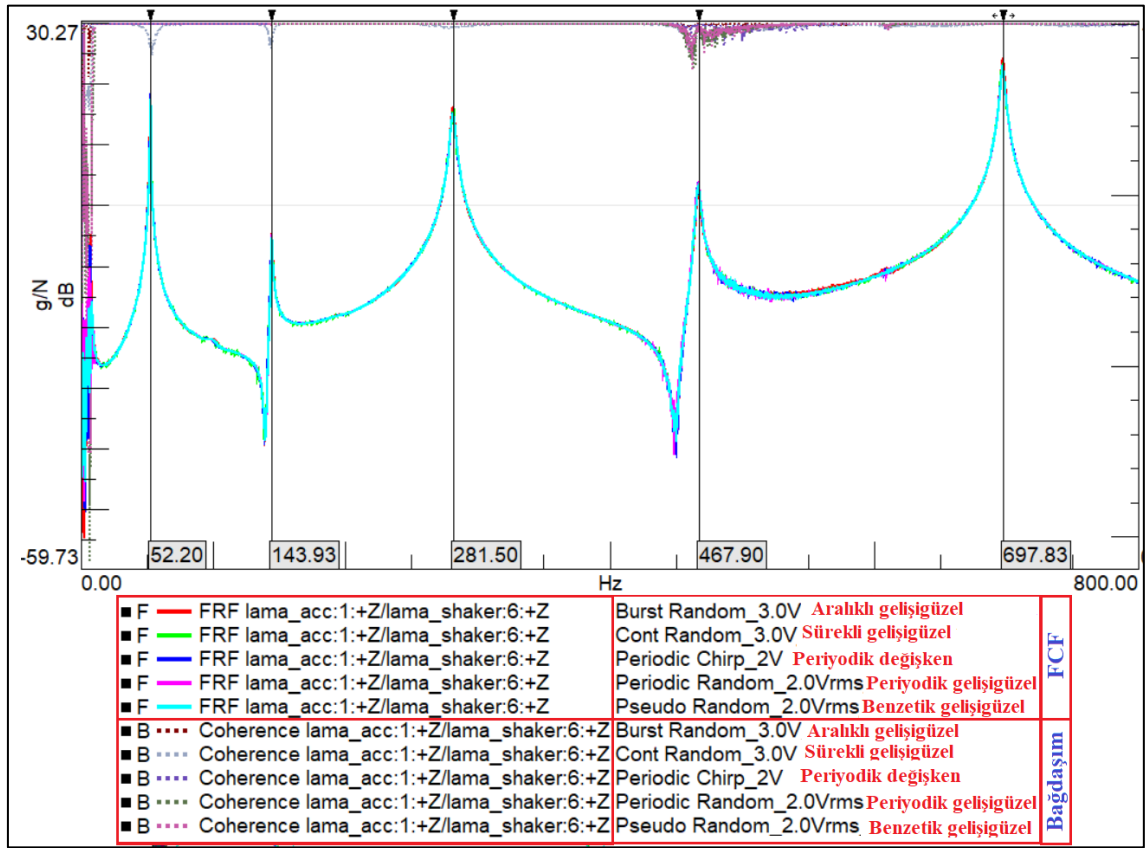
- a) 0,2 V düz referans pencereleme
- b) 0,5 V düz referans pencereleme
- c) 1,0 V düz referans pencereleme
- d) 2,0 V düz referans pencereleme

Sinüs sinyali

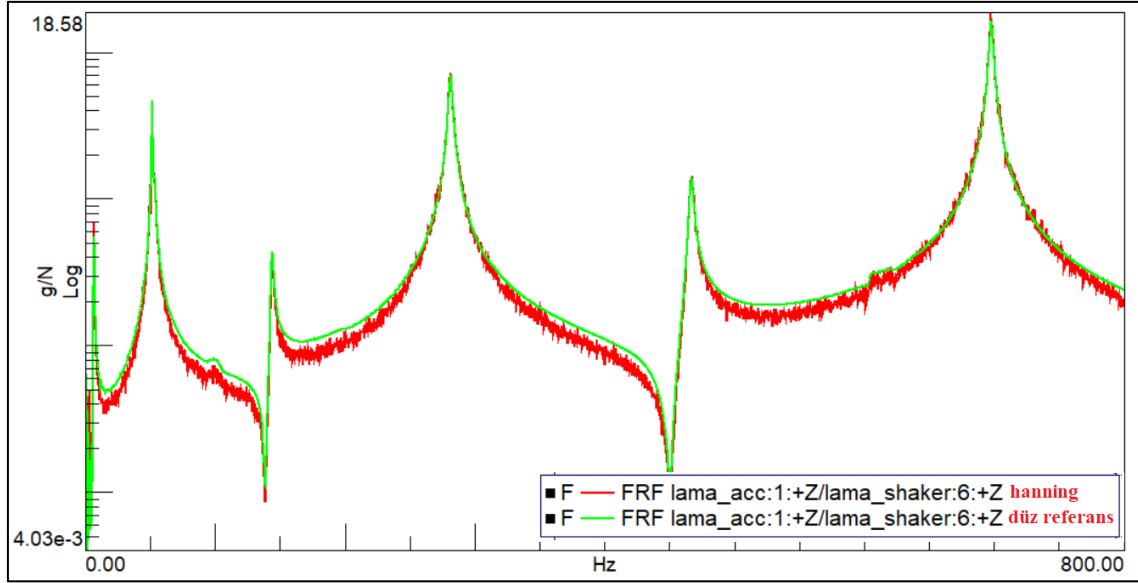
Birinci doğal frekans olan 52 Hz için 0,3 V ve 0,5 V enerji seviyelerinde 2 test yapılmıştır. İkinci doğal frekans olan 143 Hz'de 0,5 V enerji seviyesinde test yapılmıştır.

Şekil 4.14 ile farklı sinyal tiplerinin FCF'leri ve bağdaşım grafikleri incelenmiştir. Buna göre en iyi bağdaşım değeri aralıklı gelişigüzel titreşim sinyal tipinde bulunmaktadır. Bu doğrultuda iki sarsıcı ile yapılan testlere aralıklı gelişigüzel titreşim sinyali ile devam edilmiştir.

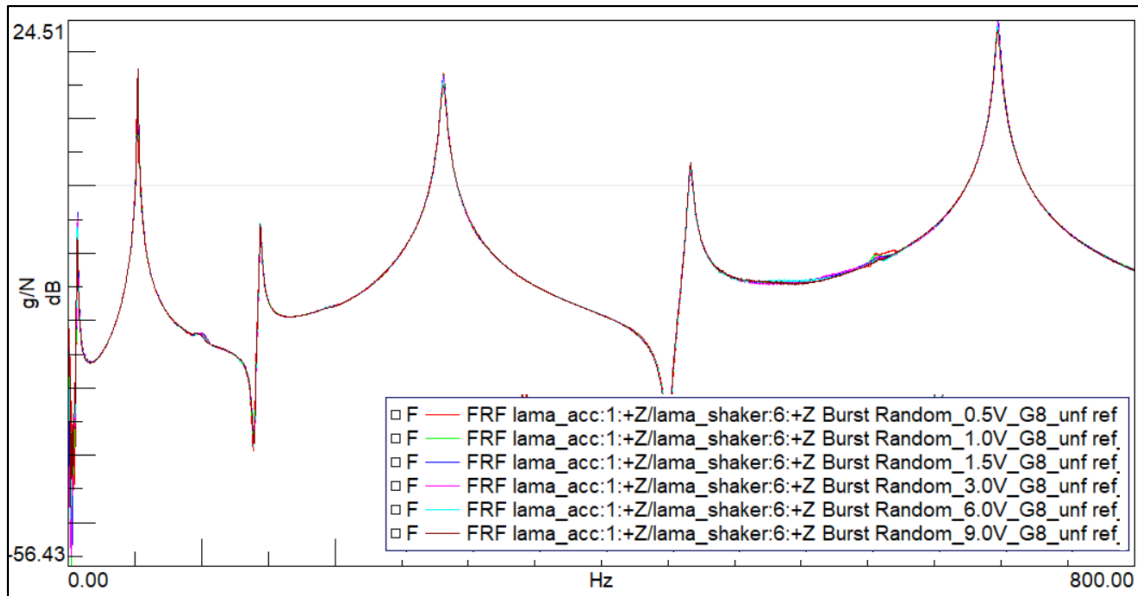
Pencereleme konusunda başlangıç ve bitiş anı 0 olan aralıklı gelişigüzel titreşim sinyali, daha iyi sinyal/gürültü oranı sebebiyle düz referans pencereleme kullanılmasına karar verilmiştir. (Bkz. Şekil 4.15) Ardından doğrusallık durumunu kontrol etmek amacıyla aralıklı gelişigüzel titreşim ve düz pencere kullanılarak kademeli olarak artan (0,5 V - 9,0 V) enerji seviyelerinde testler değerlendirilmiştir. Şekil 4.16 ile farklı enerji seviyelerindeki FCF'ler gösterilmiş olup yapıda herhangi bir doğrusal olmayan duruma rastlanmamıştır.



Şekil 4.14. Farklı sinyal tipleri için FCF'ler ve bağdaşım fonksiyonları



Şekil 4.15. Aralıklı gelişigüzel titreşim sinyalinde hanning ve düz referans pencereleme yöntemlerinin karşılaştırılması



Şekil 4.16. Aralıklı gelişigüzel titreşim altında kademeli olarak artan (0.5 V-9.0 V) enerji seviyelerinde FCF'ler

4.1.11. Kiriş tek ekseninde iki noktadan modal sarsıcı ile tahrik durumu için modal test

Modal sarsıcılardan biri öncelikle birinci modun en çok hareket eden bölgesi olan 6 numaralı ölçer konumuna yerleştirilerek, diğeri ise 2. modun en çok hareket eden bölgesi olan 8 numaralı ölçer konumuna yerleştirilerek testler z eksenini zorlayacak şekilde

yapılmıştır. (Bkz. Resim 4.4). Sarsıcı bu konumdayken yapılan testler ve detayları sırasıyla verilmiştir.

Aralıklı gelişigüzel titreşim sinyali

10-2048 Hz arası taranmıştır. Testler veri toplama 2048 Hz'lik bant genişliği için 4096 Hz örnekleme frekansında 0,25 Hz frekans çözünürlüğü ile yapılmıştır. Aralıktaki bekleme zamanı toplam sinyalin %80'lik dilimini oluşturmaktadır. Sinyal içeriği beyaz gürültü olarak ile 40 kez art arda uygulanarak ortalaması alınmıştır. Bu konfigürasyonda;

- a) 1,0 V düz referans pencereleme
- b) 2,0 V düz referans pencereleme
- c) 3,0 V düz referans pencereleme uygulanarak testler yapılmıştır.



Resim 4.4. Tek eksenli iki noktadan modal sarsıcı ile tahrik durumu

4.1.12. Kiriş modal sarsıcı ile çok eksenli tahrik durumu için modal test

Modal sarsıcılardan biri öncelikle birinci modun en çok hareket eden bölgelerinden olan 6 numaralı ölçer konumuna Z yönünde yerleştirilerek, diğer modal sarsıcı ise aynı konumun Y yönüne yerleştirilerek testler yapılmıştır. (Bkz. Resim 4.5). Sarsıcı bu konumdayken yapılan testler ve detayları sırasıyla verilmiştir.

Aralıklı gelişigüzel titreşim sinyali

10-2048 Hz arası taranmıştır. Testler veri toplama 2048 Hz'lik bant genişliği için 4096 Hz örnekleme frekansında 0,25 Hz frekans çözünürlüğü ile yapılmıştır. Aralıktaki bekleme

zamanı toplam sinyalin %80'lik dilimini oluşturmaktadır. Sinyal içeriği beyaz gürültü olarak ile 40 kez art arda uygulanarak ortalaması alınmıştır. Testlerde sırasıyla;

- 1,0 V düz referans pencereleme
- 2,0 V düz referans pencereleme
- 3,0 V düz referans pencereleme uygulanarak testler yapılmıştır.



Resim 4.5. Modal sarsıcı ile çok eksenli tahrik durumu

4.2. MK-82 Mühimmatı Dinamik Karakterizasyonu

4.2.1. MK-82 mühimmatı teknik özellikleri

MK-82 mühimmatı MK serisi bomba olarak bilinen bir dizi düşük sürtünmeli, genel amaçlı hava bombalarından biridir. Bu seride 113 kg MK-81'den 907 kg MK-84'e kadar değişen dört bomba vardır. Günümüzde hala hizmette olan MK-80 serisi bombalar 1940'ların sonunda geliştirilmiştir. MK-82 genellikle yer hedeflerine saldırılarda kullanılan maliyet etkin bir bombadır. Mühimmat görünümü Şekil 4.17 ile gösterilmiştir. MK-82 mühimmatının fiziksel özellikleri Çizelge 4.6 ile verilmiştir [46].



Şekil 4.17. MK-82 mühimmatı

Çizelge 4.6. MK-82 mühimmatı fiziksel özellikleri

Toplam kütle	240,9 kg
Toplam uzunluk	2,30 m
En büyük çap	0,27 m
Kütle merkezi	0,96 m
Atalet momenti (yunuslama eksen)	49,8 kg.m ²
Atalet momenti (yalpalama eksen)	49,8 kg.m ²
Atalet momenti (dönme eksen)	2,0 kg.m ²

MK-82 mühimmatı dinamik karakterizasyonu kapsamında ön hazırlık amacıyla serbest sınır koşullarında modal analiz gerçekleştirilmiştir. Modal analizlerin amacı testler ile tam örtüşme sağlamak amacıyla değil, ön tahlil oluşturmak üzere yapılmıştır. Bu nedenle eksenel eğilme modlarının incelenmesine ağırlık verilmiştir. MK-82 mühimmatı dinamik karakterizasyonu testleri kapsamında MK-82 modeli üzerinde dinamik karakterin ortaya konulması amacıyla Çizelge 4.7 ile gösterilen testler gerçekleştirilmiştir. MK-82 kompleksi adı verilen bomba ve kuyruktan oluşan test bütünü sırasıyla darbe çekici testi, tek sarsıcı ile modal test, çoklu sarsıcıyı tek eksen de kullanarak yapılan modal test ve çoklu sarsıcıyı farklı eksenlerde kullanarak yapılan modal test gerçekleştirilmiştir. Testler eğitim bombası adı verilen gerçek mühimmatın dinamik eşdeğer benzeri üzerinde yapılmıştır. Bu dinamik eşdeğer mühimmat gerçek test mühimmatı ile aynı malzemeye sahip olmakla birlikte tek farklılık patlayıcı bölümün kütle ve atalet bilgilerini aynı şekilde tutacak bir dolgu malzemesi ile temsil edilmesi esasına dayanmaktadır.

Çizelge 4.7. MK-82 mühimmatı dinamik karakterizasyonu kapsamında yapılan testler

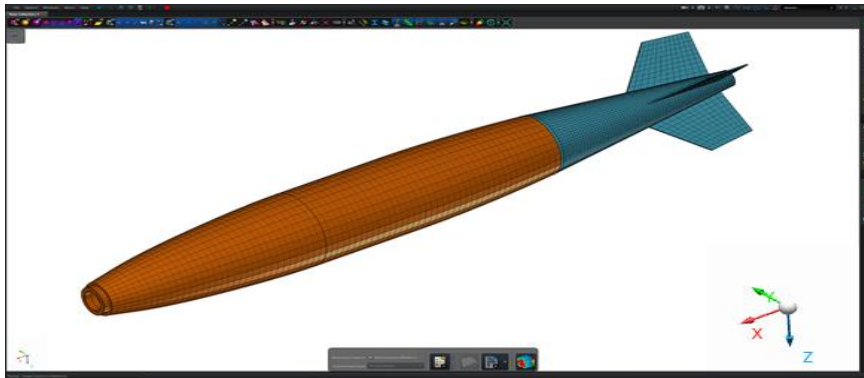
ÇOK EKSENLİ TİTREŞİM ÇALIŞMALARI TEST MATRİSİ			
TEST GEOMETRİSİ	TAHRİK ÇEŞİDİ	TAHRİK NOKTASI	TAHRİK ÇEŞİDİ
MK-82 KOMPLESİ	Darbe çekici Testi	Tüm ölçer takılı pozisyonlardan vuruş yapılmıştır.	Darbe
MK-82 KOMPLESİ	Tekli Girdi Çoklu Çıktı Sarsıcı Testi	MK 82 orta noktasından tek eksen de sarsıcı ile yatay tahrik (4 farklı kuvvet seviyesinde)	Aralıklı gelişigüzel titreşim
MK-82 KOMPLESİ	Tekli Girdi Çoklu Çıktı Sarsıcı Testi	MK 82 kuyruk noktasından tek eksen de sarsıcı ile dikey tahrik (4 farklı kuvvet seviyesinde)	Aralıklı gelişigüzel titreşim

Çizelge 4.7. (devam) MK-82 mühimmatı dinamik karakterizasyonu kapsamında yapılan testler

MK-82 KOMPLESİ	Tek Eksende Çoklu Girdi Sarsıcı Testi	Sarsıcı 1: MK 82 orta noktasında Sarsıcı 2: MK 82 kuyrukta (4 farklı kuvvet seviyesinde)	Aralıklı gelişigüzel titreşim
MK-82 KOMPLESİ	Çoklu Eksende Çoklu Girdi Sarsıcı Testi	Sarsıcı 1: MK 82 orta noktası Sarsıcı 2: 1. MK 82 kuyrukta (4 farklı kuvvet seviyesinde)	Aralıklı gelişigüzel titreşim
MK-82 KOMPLESİ	Çoklu Eksende Çoklu Girdi Sarsıcı Testi	Sarsıcı 1: MK 82 orta noktasında Sarsıcı 2: MK 82 orta noktasında	Aralıklı gelişigüzel titreşim
MK-82 KOMPLESİ	Çoklu Eksende Çoklu Girdi Sarsıcı Testi	Sarsıcı 1: MK 82 orta noktasında Sarsıcı 2: MK 82 burunda	Aralıklı gelişigüzel titreşim

4.2.2. MK-82 mühimmatı sonlu elemanlar ağı modeli

Analizlerde kullanılan MK-82 katı modeli ve sonlu elemanlar ağı modeli Şekil 4.18 ile gösterilmiştir. Modelde 8151 CHEXA elaman ile 15886 düğüm noktası içeren sonlu elemanlar ağı modeli oluşturulmuştur. MK-82 mühimmatının dış gövdesi çelik olarak modellenmiştir. Cansız mühimmatın içerisinde bulunan dolgu malzemesinin kütlesi ise, bomba kısmının geometrik merkezinde olacak şekilde katalogdaki kütle bilgisi doğrultusunda noktasal kütle olarak tanımlanmıştır. Kuyruk kısmı modellemesi ise alüminyum eşyönlü doğrusal elastik malzeme olarak yapılmıştır. Kuyruk ve bomba arasında esnemeyen bağlantı uygulanmıştır. Analizlerde birim t-mm-N-s birim sistemi kullanılmıştır.

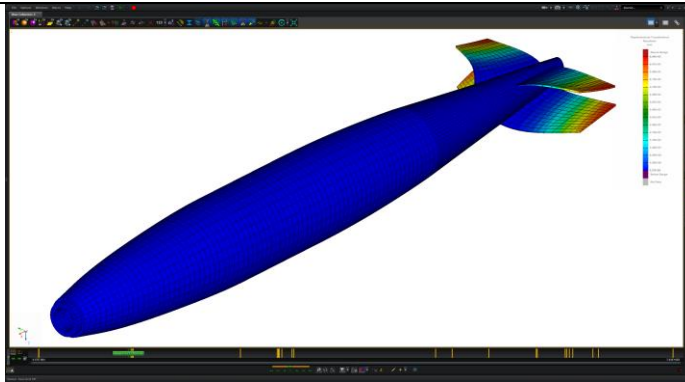
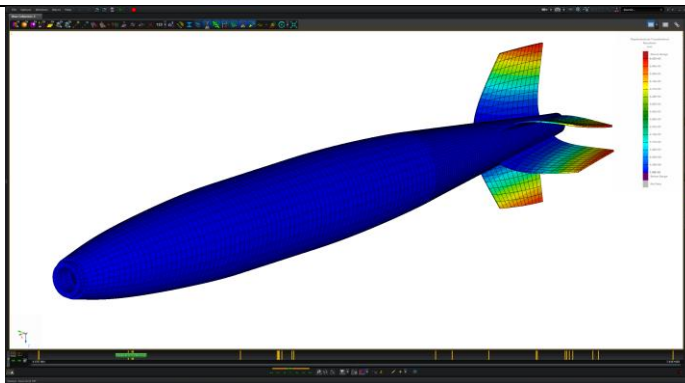
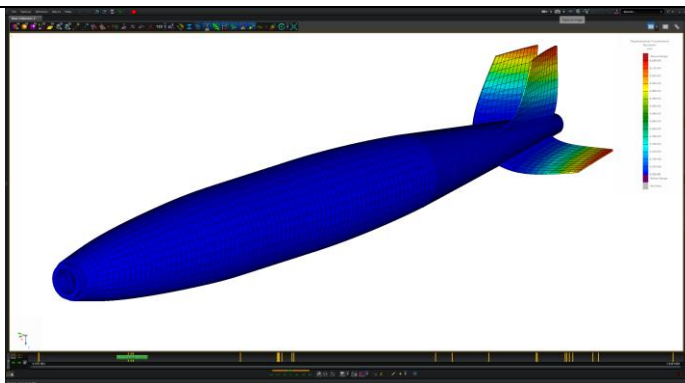


Şekil 4.18. MK-82 analiz katı modeli ve sonlu elemanlar ağı modeli

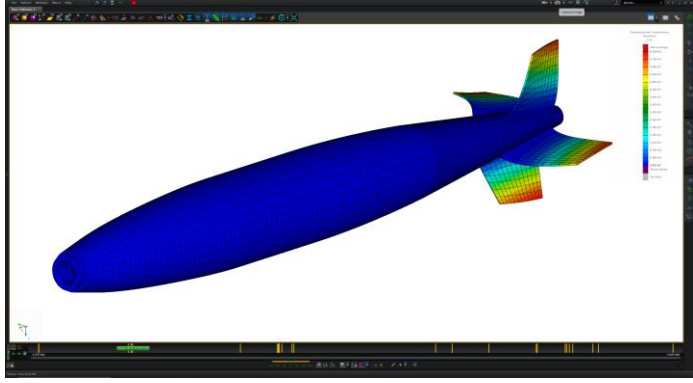
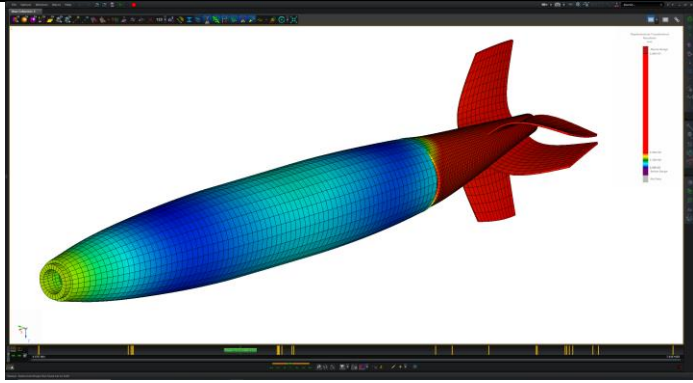
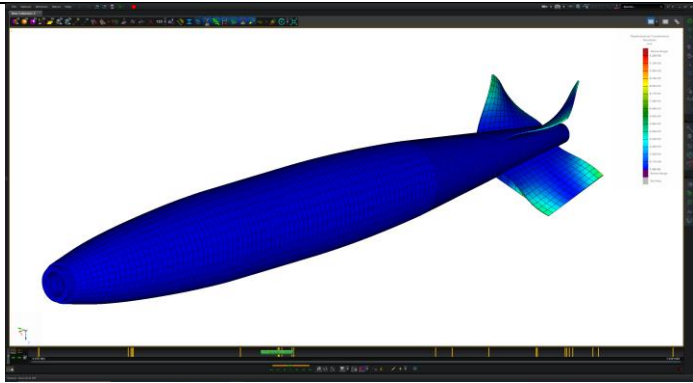
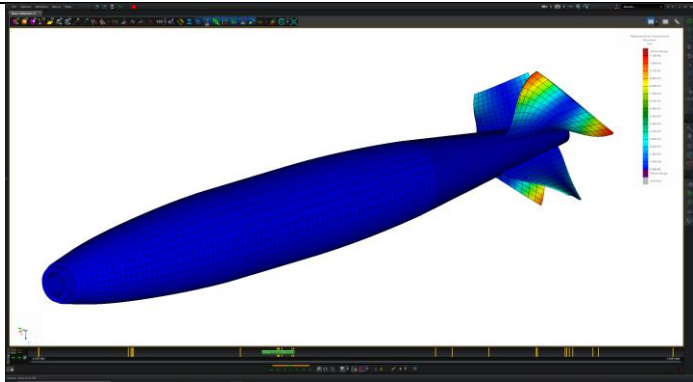
4.2.3. MK-82 mühimmatı serbest sınır koşullarında modal analiz sonuçları

MK-82 sonlu elemanlar modeli kutlanılarak serbest sınır koşullarında modal analiz yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre elde edilen doğal frekans değerleri mod şekilleri ve düğüm noktaları ile birlikte verilmiştir. İlk altı serbest mod 0 Hz frekansında çıkmaktadır. Serbest modal analizlerde hem yer değiştirme mod şekilleri incelenmiştir. Serbest sınır koşullarında modal yer değiştirme şekilleri ve doğal frekanslar Çizelge 4.8 ile verilmiştir.

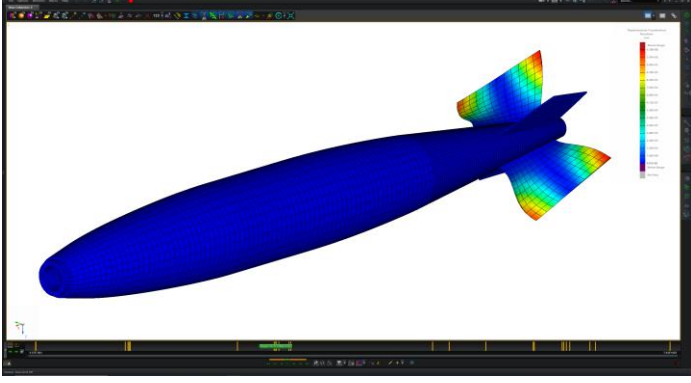
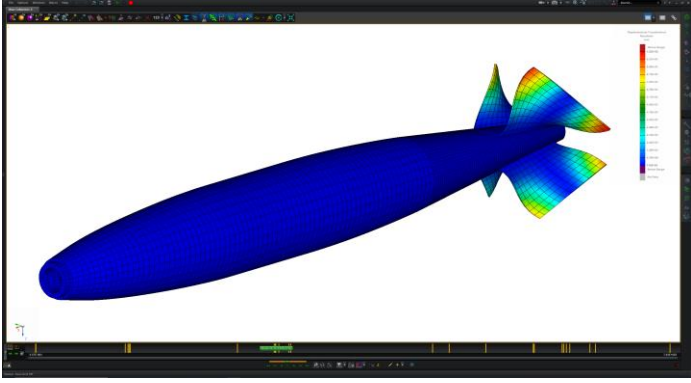
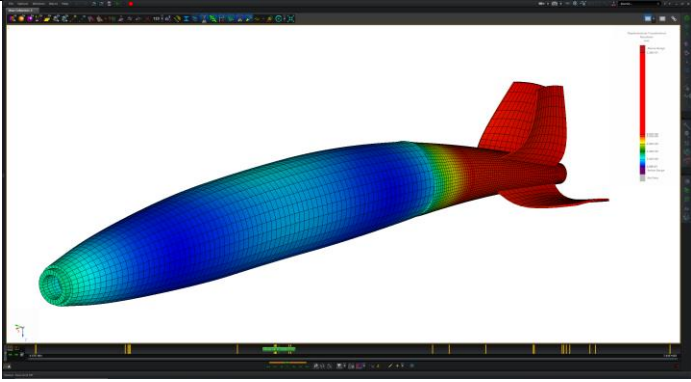
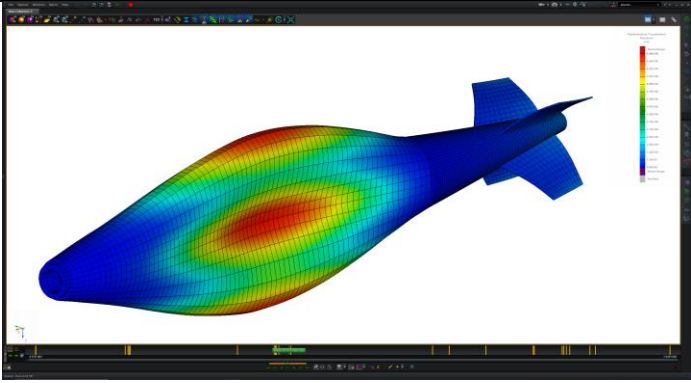
Çizelge 4.8. MK -82 Serbest sınır koşullarında modal analiz sonuçları

Modlar	Frekans (Hz)	Öz Vektör, Öteleme Yönü
Mod 7 Kanatçık modu	111	
Mod 8 Kanatçık modu	114	
Mod 9 Kanatçık modu	115	

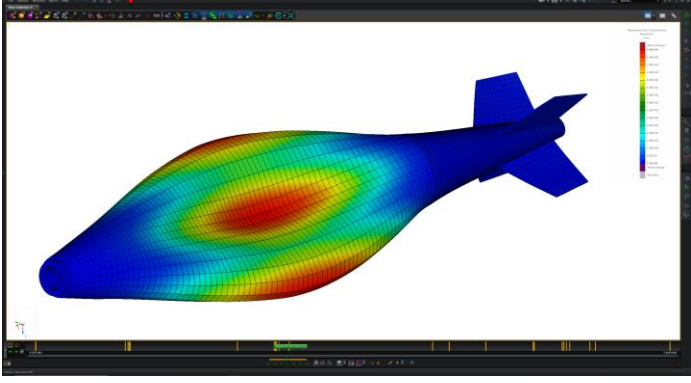
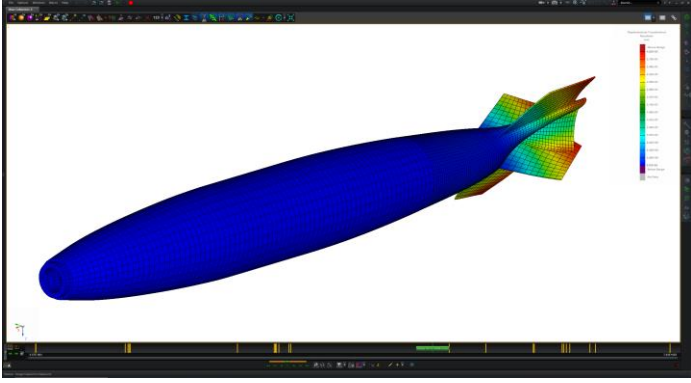
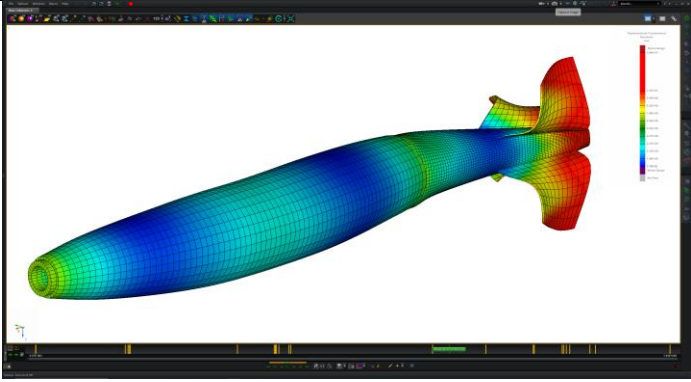
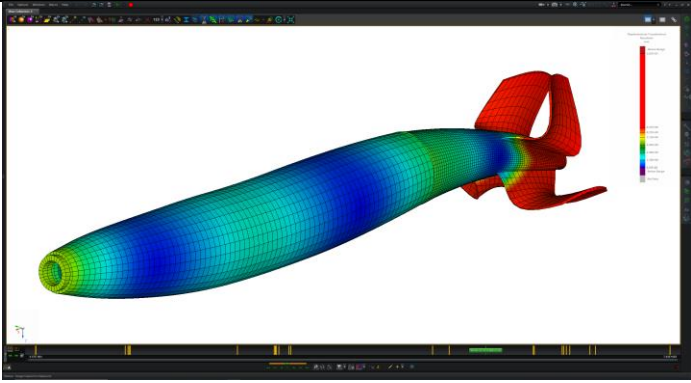
Çizelge 4.8. (devam) MK -82 Serbest sınır koşullarında modal analiz sonuçları

Mod 10 Kanatçık modu	117	
Mod 11 1. Yanal eğilme	249	
Mod 12 Kanatçık modu	295	
Mod 13 Kanatçık modu	296	

Çizelge 4.8. (devam) MK -82 Serbest sınır koşullarında modal analiz sonuçları

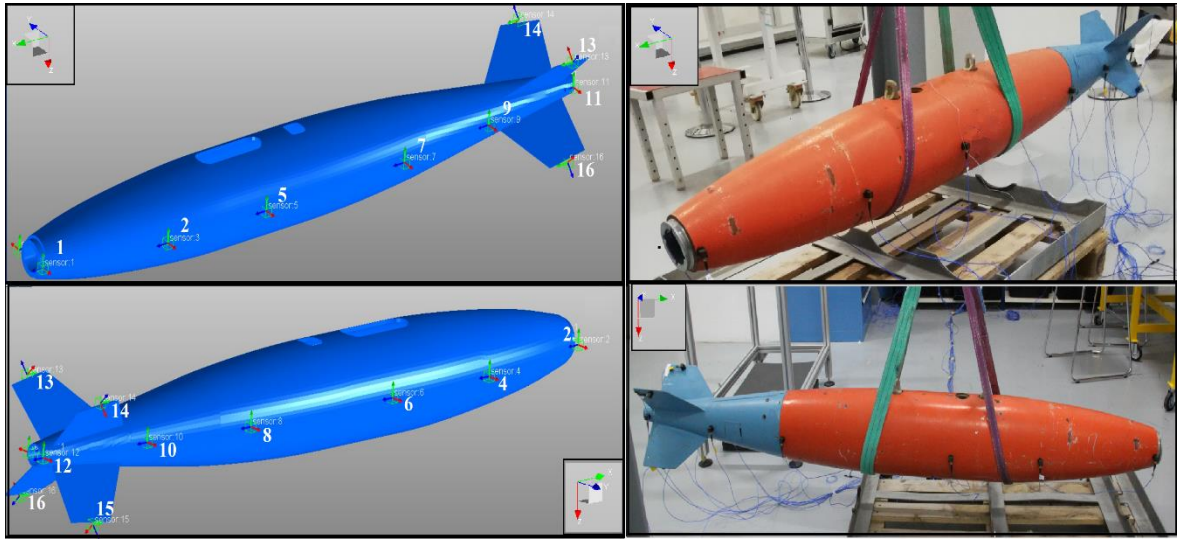
Mod 14 Kanatçık modu	296	
Mod 15 Kanatçık modu	297	
Mod 16 1. Dikey eğilme	300	
Mod 17 Lokal gövde modu	313	

Çizelge 4.8. (devam) MK -82 Serbest sınır koşullarında modal analiz sonuçları

Mod 18 Lokal gövde modu	315	
Mod 19 Lokal kuyruk modu	490	
Mod 20 2.Yanal Eğilme modu	511	
Mod 21 2. Dikey Eğilme modu	556	

4.2.4. MK-82 mühimmatı modal test modeli

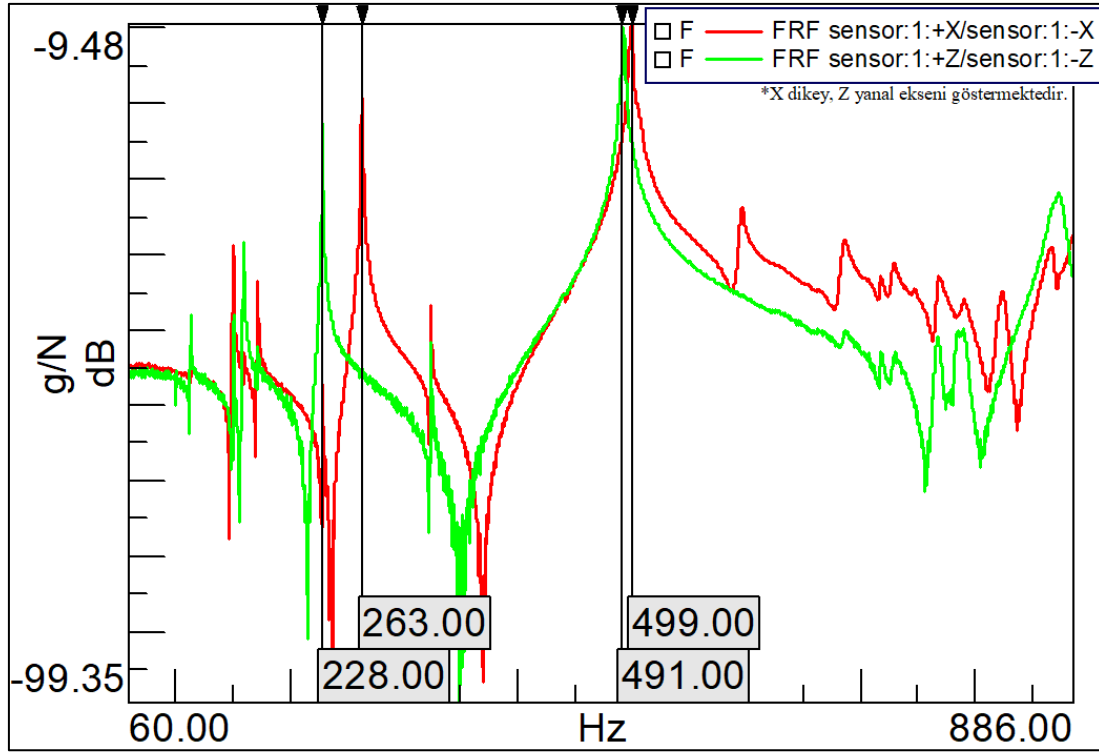
MK-82 kompleksi adı verilen bomba ve kuyruktan oluşan test bütünü sırasıyla darbe çekici testi, tek sarsıcı ile modal test, çoklu sarsıcıyı tek eksenle kullanarak yapılan modal test ve çoklu sarsıcıyı farklı eksenlerde kullanarak yapılan modal test gerçekleştirilmiştir. Test kalemi üzerine 16 adet 3 eksenli PCB marka 356A16 model ivmeölçer ve 1 adet PCB marka 740B02 model dinamik gerinimölçer kullanılmıştır. Test kurulumu ve testlerde mod şekillerinin gösterimi için kullanılan test geometrisi Resim 4.6 ile gösterilmiştir.



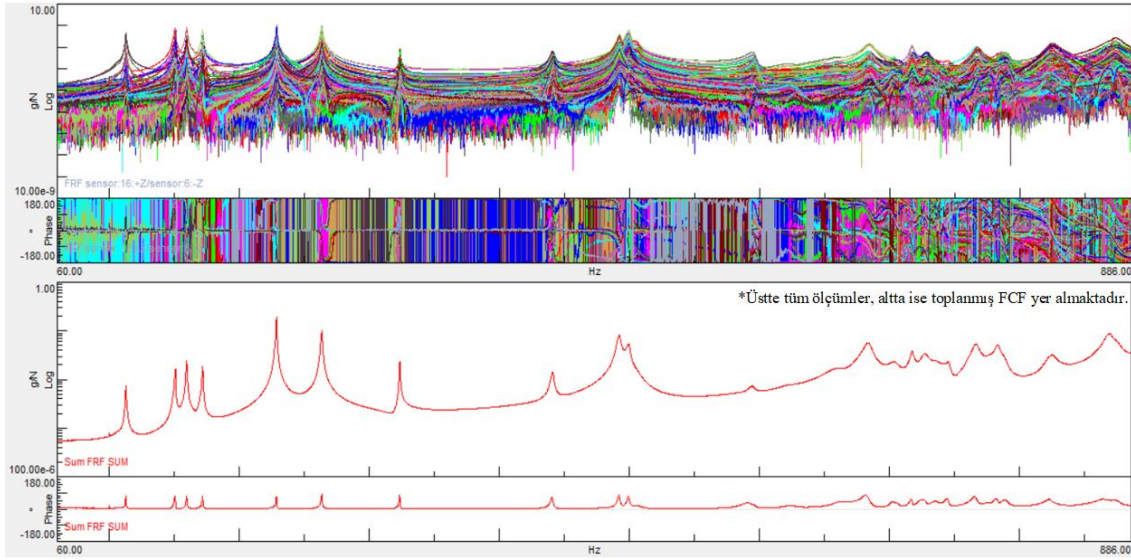
Resim 4.6. MK-82 Test kurulumu ve test geometrisi

4.2.5. MK-82 mühimmatı darbe çekici testi

Darbe çekici testlerinde MK-82 kompleksi test kalemi üzerinde bulunan ölçer noktalarından vuruş sağlanarak transfer fonksiyonları elde edilmiştir. Mühimmatın burun kısmından yatay ve dikey olarak sürücü nokta transfer fonksiyonları Şekil 4.19 ile gösterilerek eğilme modları işaretlenmiştir. Testlerde 23 ölçer konumundan vuruş yapılarak her vuruş için 23 cevap alınmıştır. Darbe çekici testlerinden alınan tüm FCF'ler ve toplanmış FCF'lerden elde edilen stabilizasyon diyagramı Şekil 4.20 ile verilmiştir. Darbe çekici sonuçları 60 ile 886 Hz arasında değerlendirildiğinde MK-82 kompleksinin doğal frekans ve mod şekilleri Çizelge 4.9 ile verilmiştir. MAC matrisi Şekil 4.21 ile verilmiştir.

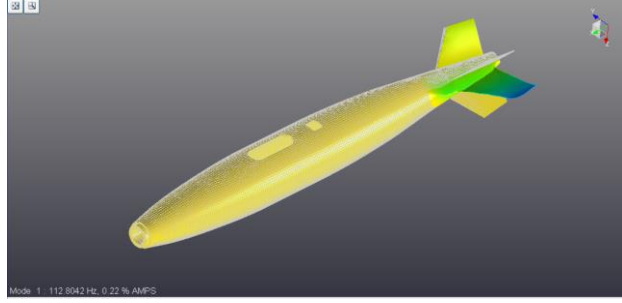
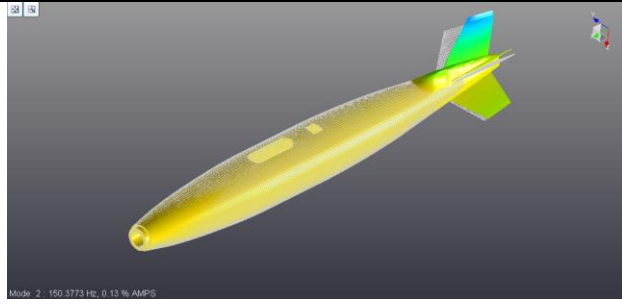
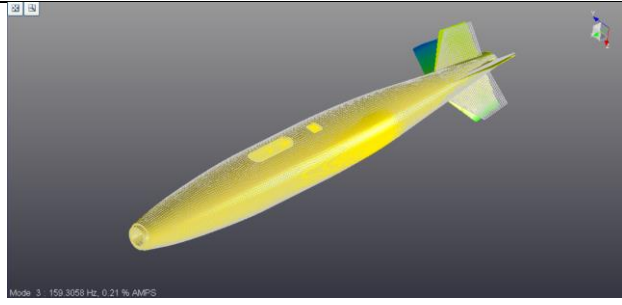
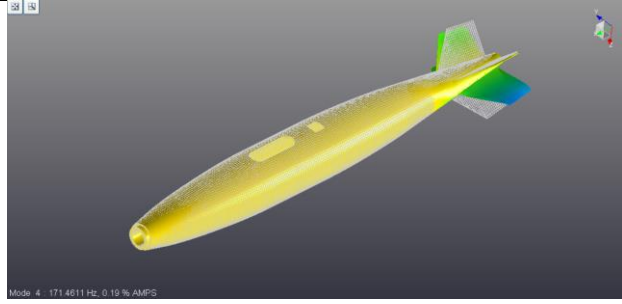
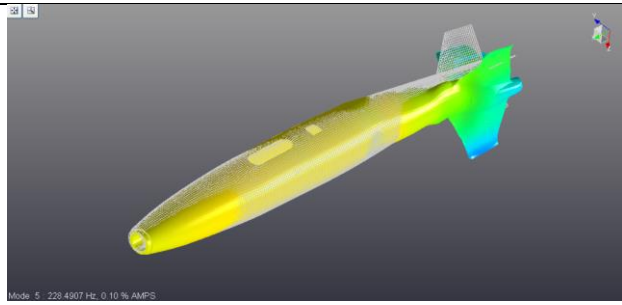


Şekil 4.19. Darbe çekici testlerinden alınan FCF'lerin karşılaştırılması

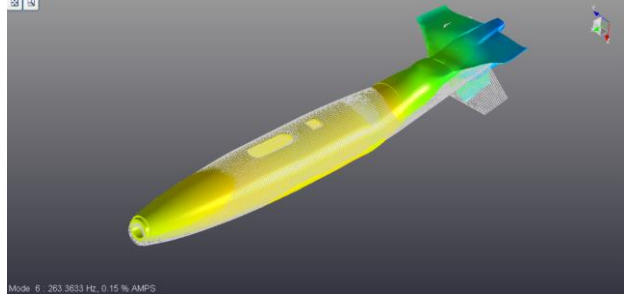
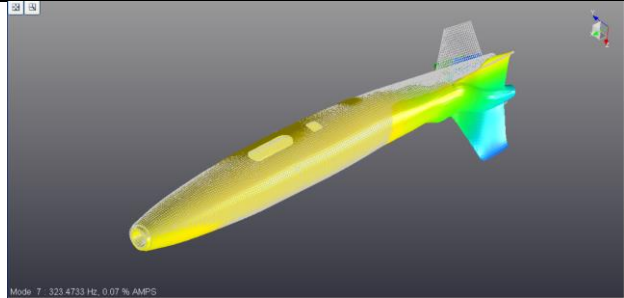
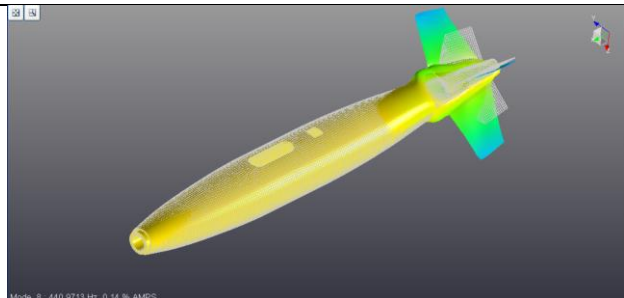
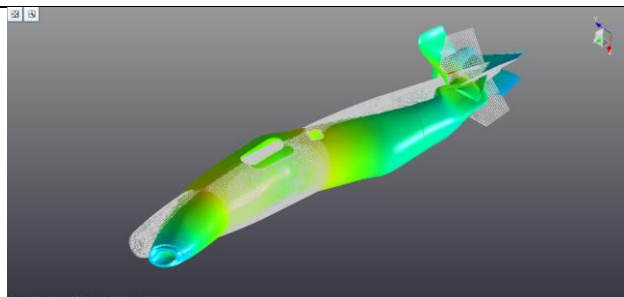
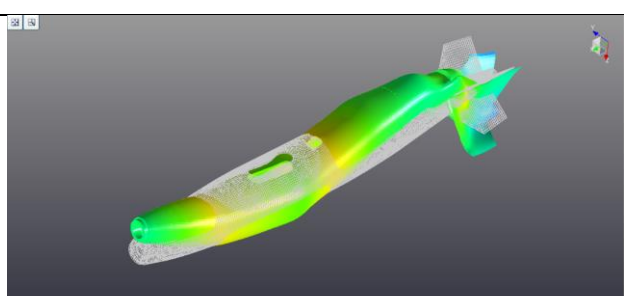


Şekil 4.20. Darbe çekici testlerinden alınan FCF'ler ve stabilizasyon diyagramı

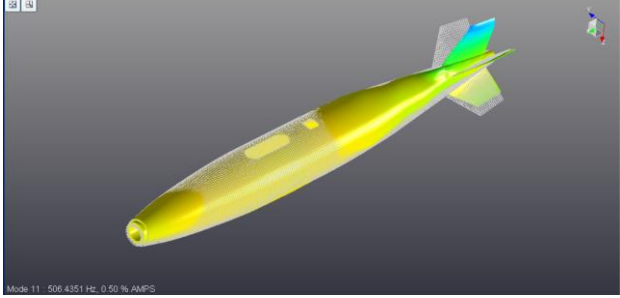
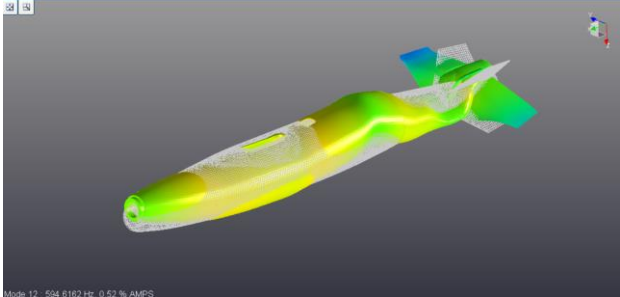
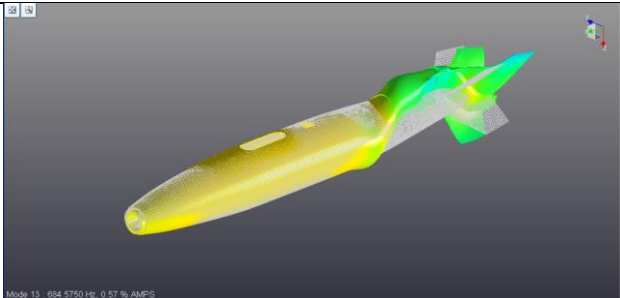
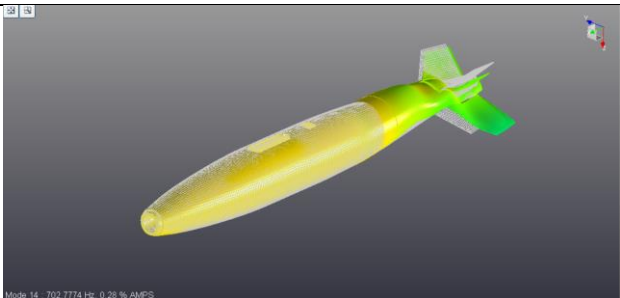
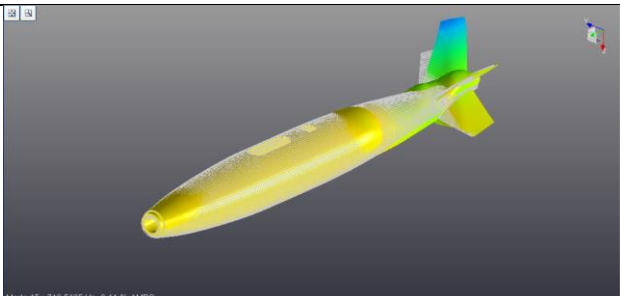
Çizelge 4.9. MK-82 darbe çekici testleri doğal frekansları ve mod şekilleri

Mod Numarası	Doğal Frekans (Hz)	Mod Şekli
Mod 1 Kanatçık Modu	112.804	 Mode 1 - 112.8042 Hz; 0.22 % AMPS
Mod2 Kanatçık Modu	150.377	 Mode 2 - 150.3773 Hz; 0.13 % AMPS
Mod 3 Kanatçık Modu	159.306	 Mode 3 - 159.3058 Hz; 0.21 % AMPS
Mod 4 Kanatçık Modu	171.461	 Mode 4 - 171.4611 Hz; 0.10 % AMPS
Mod 5 1. Yanal eğilme	228.491	 Mode 5 - 228.4907 Hz; 0.10 % AMPS

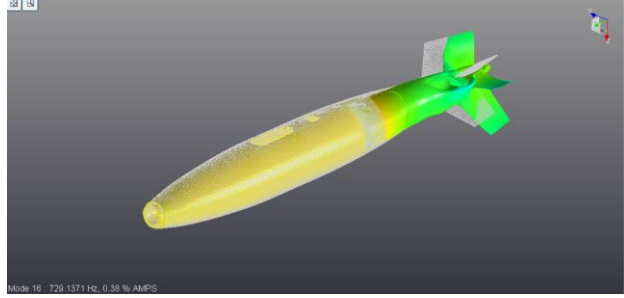
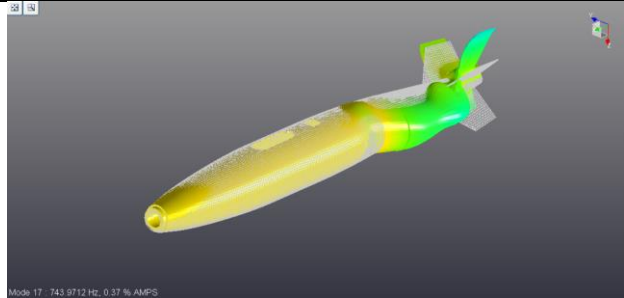
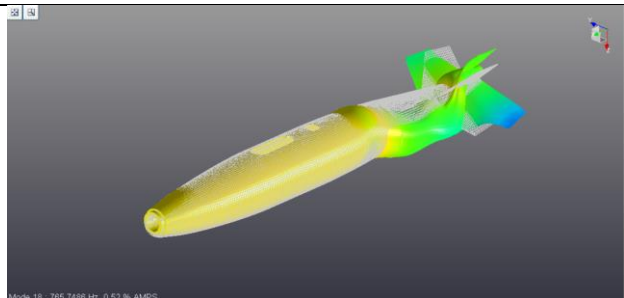
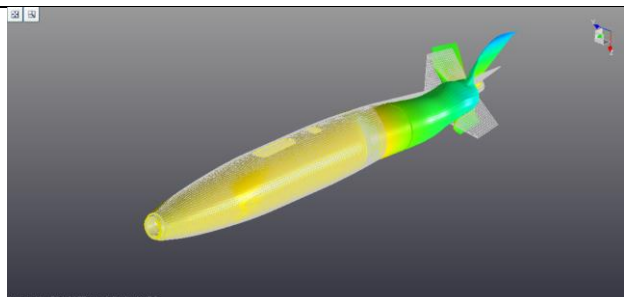
Çizelge 4.9. (devam) MK-82 darbe çekici testleri doğal frekansları ve mod şekilleri

Mod 6 1. Dikey eğilme	263.363	
Mod 7 Kuyruk Modu	323.473	
Mod 8 Kuyruk Modu	440.971	
Mod 9 2. Yanal eğilme	491.902	
Mod 10 2. Dikey eğilme	498.933	

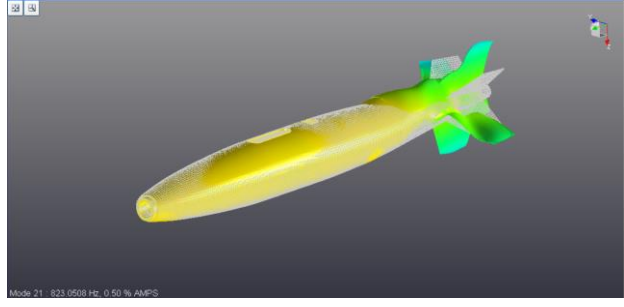
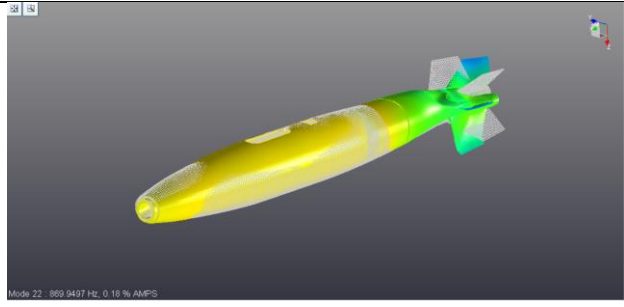
Çizelge 4.9. (devam) MK-82 darbe çekici testleri doğal frekansları ve mod şekilleri

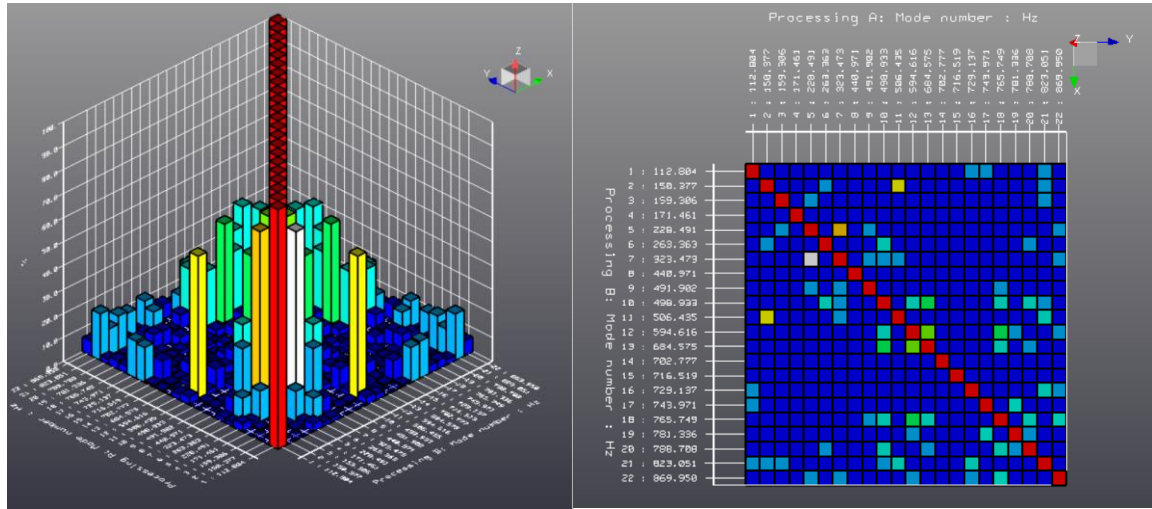
Mod 11 Kanatçık Modu	506.435	
Mod 12 Kuyruk Modu	594.616	
Mod 13 Kuyruk Modu	684.575	
Mod 14 Kuyruk Modu	702.777	
Mod 15 Kuyruk Modu	716.519	

Çizelge 4.9. (devam) MK-82 darbe çekici testleri doğal frekansları ve mod şekilleri

Mod 16 Kuyruk Modu	729.137	
Mod 17 Kuyruk Modu	743.971	
Mod 18 Kuyruk Modu	765.749	
Mod 19 Kuyruk Modu	781.336	
Mod 20 Kuyruk Modu	788.708	

Çizelge 4.9. (devam) MK-82 darbe çekici testleri doğal frekansları ve mod şekilleri

Mod 21 Kuyruk Modu	823.051	
Mod 22 Kuyruk Modu	869.950	



Şekil 4.21. MAC matrisi

4.2.6. MK-82 mühimmatı tekli girdi çoklu çıktı sarsıcı testi

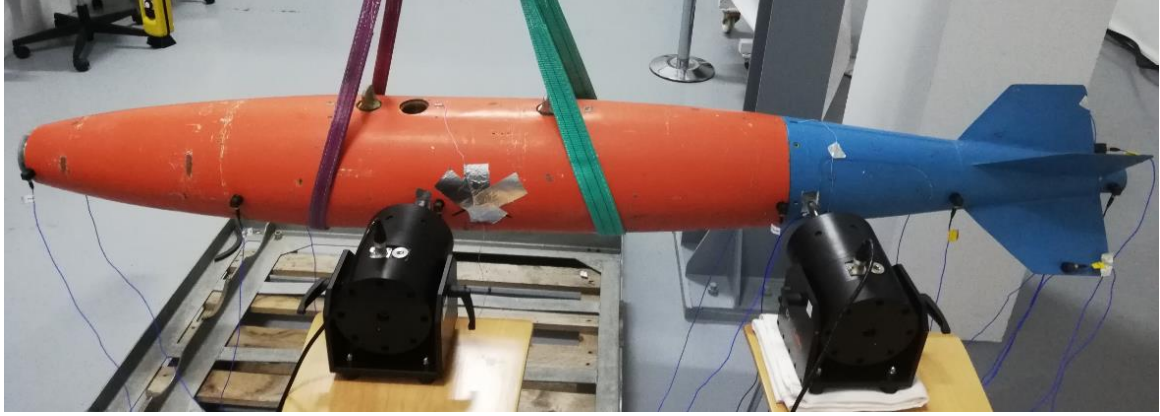
MK-82 kompleksi Resim 4.7 ile gösterildiği üzere tekli girdi çoklu çıktı sarsıcı testlerinde mühimmatın orta noktasından tek eksende kullanılan sarsıcı ile tahrik edilmiştir. Yapılan sarsıcı testlerinde test kalemi aralıklı gelişigüzel titreşim sinyal tipiyle 20-2048 Hz arası bant genişliği taranmıştır. Testlerde veri toplama 2048 Hz'lik bant genişliği için 4096 örnekleme frekansı ve 0,125 Hz frekans çözünürlüğü ile yapılmıştır. Aralıktaki bekleme süresi toplam zamanın %80'lik dilimini oluşturmaktadır. Beyaz gürültü ile 25 ortalama uygulanmıştır.



Resim 4.7. Tekli girdi çoklu çıktı sarsıcı testi

4.2.7. MK-82 mühimmatı tek eksende çoklu girdi sarsıcı testi

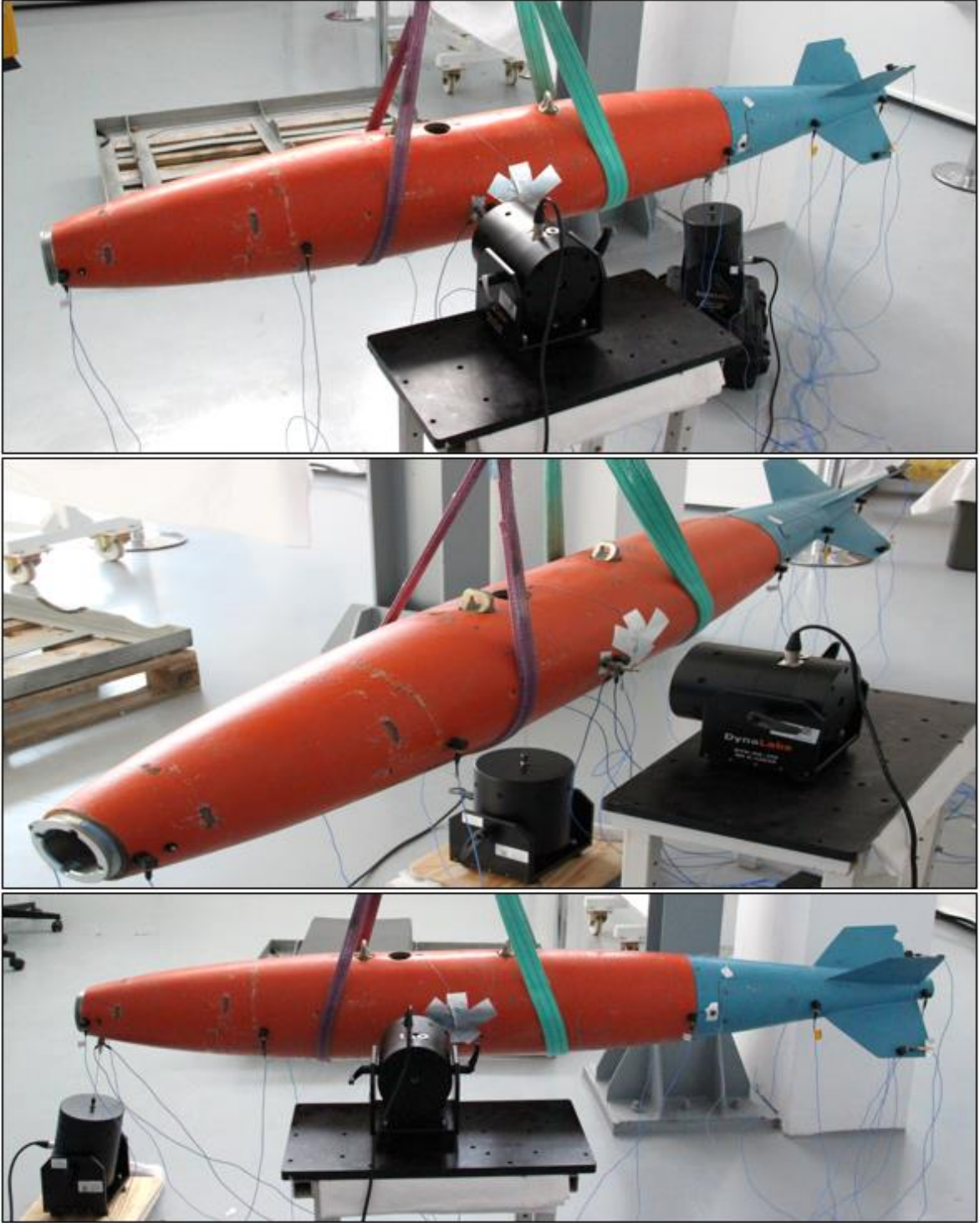
MK-82 kompleksi Resim 4.8 ile gösterildiği üzere tek eksende çoklu girdi sarsıcı testlerinde mühimmatın yanal ekseninde bir sarsıcı orta noktasından diğer sarsıcı ise kuyruk başlangıcından tek eksende kullanılan iki adet sarsıcı ile tahrik edilmiştir. Yapılan sarsıcı testlerinde test kalemi aralıklı gelişigüzel titreşim sinyaliyle 20-2048 Hz arası bant genişliği taranmıştır. Testlerde veri toplama 2048 Hz'lik bant genişliği için 4096 örnekleme frekansı ve 0,125 Hz frekans çözünürlüğü ile yapılmıştır. Aralıktaki bekleme süresi toplam zamanın %80'lik dilimini oluşturmaktadır. Beyaz gürültü ile 25 ortalama uygulanmıştır.



Resim 4.8. Tek ekseninde çoklu girdi sarsıcı testi

4.2.8. MK-82 mühimmatı çoklu ekseninde çoklu girdi sarsıcı testi

MK-82 kompleksi Resim 4.9 ile gösterildiği üzere çoklu ekseninde çoklu girdi sarsıcı testlerinde 1. sarsıcı mühimmat ortasında yanıl tahrik durumundayken, 2. sarsıcı dikey tahrik durumunda sırasıyla kuyruk, orta nokta ve burun bölgesine yerleştirilerek testler gerçekleştirilmiştir. Yapılan sarsıcı testlerinde test kalemi aralıklı gelişigüzel titreşim sinyaliyle 20-2048 Hz arası bant genişliği taranmıştır. Testlerde veri toplama 2048 Hz'lik bant genişliği için 4096 örnekleme frekansı ve 0,125 Hz frekans çözünürlüğü ile yapılmıştır. Aralıktaki bekleme süresi toplam zamanın %80'lik dilimini oluşturmaktadır. Beyaz gürültü ile 25 ortalama uygulanmıştır.



Resim 4.9. Çoklu eksenle çoklu girdi sarsıcı testi

5. BULGULAR YORUMLAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde daha önce sonlu elemanlar modellemeleri ve deneysel test çalışmaları ile dinamik karakteri incelenen kiriş modeli ve MK-82 mühimmatının sonuçları değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve bulgular ortaya konulmuştur.

5.1. Kiriş Dinamik Karakterizasyonu Bulguları

Kiriş modal analizlerinde serbest modların gerinim sonuçları incelendiğinde lokal gerinim değerlerine rastlanmıştır. Bu gerinim değerleri 10-12 mm/mm mertebelerinde olup numerik hata olarak değerlendirilmektedir. Hali hazırda modal analizlerde tüm öz vektör çözümlerinde yer değiştirme değerlerinde oransal bir çözüm oluşmaktadır. Bu durum gerinim değerlerinde de geçerli olup büyüklükleri fiziksel bir gerinim değerine karşılık gelmemektedir. Bu nedenle elde edilen yer değiştirme ve gerinim değerlerinin orantısal olduğu görülmektedir.

Daha önceki bölümde verilen deneysel çalışma sonuçları değerlendirildiğinde öncelikle Şekil 4.3'te görüldüğü üzere tahrik yalnızca z eksenindeyken transfer fonksiyonunda modal analizlerde 492 Hz'de görülen 1. eksen dışı eğilme modu ortaya çıkmamıştır.

Şekil 4.5 ile verilen FCF'de ise modal analizlerde 492,6 Hz'de görülen ancak tahrik yalnızca z eksenindeyken transfer fonksiyonunda elde edilemeyen 1. eksen dışı eğilme modu, hem y hem de z ekseninde tahrik durumunda 492,6 Hz'de ortaya çıkmaktadır. Bu durum sonlu elemanlar analizlerinde çok eksenli tahrik durumunda, tek eksenli tahrikte ortaya çıkmayan eksen dışı eğilmelerin gözlenerek daha doğru sonuçlar oluşturduğunu göstermektedir

Sonlu elemanlar analizlerinde doğru sınır koşullarının oluşturulması için hem yay destekli hem de tümüyle serbest durum için modal analizler ve frekans cevap analizleri yapılmıştır. Serbest sınır koşullarında ve yay destekli sınır koşullarında yapılan modal analizlerin karşılaştırılması Çizelge 5.1 ile verilmiş olup sonuçlarda serbest cisim modları haricinde önemli bir değişiklik gözlemlenmemiştir. Bu nedenle sonraki analizlerde yalnızca serbest

sınır koşullarında modal analiz yapılmıştır. Frekans cevap analizlerinde yay destekli ve serbest sınır koşulunda yapılan analizlerde modal analizlerde olduğu gibi serbest cisim modlarında farklılık görülmektedir. Ancak eğilme ve burulma modlarında anlamlı bir fark gözlemlenmemiştir. Ayrıca tahrik yalnızca z eksenindeyken transfer fonksiyonunda elde edilemeyen 1. eksen dışı eğilme modu, tıpkı serbest sınır koşulunda olduğu gibi, hem y hem de z ekseninde tahrik durumunda ortaya çıkmaktadır. Bu durum hem yay destekli hem de serbest sınır koşullarındaki sonlu elemanlar analizlerinde çok eksenli tahrik durumunda, tek eksenli tahrikte ortaya çıkmayan eksen dışı eğilmelerin gözlenerek daha doğru sonuçlar oluşturduğunu göstermektedir. Bu durumun testlerdeki karşılığı değerlendirildiğinde, modal testlerde kirişin yatay eksenden tahriki durumunda, FCF'ler için 494,4 Hz'de yer alan eksen dışı eğilmenin en iyi şekilde Y ekseninden tahrik durumunda gözlemlendiği görülmektedir (Bkz. Şekil 4.11).

Çizelge 5.1. Kiriş yay destekli sınır koşullarında modal analiz sonuçları ile serbest sınır koşullarında modal analiz sonuçlarının karşılaştırılması

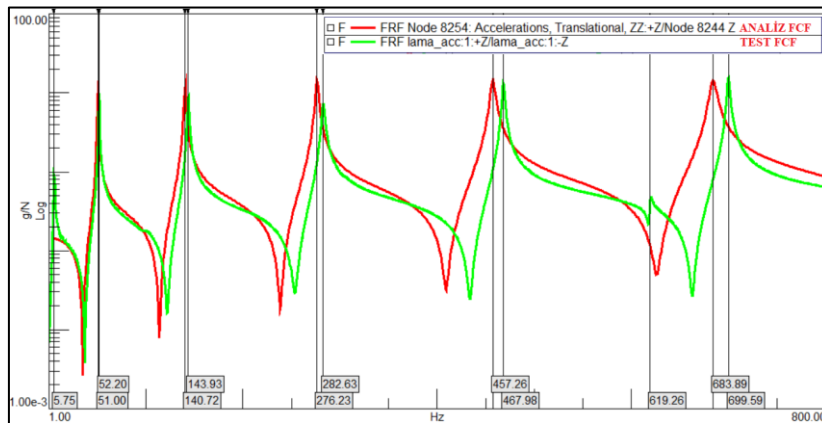
Mod Numarası	Serbest Sınır Koşullarında Modal Analiz Sonuçları (Hz)	Yay Destekli Sınır Koşullarında Modal Analiz Sonuçları (Hz)	Mod Numarası	Serbest Sınır Koşullarında Modal Analiz Sonuçları (Hz)	Yay Destekli Sınır Koşullarında Modal Analiz Sonuçları (Hz)
Mod 1 Serbest mod	0,00	0,42	Mod 8 2. Eğilme modu	140,72	141,36
Mod 2 Serbest mod	0,00	0,42	Mod 9 3. Eğilme modu	276,23	276,84
Mod 3 Serbest mod	0,00	0,42	Mod 10 1. Burulma modu	294,01	295,08
Mod 4 Serbest mod	0,00	12,98	Mod 11 4. Eğilme modu	457,26	457,47
Mod 5 Serbest mod	0,00	13,42	Mod 12 1. Eksen dışı eğilme modu	492,56	492,56
Mod 6 Serbest mod	0,00	23,06	Mod 13 2. Burulma modu	592,40	592,43
Mod 7 1. Eğilme modu	51,00	51,00	Mod 14 5. Eğilme modu	683,89	683,89

Kiriş darbe çekici modal testlerinde her ekseninde birçok noktadan darbe uygulanarak deneysel modal test sonuçları çıkarılmıştır. Testlerden elde edilen doğal frekanslar ile sonlu elemanlar analizleri karşılaştırıldığında Çizelge 5.2 ile verildiği üzere analiz test doğruluk oranı % 99 olarak bulunmuştur.

Çizelge 5.2. Kiriş deneysel modal testleri ve sonlu elemanlar analizi doğal frekanslarının karşılaştırılması

TEST	ANALİZ	KORELASYON (%)
52,203	51,001	99,977
143,931	140,723	99,978
282,626	276,234	99,977
304,892	294,012	99,964
467,981	457,260	99,977
494,393	492,556	99,996
619,265	592,395	99,957
699,586	683,887	99,978

Şekil 5.1 ile serbest durumda tek ekseninde tahrik durumu için frekans cevap analizleri ve darbe çekici testinden elde edilen FCF'ler verilmiştir. Tek ekseninde tahrikle yapılan modal frekans cevap analizi ve darbe çekici ile yapılan FCF'ler karşılaştırıldığında frekans bandında %95 üzerinde korelasyon görülmektedir. Bu durum Çizelge 5.2 ile birlikte değerlendirilirse analiz ve testler ile yüksek doğrulukta dijital bir ikiz oluşturulduğunu göstermektedir.



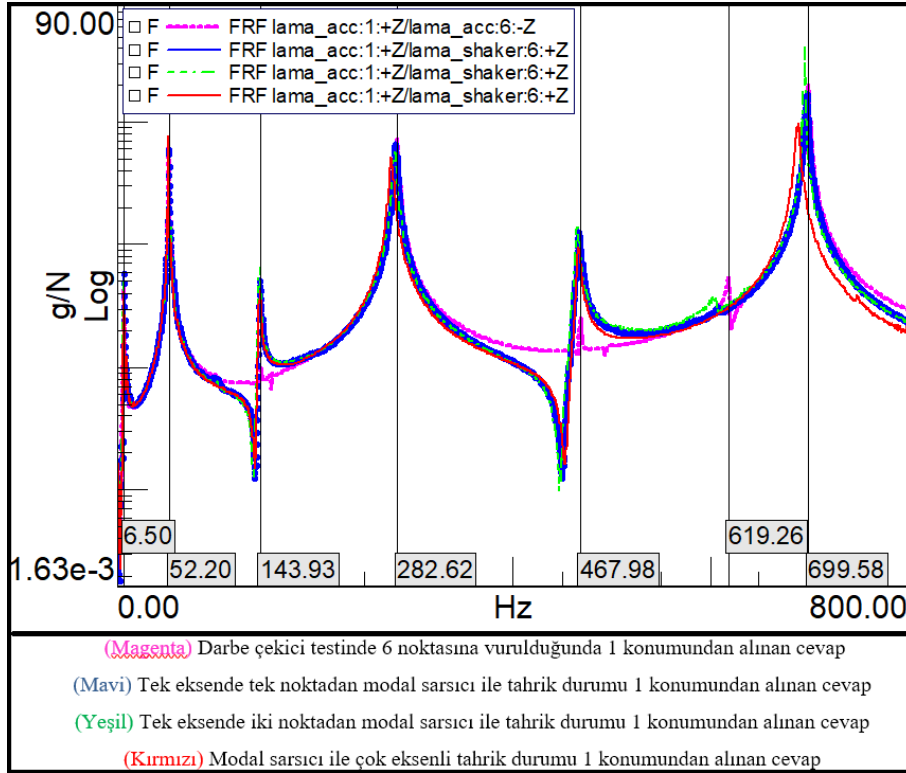
Şekil 5.1. Tek ekseninde frekans cevap analizi ve darbe çekici testinin karşılaştırılması

Deneysel çalışmada yer alan, gerinimölçerlerden alınan FCF'ler değerlendirildiğinde, eksen dışı eğilmenin tek yönlü dinamik gerinim ölçerler ile saptanamadığı gözlemlenmiştir. Ancak tüm eğilme ve burulma modlarında tepe noktaları açıkça gözlenmektedir.

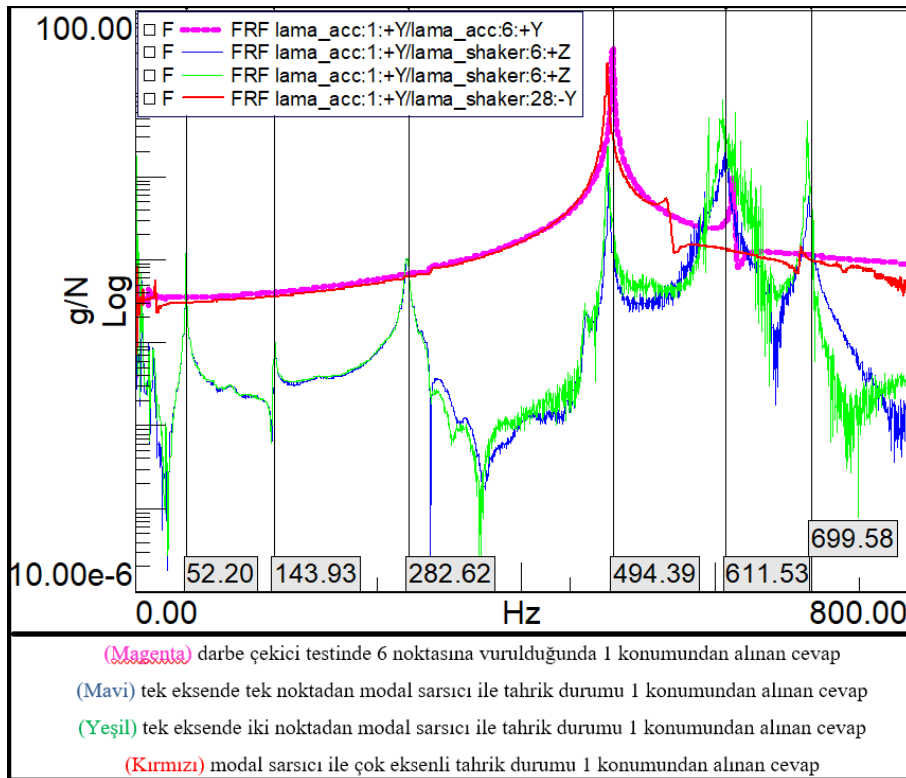
Darbe çekici testinden elde edilen doğal frekans ve mod şekilleri Çizelge 4.5 ile modal analizden elde edilen mod şekilleri ile kıyaslandığında tüm eğilme modlarında sonlu elemanlar analizleri ile yüksek benzerlik görülmektedir. Ancak 1. ve 2. burulma mod şekillerinde farklılıklar bulunmaktadır. Bu durum ivmeölçerlerin giriş merkez eksenli hattı boyunca yerleştirilmesi sebebiyle, burulma modlarının düğüm noktalarında yer almasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle burulma mod şekilleri doğru şekilde gözlemlenememiş olup bu durum MAC matrisinde 12. mod olan 1. eksen dışı eğilme modu ile 13. mod olan 2. burulma modunun mod şekillerindeki yüksek benzerlikle açıkça görülmektedir.

Kiriş tek eksenli tek sarsıcı ile yapılan modal testlerde farklı sinyal tipleri ve enerji seviyeleri farklı pencere yöntemleri kullanılmıştır. En iyi bağdaşım değeri aralıklı gelişigüzel titreşim sinyal tipinde bulunmaktadır. Bu doğrultuda takip eden tüm sarsıcı testleri aralıklı gelişigüzel titreşim sinyali ile devam edilmiştir. Pencereleme konusunda aralıklı gelişigüzel titreşim sinyali doğası gereği başlangıç ve bitiş anının sıfır noktasına gelmesi sebebiyle herhangi bir pencereleme ihtiyacı bulundurmamaktadır. Bu durum deneysel çalışmada Şekil 4.15 ile görüldüğü üzere daha iyi sinyal/gürültü oluşturmakta olup, sonraki testlerde düz pencere kullanılmasına karar verilmiştir. Kiriş yapısı modal testler sırasında sarsıcıdan gelen sinyaller güçlendirilerek tekrar tekrar test edilmiş ve farklı enerji seviyelerindeki testlerde doğrusal olmayan bir duruma rastlanmamıştır.

Kiriş dinamik karakterizasyonunda yapılan tüm testlerdeki FCF karşılaştırmaları darbe çekici testleri ve farklı konfigürasyonlardaki modal sarsıcı testleri için Şekil 5.2 ve Şekil 5.3 ile verilmiştir. Buna göre sarsıcı sayısının artmasıyla z ekseninde önemli bir farklılık oluşmazken y ekseninde darbe çekici ile y eksenine yapılan vuruştaki FCF'ye en yakın tahrik durumu birden fazla modal sarsıcı ile çok eksenli tahrik durumunda gerçekleşmiştir. Modal sarsıcının çok eksenli tahrik için kullanım durumunda modal sarsıcının eklendiği eksenlerdeki modların daha net katılımlarla tespit edildiği görülmektedir.



Şekil 5.2. Testlerdeki frekans cevap fonksiyonları karşılaştırmaları (Z eksen)



Şekil 5.3. Testlerdeki frekans cevap fonksiyonları karşılaştırmaları (Y eksen)

5.2. MK-82 Mühimmatı Dinamik Karakterizasyon Bulguları

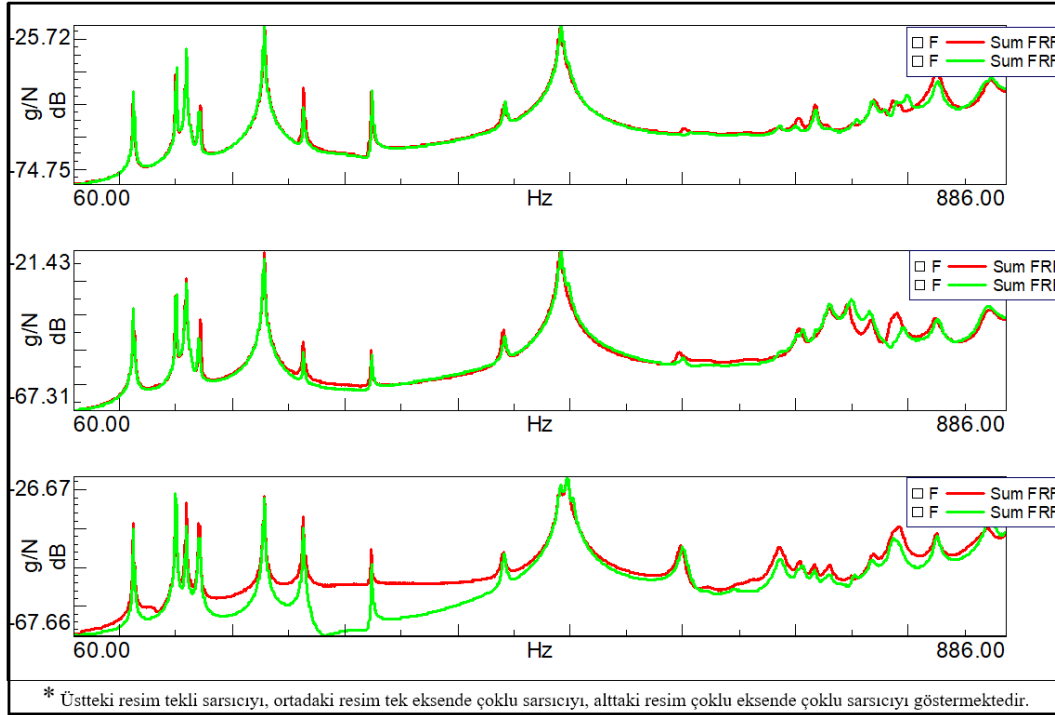
MK-82 mühimmatı sonlu elemanlar analizleri ile darbe çekici modal testlerinden bulunan eğilme modları karşılaştırılırsa Çizelge 5.3 ile yüksek yakınlık oranları görülmektedir. Kanat ve kuyruk lokal modları ise üretim belirsizlikleri sebebiyle analiz ve testler arasında önemli farklılıklar göstermektedir.

Çizelge 5.3. MK-82 deneysel modal testleri ve sonlu elemanlar analizi gövde eğilme doğal frekanslarının karşılaştırılması

MOD	TEST	ANALİZ	KORELASYON (%)
1. Yanal Eğilme	228,49	249,00	91,02
1. Dikey Eğilme	263,36	300,00	86,09
2. Yanal Eğilme	491,902	511,00	96,12
2. Dikey Eğilme	498,933	556,00	88,56

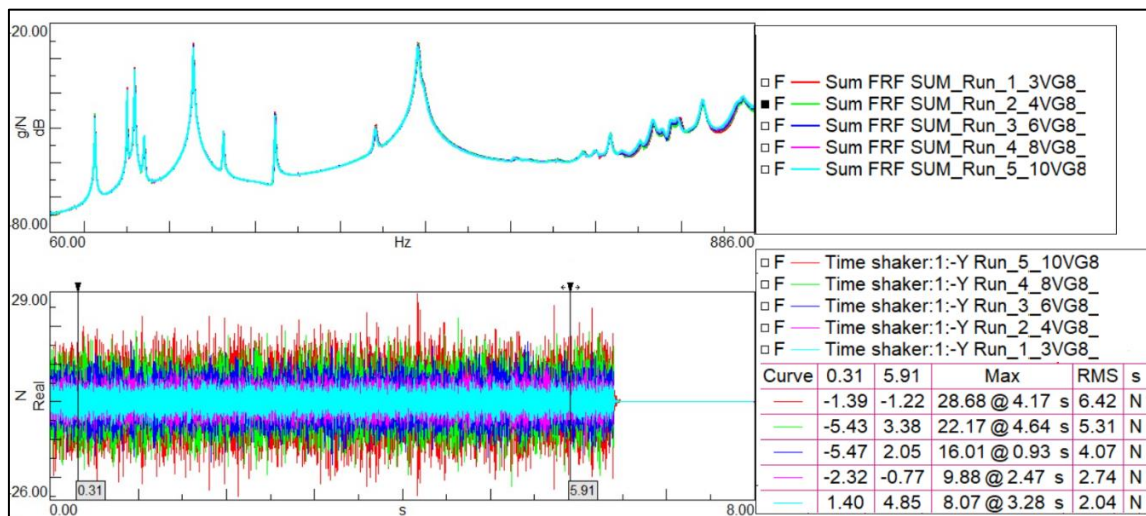
Sarsıcı ile yapılan testlerden alınan FCF değerlerini yorumlamak üzere toplanmış FCF'ler oluşturulmuştur. Toplanmış FCF Şekil 4.20'de olduğu gibi ölçümden alınan tüm FCF'leri tek bir FCF ile temsil etmektedir. Toplanmış FCF toplamının gerçek kısmı, bağımsız FCF'lerin gerçek kısımlarının mutlak değerlerinin ortalaması iken, imajinal kısım, FCF'lerin hayali kısımlarının mutlak değerlerinin ortalamasıdır.

Sarsıcı testleri farklı zamanlarda tekrarlanmıştır. Testlerin aynı koşullarda tekrarlanabilir olduğu görülmüştür. İlk yapılan sarsıcı testlerinden sonra, mühimmatın sarsıcılarla olan bağlantısı kaldırılarak sandık üzerine koyulmuştur. Ardından, tüm testler aynı askı noktaları değiştirilmeden asılmış ve sarsıcı konumları aynı kalacak şekilde bağlanmasıyla aynı kuvvet girdileri uygulanarak tekrarlanmıştır. (Bkz. Şekil 5.4)



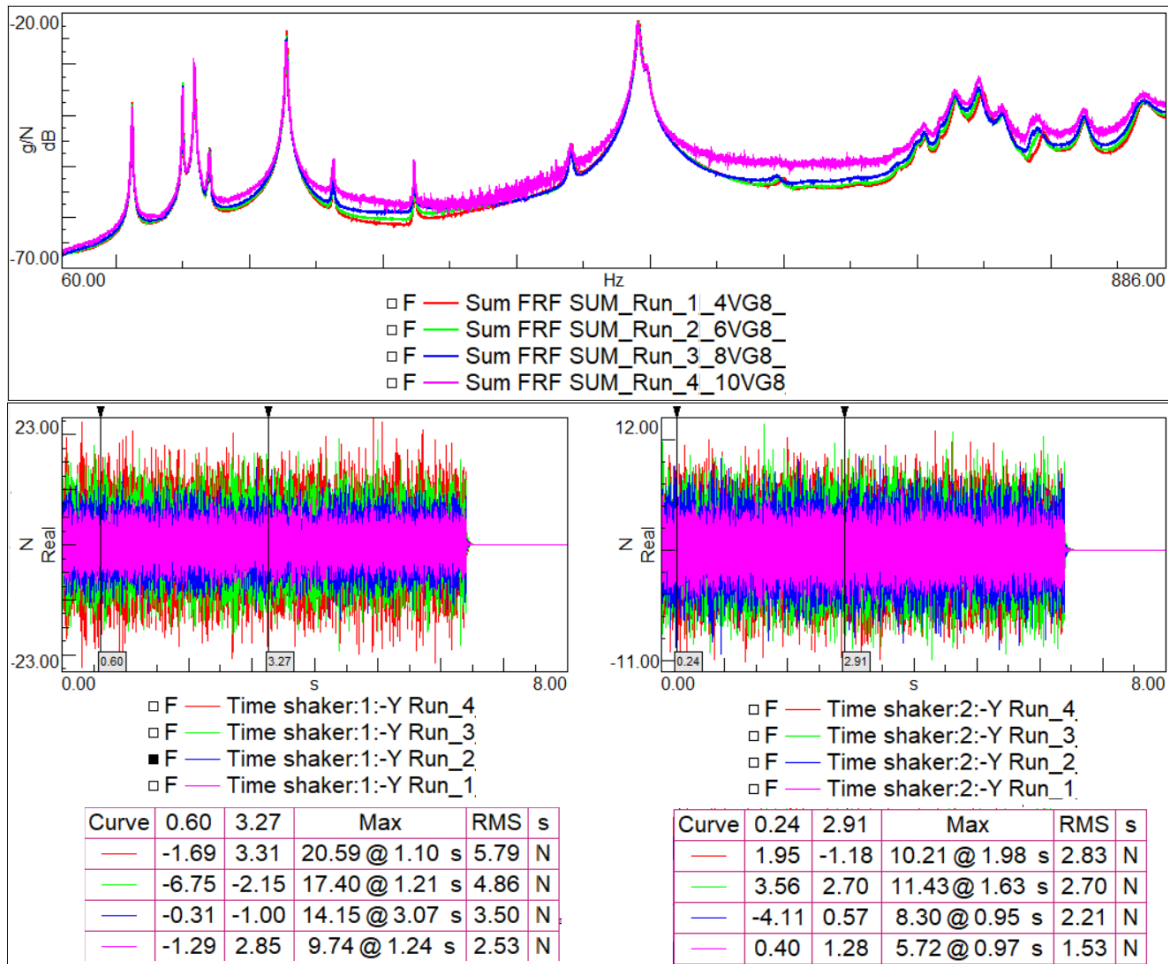
Şekil 5.4. Sarsıcı testlerinin tekrarlanabilirliği

Tekli sarsıcı testleri farklı kuvvet seviyelerinde tekrarlanmıştır. Testlerde kuvvet seviyesi 2-6 N rms arasında değiştirilmiştir. Bu kuvvetler doğrultusunda yapı 8-28 Newton arasındaki en yüksek kuvvetlerle sarsılmıştır. Bu değerler doğrusallıkta herhangi bir değişim gözlenmemiştir. (Bkz. Şekil 5.5)



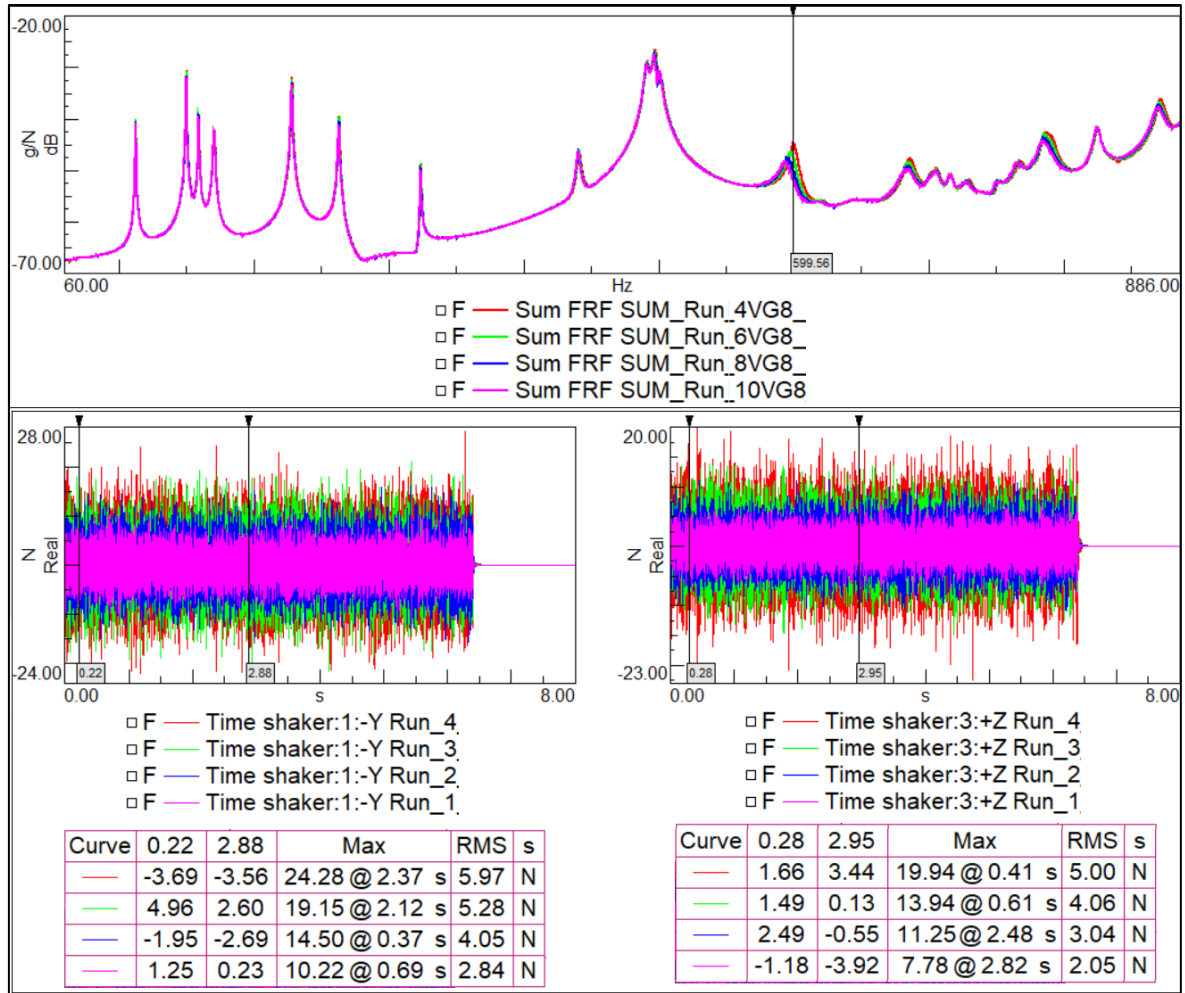
Şekil 5.5. Tekli sarsıcı testlerinde doğrusallık

Tek ekseninde çoklu sarsıcı testleri farklı kuvvet seviyelerinde tekrarlanmıştır. Testlerde mühimmat ortasında yer alan 1. sarsıcı kuvvet seviyesi 2.5-5.6 N rms arasında değiştirilmiştir. Bu kuvvetler doğrultusunda yapı 1. sarsıcı ile 9.7-20.6 Newton arasındaki en yüksek kuvvetlerle sarsılmıştır. Testlerde mühimmat kuyruğunda yer alan 2. sarsıcı kuvvet seviyesi 1.5-2.8 N rms arasında değiştirilmiştir. Bu kuvvetler doğrultusunda yapı 2. sarsıcı ile 5.7-10.2 Newton arasındaki en yüksek kuvvetlerle sarsılmıştır. FCF değerleri incelendiğinde doğrusallıkta herhangi bir değişim gözlenmemiştir. En yüksek seviyede sarsılan “Run 4” için FCF değerlerinde gürültü görünmektedir. Test sonrası sarsıcı incelendiğinde 2. sarsıcının yapııştırılmış olduğu noktadan ayrılmaya başladığı gözlemlenmiştir (Bkz. Şekil 5.6).



Şekil 5.6. Tek ekseninde çoklu sarsıcı testlerinde doğrusallık

Çoklu eksende çoklu sarsıcı testleri farklı kuvvet seviyelerinde tekrarlanmıştır. Testlerde mühimmat ortasında yatay olarak yer alan 1. sarsıcı kuvvet seviyesi 2.8-6 N rms arasında değiştirilmiştir. Bu kuvvetler doğrultusunda yapı 1. sarsıcı ile 10.2-24.3 Newton arasındaki en yüksek kuvvetlerle sarsılmıştır. Testlerde mühimmat kuyruğunda dikey olarak yer alan 2. sarsıcı (Şekil 5.7’de “shaker 3” olarak geçmektedir) kuvvet seviyesi 2-5 Nrms arasında değiştirilmiştir. Bu kuvvetler doğrultusunda yapı 2. sarsıcı ile 7.8-20 Newton arasındaki en yüksek kuvvetlerle sarsılmıştır. FCF değerleri incelendiğinde doğrusallıkta genel olarak herhangi bir değişim gözlenmemiştir. Ancak 600 Hz’de bulunan kuyruk modunda FCF’de bir değişim gözlemlenmektedir (Bkz. Şekil 5.7).

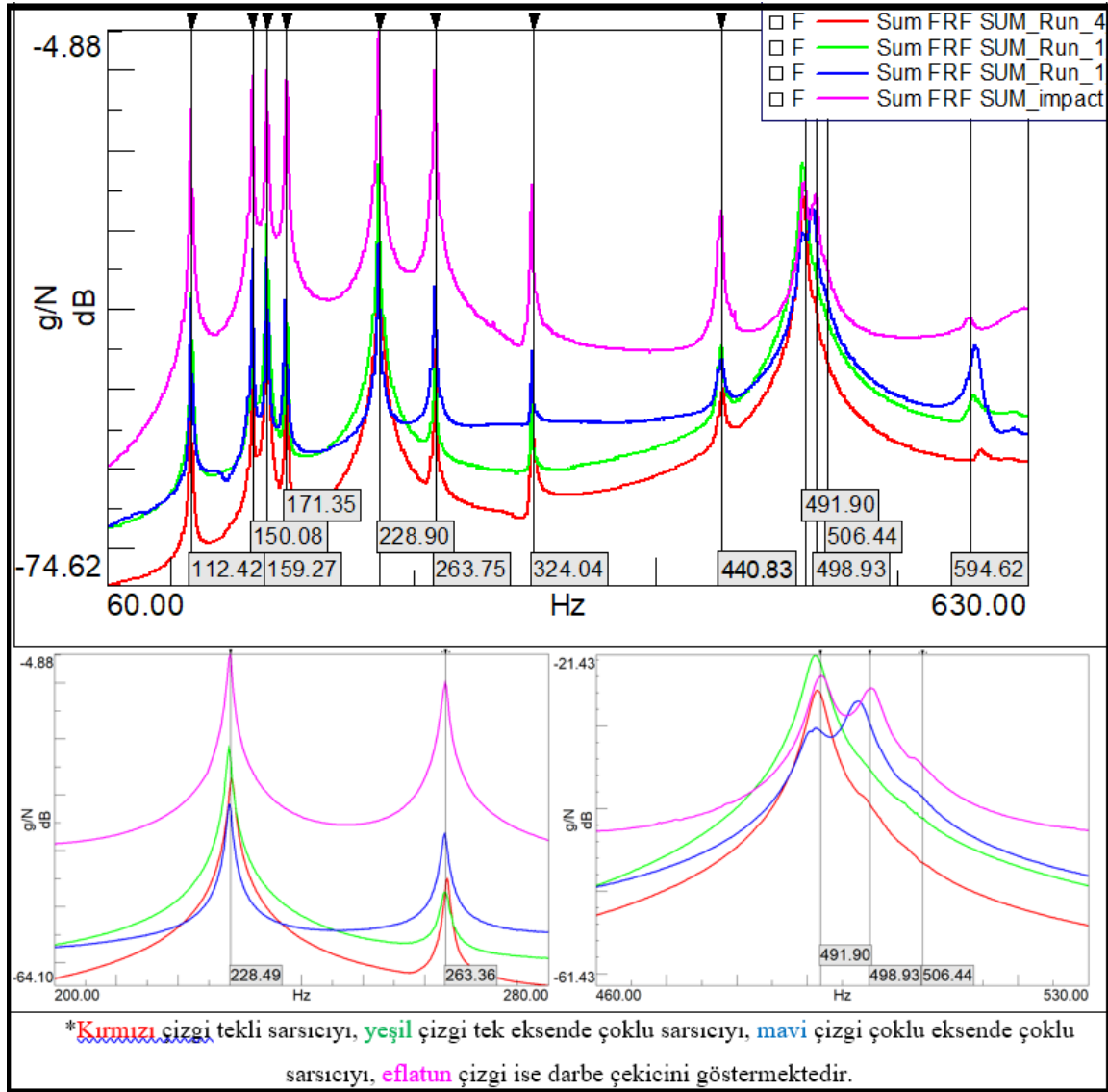


Şekil 5.7. Çoklu eksende çoklu sarsıcı testlerinde doğrusallık

Toplanmış FCF'ler tekli sarsıcı, tek ekseninde çoklu sarsıcı ve çoklu ekseninde çoklu sarsıcı için karşılaştırılmıştır. 112, 149, 159 ve 171 Hz kanatçık lokal modlarıdır. Bu modlar her sarsıcı konfigürasyonu için iyi şekilde gözlemlenmiştir. 323 ve 441 Hz'de bulunan kuyruk lokal modları da aynı kanatçık lokal modları gibi her sarsıcı konfigürasyonu için iyi şekilde gözlemlenmiştir. Ancak mühimmat eğilme modları incelendiğinde durum değişmektedir.

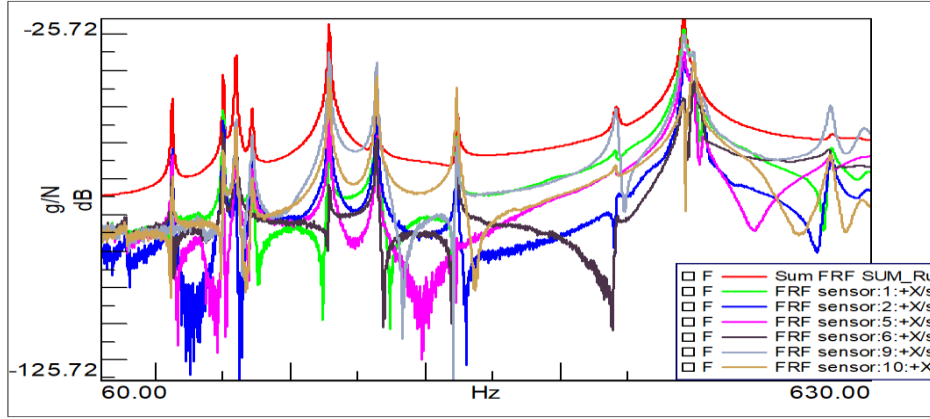
Şekil 5.8 ile 1. eğilme modlarını daha yakından incelenirse öncelikle 1. eğilme modları olan 228,5 Hz ve 263,4 Hz her sarsıcı konfigürasyonunda da yakalandığı görülmektedir. 228,5 Hz 1. yanal eğilme moduna bakıldığında tek sarsıcı, aynı ekseninde iki sarsıcı ve çoklu ekseninde iki sarsıcı kullanıldığında birbirine yakın sonuçlar alınmıştır. Ancak 263,4 Hz'deki dikey eğilme modunda çoklu ekseninde iki sarsıcı kullanarak dikey eksene eklenen tahrik, 1. dikey eğilme modunun daha yüksek bir seviye ile tespit edilmesini sağlamıştır.

Şekil 5.8 ile 2. eğilme modlarını incelendiğinde çoklu ekseninde kullanılan 2 sarsıcının avantajının açıkça ortaya çıktığı görülmektedir. 491.9 Hz 2. yanal eğilme modu tüm sarsıcı konfigürasyonlarında tespit edilmiştir. Ancak 2. Dikey eğilme modu tek sarsıcı, aynı ekseninde iki sarsıcı ile tespit edilemezken, çoklu ekseninde iki sarsıcı kullanarak dikey eksene eklenen tahrik ile ortaya çıkmaktadır. Bu durum özellikle simetrik yapılarda birbirine yakın çıkan eğilme modlarının ayrıştırılmasında çoklu ekseninde kullanılan çoklu sarsıcının sağlamış olduğu avantajı göstermektedir.



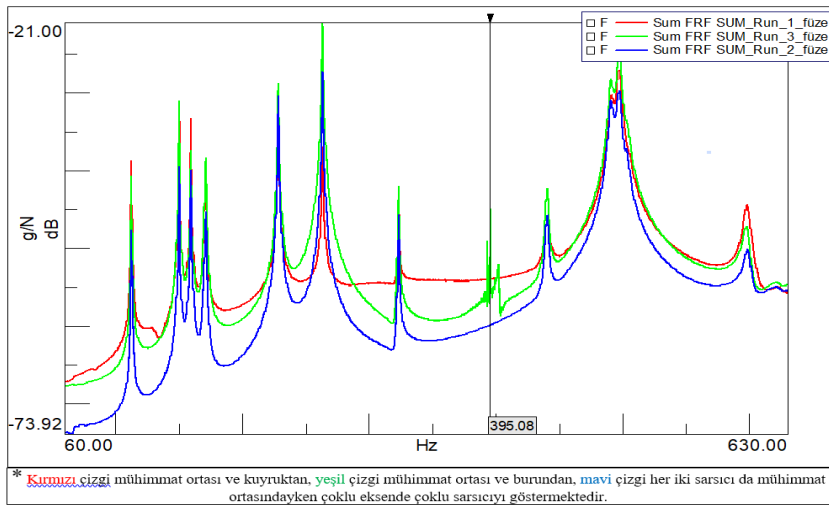
Şekil 5.8. Farklı şekillerde kullanılan sarsıcılar için FCF'lerin karşılaştırılması

Yapılan değerlendirmeler yalnızca toplanmış FCF'ler üzerinden değil detaylı olarak transfer fonksiyonları özelinde de değerlendirilmiştir. Yatay eksenle tekli sarsıcı kullanılan test için toplanmış FCF ve bu testte muhimmat burun, orta ve kuyruk bölgesindeki dikey eksenle alınan cevapların direkt olarak FCF'leri değerlendirilirse dikey eksenle 498,9 modunun bir miktar tahrik edildiği ancak yetersiz kaldığı görülecektir (Bkz. Şekil 5.9).



Şekil 5.9. Tek eksenle tekli sarsıcı kullanım durumu için toplanmış ve bölgesel FCF'ler

Çoklu eksenle kullanılan çoklu sarsıcının sağlamış olduğu avantajlar görüldükten sonra son olarak, Şekil 5.10 ile çoklu eksenle çoklu sarsıcı kullanımında bir eksenledeki sarsıcının konumu değiştirilerek değerlendirmeler yapılmıştır. Şekil 5.10 ile gösterilen çoklu eksenle çoklu girdinin kullanıldığı modal testlerde bir sarsıcı yanal eksenle mühimmat ortasında; diğer sarsıcı dikey eksenle mühimmat kuyruğu, orta noktası ve buruna yerleştirilmiştir. Bu testlerde önemli bir farklılık gözlenmemiştir. Ancak yerleşim mühimmat ortası ve buruna konumlandığında 395 Hz civarında sarsıcı kaynaklı lokal bir mod oluştuğu görülmektedir. Bu durum çoklu eksenle çoklu sarsıcı kullanımında aynı anda birden fazla eksenle hareketin oluşması sebebiyle oluşabilecek lokal modların gözden geçirilmesi gerektiğini göstermektedir.



Şekil 5.10. Çoklu eksenle çoklu girdi sarsıcı testlerinden alınan FCF'lerin karşılaştırılması

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Mühimmatların modal testleri, dinamik karakterizasyonun doğru mertebelerde gözlenebilmesi için test sınır koşullarının en iyi şekilde oluşturulması amacıyla kurgulanmaktadır. Bir mühimmatın uçuşu boyunca çok eksenli ve çoklu noktalardan bozucu kuvvetlere maruz kaldığı bilinmektedir. Bu nedenle titreşim testleri sırasında çalışma koşulları en gerçekçi şekilde çok eksenli sarsıcılar ile sağlanmaktadır.

Tez kapsamında bir mühimmatın eğilme modlarında dinamik davranışına en yakın şekilde benzetimin sağlanabildiği giriş modeli üzerinden sonlu elemanlar analizleri ve modal testler incelenmiştir. Sonlu elemanlar analizinde kurgulanan serbest sınır koşulu ve yay destekli sınır koşullarının dinamik karakter üzerinde yakın sonuçlar doğurduğu gözlenmiştir. Sonlu elemanlar analizleri ile yapılan numerik çözümlerin modal testler ile doğrulanması sağlanmıştır. Analiz ve testler karşılaştırıldığında yüksek doğrulukta dijital bir ikiz oluşturulduğu görülmektedir. Giriş modeli üzerinde darbe çekici testi, tekli girdi çoklu çıktı sarsıcı testi, tek eksenli çoklu sarsıcı testi ve çoklu eksenli çoklu girdi sarsıcı testi yapılmıştır. Modal test sonuçları bahsi geçen farklı yüklemeler altında incelendiğinde çoklu eksenli çoklu girdi sarsıcı testlerinde eksen dışı eğilme modunun diğer yükleme senaryolarına göre çok daha net bir şekilde gözlemlendiği görülmüştür.

Çalışmanın devamında MK-82 mühimmatının bomba ve kuyruk kompleksi kullanılarak sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan sonlu elemanlar analizleri mühimmat eğilme modları için modal testler ile yüksek yakınlık mertebesinde doğrulanırken lokal modların tahmininde farklılıklar doğurmaktadır. MK-82 test kalemi üzerinde darbe çekici testi, tekli girdi çoklu çıktı sarsıcı testi, tek eksenli çoklu sarsıcı testi ve çoklu eksenli çoklu girdi sarsıcı testi yapılmıştır. Modal test sonuçları MK-82 mühimmatı özelinde bahsi geçen farklı yüklemeler altında incelendiğinde, çoklu eksenli çoklu girdi sarsıcı testlerinde eksen dışı eğilme modunun diğer yükleme senaryolarına göre çok daha net bir şekilde gözlemlendiği görülmüştür. Bu durum ilgili modun en iyi şekilde gözlenebilmesi için o moddaki baskın öteleme yönünde bir tahrik olması gerektiği görüşünü güçlendirmektedir. Elde edilen sonuçlar literatürde yer alan çoklu eksenli sarsıcı kullanımının avantajlarını doğrulamaktadır.

Yapılan çalışmanın geliştirilmesi kapsamında öncelikle tez kapsamında kullanılan çoklu eksende çoklu sarsıcı tahriki, iki sarsıcı ile sağlanmış olsa da sarsıcı sayısının artırılarak hem üç asal eksenin hem de lokal modların aynı anda tahrik edilmesi senaryosu üzerine detaylı bir inceleme gerçekleştirilebilir. Çoklu eksende çoklu sarsıcının getirmiş olduğu kazanımların mühimmatlardaki uygulamaları daha geniş kanatlı veya farklı kesit alanı bulunan havacılık yapılarında da incelenebilir. Ayrıca modal testlerde kullanılan farklı yükleme senaryolarının özellikle karmaşık yapılarda doğurabileceği doğrusal olmayan davranışlar incelenebilir. Bununla birlikte modelleme çalışmaları geliştirilerek, karmaşık yapılarda sonlu elemanlar analizlerinin lokal modlar için eniyilemesi hedeflenerek, en iyi sarsıcı konumu ve yükleme senaryosu için deneysel modal testlerin ön tahminleri geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

1. Kennedy, C. C., Pancu, C. D. P. (1947). Use of Vectors in Vibration Measurement and Analysis. *Journal of the Aeronautical Sciences*, 14(11), 603–625.
2. Bishop, R. E. D., Gladwell, G. M. L. (1963). An investigation into the theory of resonance testing. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series*, 255, 241–280.
3. Cooley, J. W., Tukey, J. W. (1965). An algorithm for the machine calculation of complex fourier series. *Mathematics of Computation*, 19(90), 297–301.
4. Hamma, G. A., Smith, S., Stroud, R. C. (1976). An evaluation of excitation and analysis methods for modal testing. *Society of Automotive Engineers Technical Papers*, 85(1976), 2770–2784.
5. Allemang, R. J. (1980). *Investigation of some multiple input/output frequency response function experimental modal analysis techniques*. University of Cincinnati Department of Mechanical Engineering, 11–215.
6. Craig, R. R., J. (1983). (NASA-CR-170952) *Multishaker modal testing*. Texas: The University of Texas, 36.
7. Hunt, D. L., Peterson, E. L. (1983). Multishaker broadband excitation for experimental modal analysis. *Society of Automotive Engineers Transactions*, 92, 92–105.
8. Ewins, D. J. (1984). *Modal testing: theory and practice*. London: Research Studies Press, 1–269.
9. Kabe, A. M. (1984). Multi-shaker random mode testing. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 740–746.
10. Voorhees, C. R., Clark, G. A. (1984). Discussion of modal test techniques as applied to a spacecraft structure. *Society of Automotive Engineers Transactions Technical Papers*, 93(1984), 597–606.
11. Craig, Roy R., J. (1985). *Multishaker Modal Testing*. Texas: University of Texas, 14.
12. Brillhart, R., Hunt, D. L., Jensen, B. M., Mason, D. R. (1987). Modal survey of the space shuttle solid rocket motor using multiple input methods. *NASA-Marshall Space Flight Center, The 58. Shock and Vibration Symposium*, 1, 155-167
13. To, W. M., Ewins, D. J. (1991). A closed-loop model for single/multi-shaker modal testing. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 305–316.
14. Carne, T. G. (1994). *A modal test design strategy for model correlation*. Proceedings of The International Society for Optical Engineering. 927-933.

15. Maia, N. M. M., Silva, J. M. M. (2001). Modal analysis identification techniques. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 359(1778), 29–40.
16. Füllekrug, U. (2001). Utilization of multi-axial shaking tables for the modal identification of structures. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 359(1786), 1753-1770.
17. Varoto, P. S., De Oliveira, L. P. R. (2002). On the force drop off phenomenon in shaker testing in experimental modal analysis. *Shock and Vibration*, 9(4-5), 165–175.
18. Irretier, H. D. (2002). History and development of frequency domain methods in experimental modal analysis. *Journal de Physique IV*, 12, 91-100.
19. Wang, F., Mechefske, C. K. (2005). Modal analysis and testing of a thin-walled gradient coil cylinder model. *Concepts in Magnetic Resonance Part B: Magnetic Resonance Engineering*, 27(1), 34–50.
20. Wernholt, E., Gunnarsson, S. (2007). *Analysis of methods for multivariable frequency response function estimation in closed loop*. Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control, 4881–4888.
21. Brown, D. L., Allemang, R. J. (2007). The modern era of experimental modal analysis one historical perspective. *Sound and Vibration*, 41(1), 16–26.
22. Underwood, M., Keller, T. (2008). Testing civil structures using multiple shaker excitation techniques. *Sound and Vibration*, 10–15.
23. Yao, J. Y., Li, C. R., Diao, X. X. (2009). *Study of real-time multi-shaker random vibration testing system*. World Congress on Computer Science and Information Engineering, 3, 291–295.
24. Sun, F., Li, X.-Y., Jiang, T., Zhang, W. (2009). *A multi-axis vibration fixture based on electromagnetic shaker*. In Proceedings of 2009 8. International Conference on Reliability, Maintainability and Safety, 1183-1186.
25. Daborn, P. M., Roberts, C., Ewins, D. J., Ind, P. R. (2014). *Next-generation random vibration tests*. Topics in Modal Analysis Proceedings of the 32. A Conference and Exposition on Structural Dynamics, 397-410
26. Peres, M. A., Kallmeyer, C., Witter, M. C., Carneiro, R., Marques, F. D., De Oliveira, L. P. R. (2014). *Advantages of multiple-input multiple-output (MIMO) testing using low level excitation systems*. Proceedings of 2014 - International Conference on Noise and Vibration Engineering and 2014 - International Conference on Uncertainty in Structural Dynamics, 1121–1134.
27. Daborn, P. M., Ind, P. R., Ewins, D. J. (2014). Enhanced ground-based vibration testing for aerodynamic environments. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 49(1–2), 165–180.

28. Daborn, P. M., Ind, P. R., Ewins, D. J. (2014). *Replicating aerodynamic excitation in the laboratory*. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series, 7, 259–272.
29. Allemang, R. J., Sharma, A., Brown, D. L. (2016). A new excitation technique for MIMO FRF estimation using multiple, pneumatic, random impact inputs. *Proceedings of ISMA 2016 - International Conference on Noise and Vibration Engineering and USD2016 - International Conference on Uncertainty in Structural Dynamics*, 2145–2159.
30. Underwood, M. A., Keller, T., Ayres, R. (2017). Multi-shaker control: a review of the evolving state-of-the-art. *Sound and Vibration*, 51(8), 8–16.
31. Musella, U., Manzato, S., Peeters, B., Marulo, F., Guillame, P., D’Elia, G. (2017). *Tackling the target matrix definition in MIMO random vibration control testing*. Proceedings of the 30th Aerospace Testing Seminar, 2-18.
32. Roberts, C., Ewins, D. (2018). Multi-axis vibration testing of an aerodynamically excited structure. *JVC/Journal of Vibration and Control*, 24(2), 427–437.
33. Ristow J., Smith K.W., Johnson N., K. J. (2019). *Comparing fixed-base and shaker table model correlation methods using jim beam*. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series, 9, 303–312.
34. Rohe, D. P., Nelson, G. D., Schultz, R. A. (2020). *Strategies for shaker placement for impedance-matched multi-axis testing*. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series, 7, 195–212.
35. Stasiunas, E. C., Parks, R. A., Sontag, B. D., Chandler, D. E. (2020). *Modal test of the NASA mobile launcher at Kennedy Space Center*. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series, 7, 213-228.
36. Schultz, R. A. (2020). *A demonstration of force estimation and regularization methods for multi-shaker testing*. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series, 7, 229–243.
37. Avitabile, P. (2017). *Modal testing: a practitioner’s guide*. Lowell: Wiley. 3-89.
38. Heylen, W., Lammens, S., Sas, P. (1998). *Modal analysis theory and testing*. Leuven: Katholieke Universiteit Leuven, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Division of Production Engineering, 2-19.
39. Rao, S. S. (2010). *Mechanical vibrations*, Miami: Prentice Hall, 2-120.
40. Fu, Z. F., He, J. (2001). *Modal analysis*, Oxford: Elsevier Science Group, 12-75.
41. Dynamic Testing Agency Handbook (1994) *Modal Testing and Validation* – London: DTA, 942-1069.
42. MIL-STD-810H (2019), *Military standard, environmental test methods and engineering guidelines*. United States Department of Defense

43. Castellini, P., Martarelli, M., Tomasini, E. P. (2006). Laser doppler vibrometry: development of advanced solutions answering to technology's needs. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(6), 1265–1285.
44. By, W., Santos, F., Peeters, B., Debille, J., Salzano, C., Carlos, L., G'oes, S., Desmet, W., dos Santos, F., Goes, L. (2015). *The use of dynamic strain sensors and measurements on the ground vibration testing of an F-16 aircraft*. International Forum on Aeroelasticity and Structural Dynamics, 2-12.
45. B. Peeters, H. Van der Auweraer, P. Guillaume, J. Leuridan (2004). "The polymax frequency-fomain method: a new standard for modal parameter estimation?" *Shock and Vibration*, 11 (3-4), 395-409.
46. Krishnamoorthy, L. V., Kirk, D. R., Glass, R. (1997). An aerodynamic database for the MK 82 general purpose low drag bomb. *Defence Science and Technology Organization*, 2-36.



GAZİ GELECEKTİR..