FR4 VE ALUMİNYUM PCB TEST PLAKALARININ MAC METODU KULLANILARAK TİTREŞİM DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Enes ÇAL

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FR4 VE ALUMİNYUM PCB TEST PLAKALARININ MAC METODU KULLANILARAK TİTREŞİM DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Enes ÇAL

Doç. Dr. Betül Gülçimen Çakan
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2024

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

FR4 VE ALUMİNYUM PCB TEST PLAKALARININ MAC METODU KULLANILARAK TİTREŞİM DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Enes ÇAL

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Betül Gülçimen ÇAKAN

Bu çalışmada, FR4 ve Alüminyum malzemeden oluşan 2 farklı malzeme plakası sayısal ve deneysel modal testler için hazırlanmıştır. Öncelikle plakaların mod şekillerini sönümleme oranlarını ve doğal frekanslarını içeren titreşim davranışları ANSYS WB® R23.2 analiz programı yardımıyla elde edilmiştir. Daha sonrasında plakaların titreşim davranışlarını deneysel testler ile elde etmek ve sayısal sonuçları doğrulamak için DEWESoft® programı kullanılarak darbe çekiç gezdirme, ivmeölçer gezdirme ve modal sarsıcı testleri uygulanmıştır. Yapıların FRF sonuçları deneysel modal test yazılım programları kullanılarak elde edilmiş ve gerekli değerler MEScope yazılımı kullanılarak hesaplanmıştır. Test sonrası yapıların tahrik noktaları ve mod şekilleri eşleştirilerek deneysel ve sayısal modal testler veya deneysel modal testler arasında MEScope® yazılımı kullanılarak yapıları karşılaştırmak için MAC hesaplatılmıştır. Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinin temel amacı, sayısal ve deneysel analizlerin doğrulanmasını sağlayarak bu test yöntemlerinin uygulanabilir olup olmadığını kanıtlamak, ayrıca deneysel modal testlerin gerçekleştirilmesi ve sonuçların karşılaştırılmasında hangi kriterlerin önemli olduğunu açıklamaktır.

Anahtar Kelimeler: Titreşim, Sonlu Elemanları Modal Analizi, Deneysel Modal Analiz, Modal Güvence Kriteri, F4 ve Alüminyum malzemeleri, Frekans Cevap Fonksiyonu
2024, ix + 83 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

INVESTIGATION OF VIBRATION BEHAVIOR OF FR4 AND ALUMINUM PCB MATERIALS BY USING THE MAC METHOD

Enes ÇAL

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Doç. Dr. Betül GÜLÇİMEN ÇAKAN

In this study, two different material plates made of FR4 and Aluminum have been prepared for numerical and experimental modal tests. Firstly, the vibration behaviors which are mode shapes, damping ratios and natural frequencies were observed by help of ANSYS WB® R23.2 Finite Element Analysis software. After that in order to obtain vibration behaviors of structures and confirm the material plates were implemented by applying of Experimental Test Methods using DEWESoft® which consist of roving accelerometer, roving impact hammer and modal shaker test methods. FRF results of structures were obtained by experimental test software and after that the other required values were calculated by using MEScope® software. The excitation poinst and mode shapes were matched, and MAC was calculated to compare of the structures between EMA-FEA and EMA-EMA. The main aim of performing this study provided to validation numerical and experimental analysis so it is possible to conduct this test methods whether is applicable or not also to observe which criterias are important for comparison and performing experimental modal test.

Keywords: Vibration, Finite Element Modal Analysis, Experimental Modal Analysis, Modal Assurance Criteria (MAC), FR4 and Al materials, Frequency Response Function (FRF)
2024, ix + 83 pages.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmam boyunca bana yol gösteren değerli hocam Doç. Dr. Betül GÜLÇİMEN ÇAKAN'a, Yüksek Lisans yapmam konusunda her zaman destek olan Marelli Mako Yönetimine, bana bu imkanı sağlayan tecrübesiyle ve bilgisiyle yol gösteren değerli müdürüm Emre ÖZTÜRK'e, analizler ve testler sırasında benden desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen Barış EDİZ ve Ar-ge EEV departmanına, ve son olarak desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme teşekkür ederim.

ENES ÇAL
16/01/2024

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET i
ABSTRACT ii
TEŞEKKÜR iii
İÇİNDEKİLER iv
SİMGELER VE KISALTMALAR vi
ŞEKİLLER DİZİNİ vii
ÇİZELGELER DİZİNİ ix
1. GİRİŞ 1
1. Tezin amacı 2
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI 4
2.1. Titreşim 10
2.2. Titreşim Türleri 12
2.2.1. Sönümsüz Serbest Titreşim 12
2.2.2. Sönümlü Serbest Titreşim Hareketi 15
2.3. Deneysel Modal Analiz 16
2.4. Modal Test Yöntemleri ve Ekipmanları 19
2.4.1. Darbe Çekiç Test Yöntemi 20
Darbe Çekiç Uç Seçimi 21
2.4.2. Modal Sarsıcı Test Yöntemi 23
2.4.3. İvmeölçerler 24
2.4.4. Veri Toplama Sistemleri 25
2.5. Hızlı Fourier Dönüşümleri (FFT) 26
2.6. Modal Test Uygulama Çeşitleri 28
2.6.1. Tek referanslı gezdirilen çekiç testi 28
2.6.2. Tek referanslı Gezdirilen İvmeölçer Testi 28
2.6.3. Tek Referanslı Sarsıcı Testi 29
2.6.4. Çok Referanslı Modal Testleri 29
2.7. Deneysel Modal Analiz Parametreleri 30
2.7.1. Frekans Cevap Fonksiyonu (FRF) 31
2.7.2. Tutarlılık 32
2.7.3. Modal Doğrulama (Modal Güvence Kriteri, MGM/MAC) 34
3. MATERYAL VE YÖNTEM 37
3.1. Darbe Çekiç 37
3.2. Modal Sarsıcı 38
3.3. İvmeölçerler 39
3.4. Paket Programlar 40
3.5. Veri Toplama Sistemi 41
3.6. Test Edilen Parçalar 43
3.6.1. FR4 PCB Plakası 43
3.6.2. Alüminyum Test Plakası 45
4. TEST BULGULARI 47
4.1. Test Numunelerinin Sonlu Elemanlar Modal Analizi 49
4.1.1. Alüminyum plaka 49

4.1.2. FR4 PCB plaka 52
4.2. Test Numunelerinin Deneysel Modal Analizi 57
4.2.1. Al Plaka 57
Al Plaka Üzerinde Darbe Çekiç Test Metodu 58
Al Test Plakası Üzerinde İvmeölçer Gezdirme Test Metodu 61
Al Test Plakası Üzerinde Modal Sarsıcı Test Metodu 62
Al Plaka Deneysel Modal Analiz Gösterimleri 66
4.2.2. FR4 PCB Plaka 68
FR4 PCB Plaka Deneysel Modal Analiz Gösterimleri 73
4.3. MGM Matrisinin MEScope® yazılımı kullanılarak hesaplanması 75
4.3.1. Al Plaka İçin MGM Matrisinin Hesaplanması 76
4.3.2. FR4 Plakası İçin MGM Matrisinin Hesaplanması 79
5. TARTIŞMA VE SONUÇ 84
KAYNAKLAR 87
ÖZGEÇMİŞ 90

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
f	Doğal frekans (Hz)
T	Periyot (s)
x	Yer değiştirme (m)
x(t)	Kütlenin 't' anındaki yer değiştirme miktarı (m)
v(t)	Kütlenin 't' anındaki hızı (m/s)
α(t)	Kütlenin 't' anındaki ivmesi (m/s^2)
ω_n	Sönümsüz açısal doğal frekans (rad/s)
k	Yay sertliği veya yay katsayısı (N/m)
m	Cismin kütlesi (kg)
R	Titreşim hareketinin tepe genliği (m)
θ	Faz açısı (rad)
A	Sistemin modal şekilleri ile bağlantılı değişken
N	Sistemi tanımlayan serbestlik derecesi sayısı
t	Zaman (s)
w	Sistemin sönümlü frekansları (Hz)
σ	Sönüm katsayısı
X(ω)	Tepki fonksiyonunun Fourier dönüşümü
F(ω)	Etki fonksiyonunun Fourier dönüşümü
H(ω)	Transfer fonksiyonu
a_0	Fourier serisi sabiti
a_n	Fourier serisi sabiti
b_n	Fourier serisi sabiti
η_r	r. modun sönüm kayıp çarpanı
ζ_r	r. modun sönüm oranı
ω_a	r. modun sağındaki frekans değeri
ω_b	r. modun solundaki frekans değeri
$\{\Phi\}_{TEST}$	Test modal vektörü
$\{\Phi\}_{SE}$	Sonlu elemanlar modal vektörü

Kısaltmalar	Açıklama
FRF	Frekans Cevap Fonksiyonu
PMMA	Polimetil metakrilat
MGM/MAC	Modal Güvence Matrisi
FFT	Hızlı Fourier Dönüşümleri
DOF	Serbestlik Derecesi
PCB	Baskı Devre Kartı
EMA	Deneysel Modal Analiz

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 2.1.	Titreşim sistemi (Anonim 1997)	10
Şekil 2.2.	Titreşim hareketinin zaman ve frekans gösterimi (Çay 2006)	12
Şekil 2.3.	Sönümsüz serbest titreşim	13
Şekil 2.4.	Sönümlü serbest titreşim sistemi	15
Şekil 2.5.	Sönümlü titreşim modeli (Thompson 1996)	16
Şekil 2.6.	Deneysel modal analiz sistemi (Şekerci 2013)	18
Şekil 2.7.	Fourier dönüşümü (Şekerci 2013)	19
Şekil 2.8.	Modal çekiç sistemi (Anonim 2019a)	20
Şekil 2.9.	Uç seçimi (Anonim 2019a)	21
Şekil 2.10.	Yumuşak uç - Yeşil: Koherans, Kırmızı: FRF, Mavi: Girdi kuvvet spektrumu	22
Şekil 2.11.	Sert uç - Yeşil: Koherans, Kırmızı. FRF, Mavi: Girdi kuvvet spekturumu	22
Şekil 2.12.	Doğru uç – Yeşil: Koherans, Kırmızı: FRF, Mavi: Girdi kuvvet spekturumu	22
Şekil 2.13.	Modal sarsıcı sistemi (Anonim 2022a)	24
Şekil 2.14.	Modal sarsı çeşitleri (Anonim 2022a)	24
Şekil 2.15.	Tek referanslı çekiç testi (Anonim 2000)	28
Şekil 2.16.	Tek referanslı gezdirilen ivmeölçer testi (Anonim 2000)	29
Şekil 2.17.	Tek referanslı sarsıcı testi (Anonim 2000)	29
Şekil 2.18.	Çok referanslı çekiç testi (Anonim 2000)	30
Şekil 2.19.	Çok referanslı sarsıcı testi (Anonim 2000)	30
Şekil 2.20.	Frekans cevap fonksiyonu	32
Şekil 2.21.	FRF ve tutarlılık grafiği. (FRF-kırmızı, Tutarlılık-yeşil) (Anonim 2020)	33
Şekil 2.22.	MAC matrisi	34
Şekil 3.1.	Darbe çekici IH-01 (Anonim 2017)	37
Şekil 3.2.	Modal sarsıcı (Modal 50A) (Anonim 2021a)	38
Şekil 3.3.	Kuvvet sensörü modeli (Anonim 2023)	39
Şekil 3.4.	DYTRAN ınstruments ivmeölçer modeli (Anonim 2023b)	39
Şekil 3.5.	PCB PIOZETRONICS ivmeölçer modeli (Anonim 2023c)	40
Şekil 3.6.	DEWESoft® 16 kanallı veri toplama sistemi	41
Şekil 3.7.	NI USB-4431 veri toplama sistemi	42
Şekil 3.8.	PCB katmanları	44
Şekil 3.9.	Titreşim test düzeneği (Kaya 2021)	46
Şekil 3.10.	Alüminyum PCB titreşim testi fikstürü	47
Şekil 4.1.	Sonlu elemanlar Al plaka modeli	50
Şekil 4.2.	Al plaka 1. mod - 258,25 Hz	51
Şekil 4.3.	Al plaka 2. mod - 815,11 Hz	51
Şekil 4.4.	Al plaka 3. mod - 1084 Hz	52
Şekil 4.5.	FR4 plaka modeli	53
Şekil 4.6.	ISO 527-4 Çekme testi numune boyutları	53
Şekil 4.7.	FR4 PCB plaka çekme testi numunesi	53

Şekil 4.8.	Çekme testi	54
Şekil 4.9.	FR4 çekme testi diyagramı (x yönünde)	54
Şekil 4.10.	FR4 çekme testi diyagramı (y yönünde)	55
Şekil 4.11.	FR4 plaka 1. mod - 34.5 Hz	55
Şekil 4.12.	FR4 plaka 2. mod - 96.4 Hz	56
Şekil 4.13.	FR4 plaka 3. mod - 188 Hz	56
Şekil 4.14.	FR4 plaka 4. mod - 235 Hz	56
Şekil 4.15.	Al plaka geometrisi	57
Şekil 4.16.	Al plaka test numunesi	58
Şekil 4.17.	Al test plakası test düzeneği	59
Şekil 4.18.	Al plaka elastik iple asma sonucu FRF sonuçları (Çekiç gezdirme metodu)	59
Şekil 4.19.	Sönümleyici test düzeneği	60
Şekil 4.20.	Al plaka sönümleyici ortamda FRF sonuçları (Çekiç gezdirme metodu)	60
Şekil 4.21.	Al plaka FRF sonuçları (İvmeölçer gezdirme metodu)	62
Şekil 4. 22.	Modal sarsıcı test düzeneği	63
Şekil 4.23.	Al plaka FRF sonuçları (Sarsıcı test metodu)	64
Şekil 4.24.	Al plaka genel FRF sonuçları (Sarsıcı test metodu)	64
Şekil 4.25.	Al test plakası 1. mod	66
Şekil 4.26.	Al test plakası 2. mod	67
Şekil 4.27.	Al test plakası 3 .mod	67
Şekil 4.28.	FR4 PCB plaka geometrisi	68
Şekil 4.29.	(a) 55 ölçüm noktalı FR4 plaka, (b) 18 ölçüm noktalı FR4 plaka	69
Şekil 4.30.	FR4 plaka test düzeneği (a) FR4 test düzeneği kauçuk montajlanmadan (b) FR4 test düzeneği her noktaya kauçuk montajlanarak	69
Şekil 4.31.	FR4 plaka FRF sonuçları (Çekiç gezdirme metodu)	70
Şekil 4.32.	FR4 plaka FRF sonuçları (İvmeölçer gezdirme metodu)	71
Şekil 4.34.	FR4 plaka 1. mod	73
Şekil 4.35.	FR4 plaka 2. mod	74
Şekil 4.36.	FR4 plaka 3. mod	74
Şekil 4.37.	FR4 plaka 4. mod	75
Şekil 4.38.	Al test plakası MGM matrisi (Çekiç gezdirme metodu)	77
Şekil 4.39.	Al test plakası MGM tablosu (Çekiç gezdirme metodu)	77
Şekil 4.40.	Al test plakası MGM matrisi (İvmeölçer gezdirme metodu)	78
Şekil 4.41.	Al test plakası MGM tablosu (İvmeölçer gezdirme metodu)	78
Şekil 4.42.	Al test plakası MGM matrisi (Modal sarsıcı test metodu)	79
Şekil 4.44.	FR4 plaka MGM matrisi (Çekiç gezdirme metodu)	80
Şekil 4.45.	FR4 plaka MGM tablosu (Çekiç gezdirme metodu)	81
Şekil 4.46.	FR4 plaka MGM matrisi (İvmeölçer gezdirme metodu)	81
Şekil 4.47.	FR4 plaka MGM tablosu (İvmeölçer gezdirme metodu)	82
Şekil 4.48.	FR4 plaka MGM matrisi (İvmeölçer gezdirme metodu, kauçuk ile birlikte)	82
Şekil 4.49.	FR4 plaka MGM tablosu (İvmeölçer gezdirme metodu kauçuk ile birlikte)	83

ÇİZELGELER DİZİNİ

		Sayfa
Çizelge 3.1.	Dewesoft veri toplama sistemi özellikleri.....	41
Çizelge 3.2.	NI USB-4431 veri toplama sistemi genel özellikleri.....	43
Çizelge 4.1.	Al plakası malzeme özellikleri.....	50
Çizelge 4.2.	FR4 çekirdek plakası malzeme özellikleri.....	55
Çizelge 4.3.	Al plaka analiz ve çekiç gezdirme test sonuçlarının karşılaştırılması	65
Çizelge 4.4.	Al plaka analiz ve ivmeölçer gezdirme test sonuçlarının karşılaştırılması	65
Çizelge 4.5.	Al plaka analiz ve modal sarsıcı test sonuçlarının karşılaştırılması	65
Çizelge 4.6.	FR4 plaka analiz ve çekiç gezdirme test sonuçlarının karşılaştırılması	71
Çizelge 4.7.	FR4 plaka analiz ve ivmeölçer gezdirme test sonuçlarının karşılaştırılması	71
Çizelge 4.8.	FR4 plaka analiz ve ivmeölçer gezdirme test (kauçuk ile birlikte) sonuçlarının karşılaştırılması	72

1. GİRİŞ

Otomotiv ve savunma sanayi gibi sektörlerde faaliyet gösteren üretici firmalar, değişen pazar dinamikleri ve yoğun rekabet ortamında sürekli olarak kendilerini geliştirmektedir. Bu pazarda kalıcı olabilmek, yeni teknolojik yenilikleri izleyip uygulamakla mümkündür. Baskı devre kartları, günümüz teknolojisinin vazgeçilmez unsurlarındandır. Elektronik cihazların ihtiyaç duyduğu baskı devre kartlarının önemi, her sektörde giderek artmaktadır. Baskı devre kartları, ya da daha yaygın bilinen adıyla PCB, elektriksel olarak bileşenleri bir araya getiren ve mekanik olarak destek sağlayan kartlardır. Baskı devre kartları çeşitli malzemelerden üretilebilmektedir; ancak dinamik ve elektriksel özellikleri sağlamak amacıyla, genellikle ısıya dayanıklı, kendiliğinden sönme özelliğine sahip, neme ve sarsıntıya dayanıklı, üzerinde rahat çalışılabilen ve en yaygın olarak kullanılan FR4 malzemesi tercih edilmektedir.

Askeri cihazlarda, otomotivde kullanılan vb. cihazlar üzerinde bulunabilen baskı devre kartları zor çevre koşullarından dolayı dinamik yüklere maruz kaldığında bu kuvvetlerin titreşim frekansları, parçaların doğal frekansına etki ederek parçaların rezonansa girmesine sebep olur. Rezonansa maruz kalan parçaların üzerinde sürtünmeden kaynaklı toz oluşumu ve titreşimin yüksek genliklerde olması halinde parça üzerinde kırıklar meydana gelmesi gibi bir çok önemli soruna sebebiyet vermektedir. Ayrıca rezonansa giren parça, işlevsel olarak çalıştığı komponentleride etkilemektedir. Bu gibi dinamik problemlerin çözülebilmesi için yapıların dinamik davranışlarının belirlenmesi ve incelenmesi gerekmektedir. Dinamik davranışlarının belirlenebilmesi ve parçanın rezonans noktalarında sergileyeceği davranışları incelemek için modal analizlere başvurulur.

Deneysel modal analiz, gün geçtikçe daha çok öne çıkan bir konu haline gelmiştir. Özellikle titreşim sorunun içinde bulunduğu üretici firmalar modal analiz yöntemlerine başvurmaktadır. Teknolojinin gelişmesi ile birlikte bilgisayar destekli programlar parçaların modal analizini kolaylıkla gerçekleştirebilir ve sonucunda parçanın doğal frekanslarını, sönüm oranlarını, frekanslara karşılık mod şekillerini ortaya çıkartabilir.

Sonlu elemanlar metodu ile çözdürülen modal analiz çoğu sektörde yaygın olarak parçaların rezonans noktalarını tespit etmek amacı ile kullanılmaktadır.

Numerik olarak gerçekleştirilen modal analizler sonucunda ise fiziksel bir doğrulamaya ihtiyaç duyulmaktadır ve bilgisayar ortamında yapılan analizin doğruluk payının, gerçeği yansıtıp yansıtamadığının tespit edilebilmesi ve parçanın dinamik davranışlarının fiziksel ortamda belirlenip kıyaslanabilmesi için deneysel modal analiz yöntemine gereksinim duyulmaktadır. Günümüzde de birçok konu dahilinde deneysel modal analiz yöntemi ile karşılaşılabilir.

Deneysel Modal Analiz;

- Füzenin dinamik karakterizasyonda çok eksenli tahrik durumu için modal parametrelerinin belirlenmesinde (Yıldız 2021),
- Binek araç gündüz farlarının parametrelerinin belirlenmesinde (Ediz ve ark. 2017),
- Hava aracı komponentlerinin dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde (Şekerci 2013),
- Kemer barajlarının dinamik karakterizasyonlarının belirlenmesinde (Sevim 2010),
- Beyaz eşya sektöründe, titreşim performasının maksimum olduğu çamaşır makinesinin sıkma modunda oluşan titreşimlerin incelenmesinde (Esen ve ark. 2016),

olduğu gibi birçok sektörde (otomotiv ,havacılık, inşaat, beyaz eşya vb.) kullanılan ve tercih edilen bir yöntemdir.

1.1. Tezin amacı

Mühendislikte yapılan tasarım çalışmaları sırasında daha sonrasında ardından gelen iyileştirme ve optimizasyon çalışmaları sırasında yapıların statik ve dinamik etki altındaki davranışlarını incelemek ve bilmek son derece önemlidir. Yapıların etki altındaki davranışlarını bilmek için ise titreşim gereksinimlerini belirlemek gerekmektedir. Bu

titreşim karakteristikleri ise doğal frekanslar, sönüm oranları ve mod şekillerinden oluşur. Yapılan çalışmalarda rezonans etkisinden kaçınmak gerekir özellikle birçok sektör açısından rezonans sorunu büyük bir önem taşımaktadır. Yapılara etki eden kuvvetlerin frekansları, doğal frekanslarıyla denk gelmesi sonucu rezonans olayı meydana gelmektedir. Dolayısıyla yapıların belli bir kuvvet altında sergileyeceği dinamik davranışlarını bilmek, rezonans açısından ve yapılara etki eden dinamik kuvvetlerin cevabının araştırılması açısından oldukça önem arz etmektedir. Bu cevapların araştırılması ve yapıların dinamik davranışlarının belirlenebilmesi için modal analiz yöntemlerine başvurulmaktadır. Bu çalışma birçok sektörde kullanılan baskı devre kartlarının alt katman malzemelerini ve ayrıca devre kartları için kullanılan fikstür plaka malzemeleri üzerinde modal davranışları incelemek ve modal analiz yöntemlerinin önemini göstermek için yapılmıştır. Gerçekleştirilen bu çalışmada yapılar üzerinde farklı parametreler ile deneysel modal testler gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel test ölçümlerinin doğruluğunu ve numerik çalışmalar ile birbirleri arasındaki tutarlılığını incelemek için ANSYS WB® programında sonlu elemanlar metodu ile sayısal modal analizler gerçekleştirilmiştir. Deneysel modal testler sırasında yapılar üzerine etki kuvvetini ölçmek amacı ile çekiç ve etki sonrası oluşan tepkiden meydana gelen titreşim değerlerinin ölçümü ise modal ivmeölçerler ile sağlanmıştır. Ölçülen sinyaller DEWESoft® Sirius HD 16x STGS veri toplama cihazı sayesinde hesaplanarak test ölçümlerine ait FRF verileri elde edilmiştir. Ayrıca yapılar üzerinde deneysel modal test yöntemlerinden olan çekiç gezdirme, ivmeölçer gezdirme ve sarsıcı ile test metodları birer birer uygulanmış ve bahsedildiği gibi her test metodu için ayrı ayrı FRF verileri elde edilmiştir. Test ölçümü sonrası FRF verileri incelenmiş, doğal frekans ve sönüm oranları belirlenerek yapıların mod şekilleri eğri uydurma yöntemi ile oluşturulmuştur. Bilgisayar destekli modal analiz sonuçlarından da elde edilen doğal frekans değerleri, sönüm oranları ve mod şekilleri test ölçümü sonrası elde edilen veriler ile MGM matris yöntemi metoduyla karşılaştırılmıştır. Daha sonrasında deneysel modal testlerin uygulamasında elde edilen deneyimler ve sonuçlar paylaşılmış, çalışmanın doğruluğu ve sonucundan elde edilen öneriler sunulmuştur.

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

Deneysel modal analiz çalışmalarında geçmişten gelen bir çok çalışma mevcuttur ve geleneksel yöntemlerin yanı sıra teknolojnin gelişmesiyle birlikte modal analiz çalışmaları da ilerlemiştir. Deneysel Modal analiz çalışmaları ile birlikte test altındaki yapının titreşim, sönüm oranları, dinamik karakteristikliği vb. belirlenmiş ve bunlar sayesinde yapının optimize edilmesine olanak sağlanmıştır. Çalışmaların uygulama alanları sektörden sektöre farklılık göstermekle birlikte teknolojinin artışı ile geniş bir alana yayılmıştır. Örneğin;
Bishop Bishop ve Gladwell (1963), "Rezonans Test Teorisi" adını verdikleri bir çalışma yaparak rezonans durumlarını belirlemiş ve çeşitli yöntemleri de kapsayan bir araştırma sunmuşlardır.

Hunt ve Peterson (1983), çoklu sarsıcı kullanılarak gerçekleştirilen modal testlerde, deneysel modal testlerin ön kabullerinden biri olan tutarlılık konusunda, çoklu sarsıcı kullanımının daha güvenilir sonuçlar verdiğini ortaya koymuşlardır. Bu çalışma, aynı zamanda çoklu sarsıcı kullanımının testlerde önemli ölçüde zaman tasarrufu sağladığını da açıkça belirtmiştir. Modal vektörlerin doğruluğunu değerlendirmek amacıyla Modal Güvence Kriteri (Modal Assurance Criterion, MAC) matrisleri incelenmiş ve çoklu sarsıcı kullanımında enerjinin geniş bir bantta daha iyi dağıldığı gösterilmiştir.

Voorhees ve Clark (1984), bir uzay aracı yapısında modal test tekniklerini ele aldıkları çalışmalarında; çoklu sarsıcı ile sinüs sinyali, tek sarsıcı ile rastgele titreşim girdisi ve çoklu sarsıcı ile rastgele titreşim girdisi kullanarak meteorolojik bir uzay yapısı üzerinde testler yapmışlardır. Bu çalışmada, her sarsıcı testi birbiriyle karşılaştırılmış ve uygulama süreleri de detaylı olarak değerlendirilmiştir.

Brillhart, Hunt, Jensen ve Mason (1987), gerçekleştirdikleri çalışmada bir katı yakıtlı roket motorunun çoklu girdi ile modal karakterini belirlemişlerdir. Çalışmanın sonucunda, sönümleme oranı yüksek olan viskoelastik bir test konusu olarak katı yakıtlı roket motoru için çoklu sarsıcı kullanımının önemi ve avantajları ortaya konulmuştur.

Schwarz ve Richardson (1999), deneysel modal analiz sırasında gerekli olan ekipmanların ve parametrelerin (doğal frekans, titreşim, sönüm oranı, mod şekilleri) belirlenmesine kadar gerçekleşen bütün aşamaları sırasıyla sunan bir çalışma sunmuşlardır.

Karuppaiah, Sujatha ve Ramamurti (1999), bir binek aracının şasi parçaları, dingilleri, süspansiyon sistemleri ve lastikleri üzerinde araştırma yapmışlar ve aracı 4-poster test düzeneği üzerine yerleştirerek lastiklere spektral güç yoğunluğunu girdi olarak sağlamışlardır. Bu çalışmada, modal analiz için Lanczos metodu kullanılmıştır. Test sonuçları, aracın kritik noktalarındaki ivmeölçerlerden ve gerilim ölçerlerden elde edilen verilerle doğrulanmış ve kıyaslanmış. Bu doğrulama ve kıyaslama işlemleri sonlu elemanlar metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Altunel (2009), bir genel maksat helikopterinin yapısal sonlu elemanlar modelini güncelleme çalışmaları yapmıştır. Öncelikle, helikopterin modal testlerini modal sarsıcı yardımıyla gerçekleştirmiştir. Elde ettiği test sonuçlarını sonlu elemanlar yöntemiyle karşılaştırarak tüm helikopter gövdesini optimize etmiştir.

Yao (2002), esnek bir sistem üzerinde insanların hareketinden dolayı oluşan tepkiyi saptamak amacıyla bir test sistemi hazırlamışlardır. Bu sistem ile birlikte yapıya etki eden kuvveti ve yapının tepki noktaları ölçülmüştür.

Brughmans (1995), iki yolcu kapasiteli bir otomobilin gövdesi üzerinde deneysel ve sayısal modal analiz yapmıştır. Deneysel modal analiz sonuçları, MSC/NASTRAN sonlu elemanlar programı tarafından elde edilen sonuçlarla kıyaslanmış ve iyileştirmeler yapılmıştır.

Yılmaz ve Uysal (2021), Trapez sacların titreşim davranışlarını sırasıyla deneysel modal analiz ve testleri ile incelemişlerdir. Farklı trapez sac geometrileri için sonlu elemanlar analizlerinin gerçekleştirmişler ve sonlu elemanlar analizlerini doğrulamak adına deneysel modal analizler gerçekleştirmişlerdir.

Şimşek (2010) çalışmasında, ANSYS WB® programı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemiyle bir iş makinesi kabininin doğal frekanslarını belirledi. Yolun durumu ve diğer faktörler, kabindeki titreşimleri artırabilir, bu yüzden tasarlanan kabinin doğal frekanslarının dış etkenlerle oluşan titreşimlerin frekans aralığından farklı olması hedeflenmiştir.

Thor ve Chippa (2015) çalışmasında, bir aracın seyir halindeyken motor ve yol kaynaklı titreşimlerin aracın yan aynasında nasıl etkiler oluşturduğunu incelediler. Bu etkileri öngörmek için sayısal modal analizler gerçekleştirdiler ve teorik analizi desteklemek için deneysel modal analizler de yaptılar.

Erdoğan (2016), taşıtlardaki süspansiyon sistemlerinde bulunan yaprak yaylarını çeşitli kompozit malzemelerle farklı modellerde üreterek hem sonlu elemanlar analizi hem de deneysel modal testlerini gerçekleştirmiştir. Yapılan deneysel ve hesaplamalı modal analiz sonuçlarını karşılaştırarak detaylı bir inceleme yapmıştır.

Daborn ve ark. (2014) çalışmalarında, yeni nesil gelişigüzel titreşim araştırmalarını ele aldılar. Araştırmada, uçak kanadının altında kullanılan bir mühimmatın titreşim testleri için girdi yöntemlerini incelediler. Testin kontrol ünitesini çoklu cevap noktaları kullanarak gerçekleştirdiler. Çalışma, çoklu eksende verilen tahrik senaryosunun gerçek uçuş sırasındaki aerodinamik etkilere en uygun yaklaşım yöntemi olduğunu vurguladı.

Gibson (2000), fiber takviyeli kompozit malzemelerin dinamik davranışlarını belirlemek için kullanılan modal analiz yöntemlerini, belirlenen parametreleri ve bu parametrelerin değişimini etkileyen faktörleri açıklamıştır.

Ay ve ark. (2019), PMMA malzemeden üretilmiş 4 farklı modele sahip otomotiv arka aydınlatma elemanlarından biri olan dış lensin sonlu elemanlar analizi ile birlikte doğal frekans,sönüm ve mod şekillerini belirlemiştir. Analizin doğrulamasını deneysel modal analiz üzerinde farklı parametreler deneyerek modal test parametrelerinden biri olan darbe çekiç yöntemi ile desteklemiş ve etki eden parametreleri belirlemişlerdir. MGM ile

sonlu elemanlar yönteminden elde edilen sonuç ile deneysel modal analiz sonuçlarını karşılaştırmışlardır.

Dahil (2017), çalışmasında gözenek yoğunlukları birbirinden faklı 3 adet döküm yöntemiyle üretilem alüminyum köpük malzemelerin dinamik davranışlarını modal analiz yöntemini kullanarak incelemiştir.Sonuçları incelediğinde malzemenin yaylanması ve kütlenin sonuçlara etki ettiğini gözlemlemiş ve gözeneği az olan malzemenin en son rezonansa girdiğini vurgulamıştır.

Azam ve Fragoso (2020), çalışmalarında ince bakır filmlerin FR4 plakasına bağlantılı olan 4 farklı parça üzerinde deneysel ve sayısal modal analizler gerçekleştirerek parçaların titreşim davranışlarını dikkate almışlardır. Bu çalışmalarında bakır filmlerle bağlantılı olan farklı boyutlara sahip, merkezi deliğe sahip ve merkezi deliği olmayan FR4 numuneleri üzerinde sayısal ve deneysel testleri uygulayrak plaka üzerindeki çeşitliliklerin modal analiz sonucu elde edilen doğal frekanslar, sönümleme oranları gibi faktörleri nasıl etkilediğini araştırmışlardır.

Aytekin (2008), kart kutusu, elektronik kart ve elektronik parçaların oluşturduğu bütünün titreşim analizlerini gerçekleştirmiş ve dinamik davranışlarını incelemiştir. Elektronik kart üzerine elektronik parçaların eklenmesi sonucunda yapının titreşim karakteristikliğinin nasıl değiştiğini sonlu elemanlar yöntemi ile değerlendirmiştir. Ayrıca kart kutusu, elektronik kart ve parçaları için titreşim testlerini gerçekleştirerek sonuçları değerlendirmiştir.

Kahraman (2011), yaptığı yüksek lisans çalışmasında uçaklarda bulunan kanatçığın dinamik davranışlarını sayısal analiz yöntemi ve farklı deneysel modal analiz yöntemleriyle karşılaştırarak doğrulamıştır. Kanatçığı önce modelleyerek numerik sonuçları elde etmiş ve deneysel modal analiz aşaması için 49 noktadan ölçüm almıştır. Öncelikle darbe çekiç test metodu ve sonrasında modal sarsıcı test yöntemini random ve sinus olarak uygulamış ve çalışmalarını doğrulamıştır. Sonucunda frekans değerlerinin birbirlerine yakın olduğunu ve 3 metodun da doğruluğunu onaylamıştır.

Q.J. Yang ve ark. (2011), PBGA PCB montaj plakasının deneysel ve sayısal modal analiz yöntemiyle modlarını ve dinamik davranışlarını incelemişlerdir. Plakaya serbest koşulda, fikstüre 1 noktadan montajlı ve 2 noktadan montajlı olmak üzere darbe çekiç test metodunu kullanarak deneysel modal analiz sonuçlarını elde etmişlerdir. Yang ve arkadaşları bu çalışmalarında vibrasyon sarsıcıyı PCB montajına ekstra bir kuvvet dağılımı sağlayacagından ve frekans değerlerinin sapmalarını artmasına sebebiyet vereceğinden dolayı sadece darbe çekiç yöntemini uygulamışlardır. Test sonucunda da kütle dağılımının etkisinin, ölçüm konumlarının, montajlamanın teste etkilerine değinmişlerdir. Ek olarak bu çalışmada sunulan vibrasyon sarsıcıyı kullanmama gerekçeleri yaptığımız çalışmada doğrulanmış ve ek olarak sarsıcının uygulama yöntemlerine öneriler sunulmuştur.

Anuar ve ark. (2012), yaptıkları çalışmada, PCB malzemelerinden biri olan CEM-1 tek katmanlı PCB plakasının modal davranışlarını deneysel modal test yöntemleriyle incelemişlerdir. Çalışmalarında plakayı serbest sınır koşullarını sağlamak için dört bir tarafından elastic yaylarla asarak ilk 5 modu darbe çekiç yöntemi ile elde etmişlerdir. Fakat test sonuçlarını doğrulamak için bir numerik sonuç elde edilmemiştir.

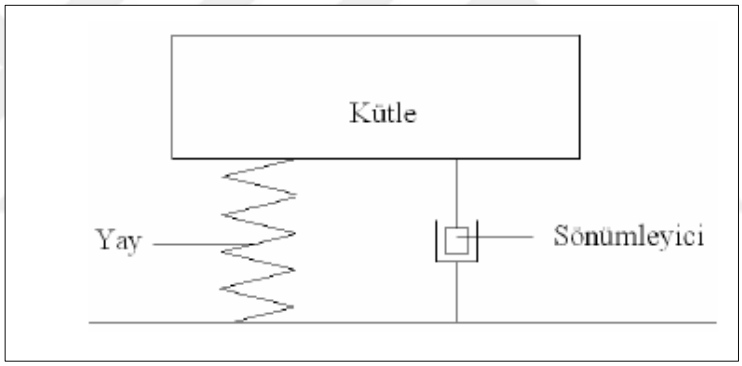
Aykan (2004), yaptığı çalışmada, tank namlusunun modal karaktesitiklerini incelemiş ve ilk doğal frekanslarını numerik ve deneysel olarak kıyaslamıştır. Tank, engebeli arazilerde bulunmasından, hedefe atış sırasında tepki kuvvetlerinden kaynaklı bir çok yönüyle titreşime maruz kalmaktadır bu durumda tankın modal davranışlarının önemini arttırmaktadır. Çalışmada öncelik olarak tank modellenerek Ansys üzerinden modal analiz çıktıları belirlenmiştir. Sayısal çıktılar kullanılarak da deneysel modal analiz gerçekleştirilmiştir. Deneysel modal analiz sırasında tank üzerine 8 ayrı noktaya 3 eksenli ivmeölçerler konumlandırılarak üçer tekrarlı test gerçekleştirilmiştir. Test sonucunda ilk doğal frekansların yakın olduğu fakat sayısal analizde model geometrisine tankın iç yapısı dahil edilmediği için doğal frekanslar deneysel sonuçlara göre yüksek çıkmıştır. Yapılan test sonrası titreşim problemini gidermek için sertliği arttırmak veya azaltmak, braket iyileştirmesi gibi optimizasyonlar yapılarak ilk doğal frekanslar arttırılmış ve sonraki tasarımlar için fikir oluşturmuştur.

Bu çalışmada PCB’de temel katman olarak kullanılan FR4 malzemesinden üretilmiş bir plakanın ve hem PCB’de kullanılan hemde PCB fikstürlerinde sık tercih edilen Alüminyum malzemesinden üretilmiş plaka parçalarının ilk olarak sonlu elemanlar yöntemi kapsamında bilgisiyar destekli programlar ile birlikte modal analizleri gerçekleştirilmiştir. Sayısal yöntem ile gerçekleştirilen modal analizler ile parçanın doğal frekansları, rezonans noktaları, sönüm oranları ve mod şekilleri belirlenmiştir. Daha sonrasında bulunan parametreler deneysel modal analiz parametrelerinden her ikiside olan darbe çekiç test yöntemi ve modal sarsıcı test yöntemi ile farklı parametreler altında denenerek frekans cevap fonksiyonları belirlenmiş ve tutarlılık durumları incelenerek doğrulanmıştır. Bulunan mod şekillerinin hangi test yöntemi ve hangi parametrelerde daha doğrulayıcı sonuca ulaştığı ise modal güvence kriteri ile onaylanmıştır. Sadece deneysel modal testlere veya sayısal analizlere odaklanan birkaç çalışmaların aksine, bu çalışmada hem deneysel modal testler hem de sonlu elemanlar analizi kullanılmıştır. Bu kapsamlı yaklaşım, FR4 PCB plakalarının titreşim özelliklerinin daha kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını sağlamış ve çeşitli test metodlarına başvurularak doğru sonuca ulaşmanın ihtimallerini arttırmıştır. Karşılaştırmalı analiz, PCB plakalarının titreşim özelliklerinin değerlendirilmesinde, EMA tekniklerinin güçlü yönlerinin ve sınırlamalarının anlaşılmasına yardımcı olmaktadır. Çalışma ayrıca Alüminyum plakanın dayanıklılığını göz önünde bulundurarak literatüre ek bir pratik yön katmaktadır. Genel olarak, otomotiv aydınlatma ürünlerinde kullanılan PCB'lere odaklanan çalışma, güvenilirlik ve dayanıklılığın kritik faktörler olduğu belirli bir uygulama alanını ele almaktadır. Bu bölümde deneysel modal analize, modal test gerçekleştirme amaçlarına ve yöntemlerine, frekans cevap fonksiyonlarını anlamaya ve incelemeye, modal güvence kriteri doğrulamalarına yer verilmiş ve teorik olarak açıklanmıştır.

Deneysel modal analiz teorisini benimsemek için öncelikle bazı terimleri anlamak gereklidir. Yapılan testler sonucunda bulunan hesaplamalar grafikler veya terimler matematik bilimi ile ilişkilendirilir dolayısıyla çalışmalara başlamadan önce teorik bilgileri özümsemek ve matematik ile ilişkisini anlamak gereklidir bu bölümde kavramlara ve modal test süreçlerine dair teorik bilgilere de yer verilmiştir.

2.1. Titreşim

Titreşim, bir cismin elastik bir parça üzerinde salınım hareketi yapması sonucunda meydana gelir. Ayrıca, cismin belirli bir merkez etrafında dairesel hareketi de titreşim olarak tanımlanabilir. Bu sistem, kütle ve elastik parçadan oluşur ve titreşim sistemi olarak bilinir. Bir katı yapı elastik bir şekilde şekil değiştirilip serbest bırakılırsa, denge konumuna gelene kadar salınır; buna serbest titreşim denir. Birim zamanda gerçekleşen salınım sayısına frekans, denge pozisyonundan azami yer değiştirmeye ise genlik denir. Ancak pratikte, titreşim hareketi sonsuza kadar sürmez; bu, sistemdeki sönüme bağlıdır. Basit bir modelde sönüm genellikle göz ardı edilir (Maia ve ark. 1997). Bahsedilen basit titreşim modeli Şekil 2.1'de görülmektedir.



Şekil 2.1. Titreşim sistemi (Anonim 1997)

Şekil 2.1'de belirtilen titreşim modelinde yay potansiyel enerjiyi, kütle kinetik enerjiyi depolar buradan da anlaşılacağı üzere titreşim, kinetik ve potansiyel enerjininin dönüşümü ile oluşmaktadır. Sistemde görülen sönümleyici ise salınım sırasında hareketi yavaşlatan veya durduran elemandır.

Titreşim bazı durumlar da istenilen bazı durumlarda istenilmeyen bir olaydır. Örneğin uçak gövdesindeki titreşimler yorulmaya neden olur ve hasara yol açar ve bu yüzden istenilmez, ama müzikal enstrümanların bir çoğunda ve genellikle telli enstrümanlarda titreşim istenilen bir özelliktir. Hem müzikal performans hem de mühendislik açısından

titreşimin analizi, ölçümü ve kontrolü önemlidir. Makinelerin tasarımında, titreşime sebep olabilecek iç ve dış kuvvetlerin mümkün olduğunca minimize edilmesi önemlidir. Bu kuvvetler, metal yorgunluğuna, parçalar arasındaki boşlukların artmasına, aşınmalara, çatlak oluşumuna, dengesizliklere, hasarlara, enerji kaybına ve istenmeyen ses ve gürültüye neden olabilir.

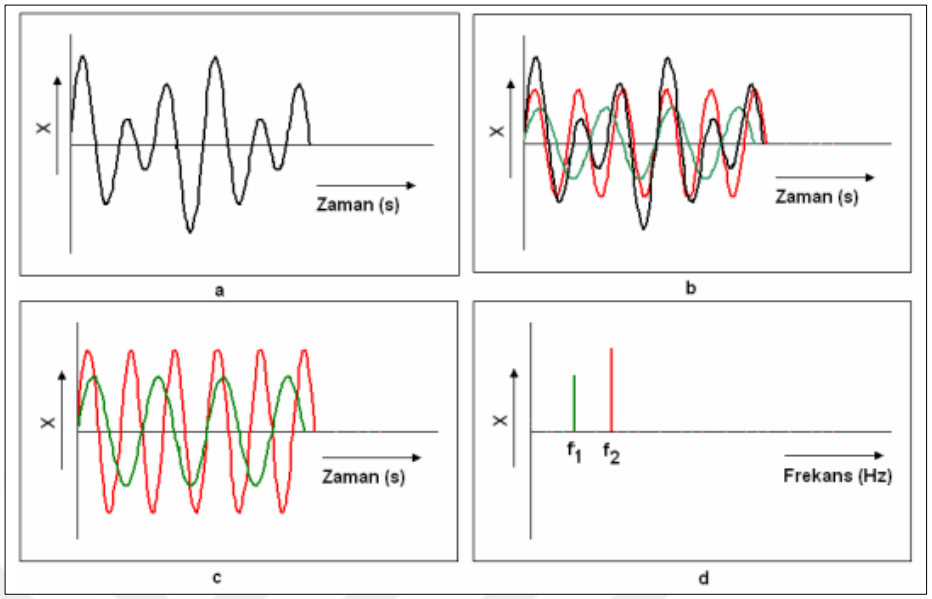
Titreşim hareketi genellikle periyodik veya rasgele olarak iki ana kategoriye ayrılır. Periyodik titreşim, belirli bir zaman diliminde tamamen veya kısmen tekrarlanabilen bir hareketi ifade eder. Rasgele titreşim ise, zaman içinde belirli bir tekrarlanma deseni göstermemektedir.

Serbestlik derecesi, titreşim hareketinin oluştuğu ekseni ifade eder. Pratikte, titreşim hareketi çoğu zaman birden fazla doğrultuda veya eksen boyunca gerçekleşebilir. Bu nedenle, titreşim hareketi genellikle üç doğrusal eksen ve üç açısal doğrultu boyunca ölçülür (Anonim, 1997).
Periyodik titreşim hareketinde, hareketin tekrar süresi periyot (T) olarak adlandırılır ve saniyede gerçekleşen hareket sayısına frekans (f) denir. Matematiksel olarak, frekans periyodun tersi olarak tanımlanır ve şu şekilde hesaplanır:

$$f = T^{-1} = 1/T \tag{2.1}$$

Periyodun birimi saniye (s), frekansın birimi Hertz (Hz)'dir.

Zaman düzleminde bir titreşim hareketini incelemek oldukça zor olduğundan, titreşim ölçme ve değerlendirme uygulamalarında genellikle frekans spektrumu tercih edilir. Bu spektrum, bir titreşim hareketinin frekans ve titreşim şiddetine bağlı olarak gösterilen bir fonksiyondur. Şekil 2.2'de titreşim hareketinin zaman ve frekans düzlemlerinde bir titreşim hareketi gösterilmiştir. Şekil 2.2.a'da harmonik olmayan periyodik bir titreşim hareketi görülüyor. Bu hareket, görünüşte harmonik olmasa da, aslında farklı frekans ve genliklere sahip iki ayrı harmonik bileşeni içerir (Şekil 2.2.b ve Şekil 2.2.c). Zaman alanında bileşenleri incelemek zor olduğundan, genellikle bileşenler frekans alanında incelenir (Şekil 2.2.d) (Çay, 2006).



Şekil 2.2. Zaman ve frekans ortamında titreşim hareketinin gösterimi (Çay 2006)

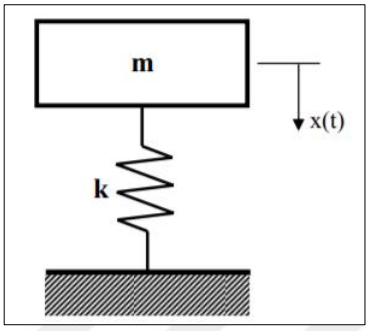
2.2. Titreşim Türleri

Titreşim, serbest, zorlamalı ve sönümlü olmak üzere üç ana kategoride incelenebilir. Serbest titreşim, bir sistemde başlangıç hareketi verildikten sonra doğal olarak serbestçe salınmasıdır. Örneğin, bir salıncakta sallarken çocuğu itip sonra serbest bırakmak veya bir akord çatalına vurup serbest bırakmak serbest titreşim örnekleridir. Zorlamalı titreşim ise, mekanik bir sisteme zamanla değişen bir etki uygulandığında meydana gelir. Bu etki, periyodik ve sabit, geçici veya rastgele olabilir. Periyodik etki, harmonik veya harmonik olmayan olabilir. Örneğin, bir çamaşır makinesinin dengesizliği nedeniyle sallanması veya bir motorun veya kötü yolun neden olduğu taşıma titreşimi zorlamalı titreşim örnekleridir. Sönümlü titreşim ise, sistemin enerjisinin sürtünme ve diğer dirençler tarafından yavaşça azaltıldığı bir titreşim türüdür.

2.2.1. Sönümsüz Serbest Titreşim

Teorik bir kavram olan sönümsüz serbest titreşim hareketi, aslında pratikteki her titreşim sistemi kısıtlı da olsa sönümleme reaksiyonuna sahip olduğundan, bir sönümleme olduğu

her zaman geçerlidir. Bu sebeple, sönümsüzlük kavramı, teorik hesaplamaların kolaylığı için varsayılan bir kavramdır. Şekil 2.3'te sönümsüz bir titreşim sistemi gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Sönümsüz serbest titreşim

Şekil 2.3'te gösterilen içsel kuvvetlerin etkisiyle titreşim sistemi ωn doğal frekansında salınım hareketine başlar. Bu doğal frekans, yayın elastik sabitine (k) ve cismin kütlesine (m) bağlı olarak aşağıdaki formülle hesaplanabilir (Arkun, 1983):

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \tag{2.2}$$

Burada;

ωn: Sönümsüz açısal doğal frekans (rad/s),

k: Yay sertliği veya yay katsayısı (N/m),

m: Cismin kütlesidir.

Şekil 2.3'de görülen sistemin diferansiyel denklemi denklem 2.3 gibi yazılabilir (Hannah 1956):

$$m\frac{d^2x}{dt^2} + kx(t) = 0 \tag{2.3}$$

Denklem (3.3), ikinci dereceden bir diferansiyel denklemdir. Burada $\frac{dx}{dt} = b$ olmak üzere, ikinci dereceden diferansiyel denklemin karakteristik denklemi;

$$mb^2 + k = 0 \tag{2.4}$$

olarak elde edilir. Karakteristik denklemin çözüm kümesi, Ç = $\{(\sqrt{-\frac{k}{m}}), (-\sqrt{-\frac{k}{m}})\}$ şeklindedir. Burada i = $\sqrt{-1}$ ve açısal doğal frekans ωn = $\sqrt{\frac{k}{m}}$ olmak üzere denklem (2.3) 'nın genel çözümü;

$$x(t) = C_1 e^{w_n t i} + C_2 e^{-w_n t i} \quad (2.5)$$

bulunur. Denklem (2.5), eiθ = cosθ + isinθ Euler formül açılımından yaralanılarak;

$$x(t) = C_1(cos\omega_n t + isin\omega_n t) + C_2(cos\omega_n t - isin\omega_n t) \quad (2.6)$$

$$x(t) = (C_1 + C_2)cos\omega_n t + (C_1 - C_2)isin\omega_n t \quad (2.7)$$

şeklinde düzenlenebilir Burada C_1 ve C_2 bulunması gereken sabit sayılardır.
$(C_1 + C_2)$ = A ve $(C_1 - C_2)$i = B olmak üzere,

$$x(t) = Acos\omega_n t + Bsin\omega_n t \quad (2.8)$$

elde edilir. Bu ifade, sin(x + y) =sinxcosy + cosxsiny olan iki açı toplamının sinüs fonksiyonudur. Buna göre;

$$x(t) = Rsin(\omega_n t + \theta) \quad (2.9)$$

sonucuna ulaşılır. Burada;
A, B: Bulunması gereken sabit sayılar,
R : Titreşim hareketinin tepe genliği (m),
Θ : Faz açısı (rad)'dır

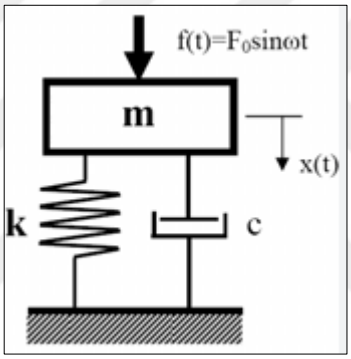
A, B ve R uzunlukları ile θ açısı arasında aşağıdaki ilişkiler söz konusudur (Çay 2006):

$$R = \sqrt{A^2 + B^2}$$

$$\tan\theta = \frac{A}{B} \quad (2.10)$$

2.2.2. Sönümlü Serbest Titreşim Hareketi

Titreşim yapan tüm gerçek sistemlerde dış etkenlerin titreşime neden olduğu fark edildikten sonra, titreşimler zamanla yavaşlar ve bir süre sonra tamamen durur. Bu durum, titreşim sistemlerinde bulunan sönümleyicinin mekanik enerjiyi emmesinden kaynaklanmaktadır. Şekil 2.4'te sönümlü titreşim sisteminin şeması verilmiştir. Geniş bir yelpazede bulunan ve sönüm olarak adlandırılan bu etkilerin ortak özelliği, sistemin hızına direnç gösteren ve sönüm kuvveti olarak bilinen kuvvetlerin ortaya çıkmasına neden olmalarıdır (Dal 2019).



Şekil 2.4. Sönümlü serbest titreşim sistemi

Sönümlü serbest titreşimleri en genel halde;

$$\ddot{x} + 2D\omega_d\dot{x} + \omega_n^2 x = F_0 \sin wt \tag{2.11}$$

şeklinde bir diferansiyel denklemle temsil edilir. Burada D sönüm faktörü/sayısı olup Denk. 2.12'deki gibidir.

$$D = \frac{\delta}{w_n} = \frac{\Gamma}{2m} w_n \tag{2.12}$$

Bu denklemdeki δ sönüm sabitidir. Denk. 2.13'te verilmiştir.

$$\delta = \frac{\Gamma}{2m} \tag{2.13}$$

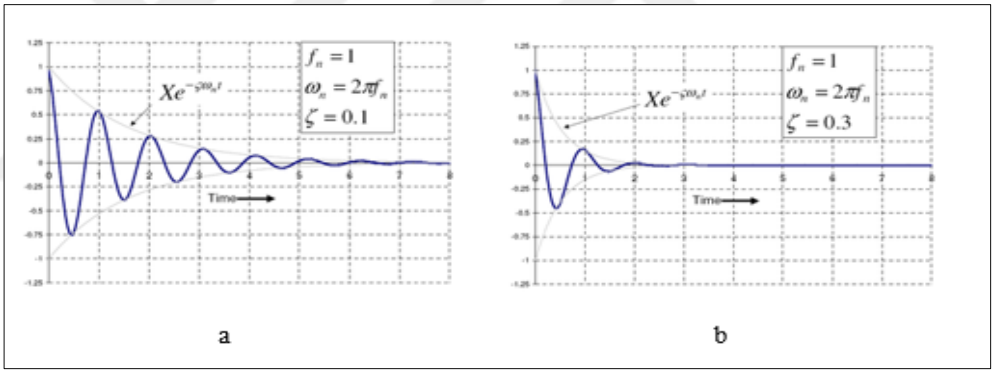
Titreşim hareketlerinin ortaya çıkma durumu olan D < 1 (D : sönüm faktörü) koşulu altında diferansiyel denkleminin çözümü;

$$x(t) = A_0 - e^{-1} D w_n^t Cos(w_d t - \varepsilon) \tag{2.14}$$

şeklindedir. Burada w_d;

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - D^2} \tag{2.15}$$

şeklinde tanımlanmış bir büyüklük olup sönümlü titreşim frekansı adını alır (Thompson 1996). Sistemin modeli Şekil 2.5'te gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Sönümlü titreşim modeli (Thompson 1996)

2.3. Deneysel Modal Analiz

Birçok yapı titreşime maruz kalmaktadır ve titreşimin yarattığı etki nedeniyle yapı üzerindeki titreşimlerin araştırılması ve incelenmesi gerekmektedir. Bu incelemeleri sağlayabilmek için yapıların dinamik karakteristikliğinin ortaya çıkartılması sağlanmalıdır. Buna benzer bir yapı için, bir yapının modal özelliklerini belirlemek için yapılan deneysel çalışmalara modal test veya deneysel modal analiz denir. Herhangi bir dış kuvvete maruz kalan yapı, titreşim eğilimine girer. Modal test ve modal analiz ile bir yapının, maruz kaldığı kuvvet sonucunda sergileyeceği dinamik davranışlar karakterize

edilir. Yapıların titreşim şekillerini, kuvvetlere karşı direnç seviyelerini ve yapısal dinamiklerini anlamak için kritik olan deneysel modal analizler sayesinde yapılar optimize edilebilir ve doğrulanabilir.

İki temel varsayımın doğrulanması gerekmektedir: doğrusallık ve zamanda değişmezlik. Doğrusallık, modal analizin temelini oluşturur ve ayrı modların birleştirilerek sistemin davranışının tanımlanmasını sağlar. Deneysel modal analiz için gerekli ölçümler belirli bir zaman diliminde yapılabildiğinden, ölçümlerde bir bütünlük sağlanabilmesi için sistemin zamanda değişmez olması gereklidir. Bu nedenle, zamanda değişmezlik en azından belirli bir süre için geçerli olmalıdır. Gerçek dünya yapıları ne doğrusal ne de zamanda değişmezdir; bu nedenle modal analiz yapmadan önce tüm olası hatalar ve belirsizlikler gözden geçirilmeli ve bu yöntemin mevcut duruma uygun olup olmadığına karar verilmelidir (Thompson, 1996).

Zamanda değişmezlik, temel bir kabul olmakla birlikte, ölçüm zamanı dışında meydana gelen değişimler izlenerek, örneğin bir hasar durumunda oluşan değişiklikler tespit edilebilir. Ancak çevresel faktörlerin (örneğin, sıcaklık ve nem) etkisiyle sistemlerin sınır ve süreklilik durumları değişebilir, bu da yapının dinamik özelliklerinin değişmesine neden olabilir.

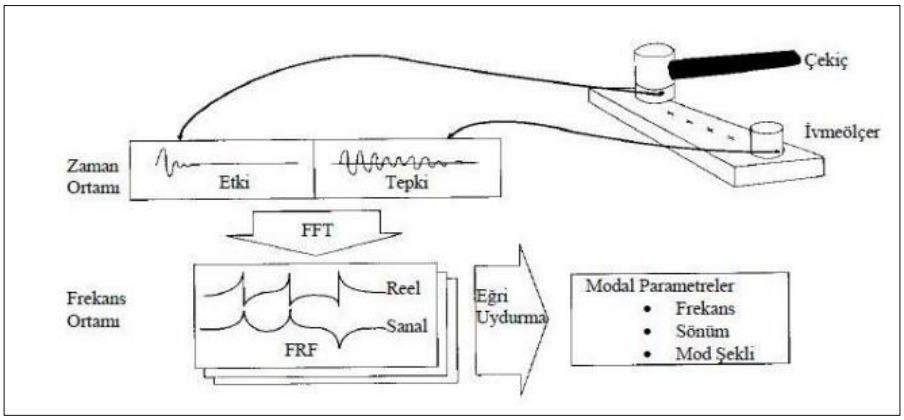
Deneysel Modal analiz yöntemi, sistemin davranışının çeşitli modlar aracılığıyla tanımlanabileceği kabulüne dayanır. Bu kabul doğrultusunda, birim dürtü uyarısı için zaman uzayında bir sistemin ötelenme fonksiyonu denklem (2.16) şeklinde yazılabilir.

$$x(t) = \sum_{k=1}^{N} e^{\sigma_k t} \left[A_k e^{j\omega_k t} + A_k^* e^{-j\omega_k t}\right] \tag{2.16}$$

burada; A: sistemin modal şekilleri ile bağlantılı değişken,
N: sistemi tanımlayan serbestlik derecesi sayısı,
t: zaman,
ω: sistemin sönümlü frekansları,
σ: sönüm katsayısıdır.

Modal analiz tekniğinde, tipik olarak baştan sistemi tanımlayan bir fonksiyon kabul edilir. Dolayısıyla, deneysel olarak elde edilen veriler, bu tanımlanan fonksiyona en iyi uyan değişkenlerin belirlenmesi için eğri oturtma yöntemleri kullanılarak sistem değişkenleri tanımlanır. Bu amaçla birçok yöntem geliştirilmiştir (Allemang, 1999).

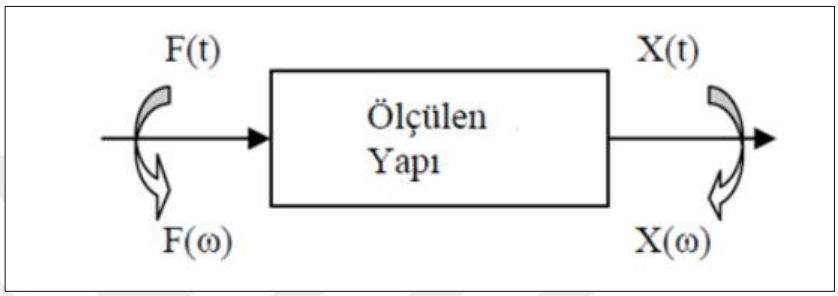
Başarılı bir deneysel modal analiz gerçekleştirmek için yapı dinamiğini anlamak temel öneme sahiptir. Özellikle frekans tepki fonksiyonları (FRF/FTF) ile modal parametreler arasındaki ilişki kritiktir. (Ewins 2000). Frekans tepki fonksiyonu alınan yanıtın girdiye oranı olarak adlandırılır. FRF fonksiyonunun kutupları, sistemdeki doğal frekansları ifade eder. Aynı şekilde, kutup noktalarından modal sönüm oranları elde edilir. Yapıdan yeterli miktarda FRF elde edilirse, modal şekilleri de elde edilebilir. Bu süreçte, yapıya bilinen bir kuvvet uygulanır ve yapının bu kuvvete tepkisi ölçülür. Bu işlemde, kuvvet uygulamak için çekiç veya sarsıcı, yapının tepkisini ölçmek için ise ivmeölçer kullanılır. Yapıdaki sinyalizasyon adımları değerlendirmek için yapıya bağlantılı olacak şekilde veri toplama analizörleri kullanılır.



Şekil 2.6. Deneysel modal analiz sistemi (Şekerci 2013)

Şekil 2.6'da görüleceği gibi yapıya uygulanan kuvvet çekiç olarak yer almaktadır. Çekicin ucunda bulunan kuvvet ölçer uç ile yapıya uygulanan etki zaman ortamında ölçülür. Uygulanan kuvvet ile birlikte yapı titreşime maruz kalır ve etkiye gösterilen tepki yanıt için yapıya bağlanan ivmeölçer ile birlikte zaman ortamında ölçülür. Yapılan işlem basit olarak değerlendirildiğinde temelinde Şekil 2.6' da gösterilen sistem bulunmaktadır.

Kuvvet çeşitleri, ivmeölçer çeşitleri veya uygulama seçenekleri değişse bile deneysel modal analiz sistem mantığı aynı şekilde çalışmaktadır. Uygulanan zaman ortamındaki ölçümler Fourier dönüşümü (FFT – Fast Fourier Transform) kullanılarak etki ve tepki fonksiyonlarınının frekans ortamına dönüştürülmesini sağlamaktadır (Scwarz 1999). Fourier dönüşümünün şeması Şekil 2.7'de gösterilmektedir.



Şekil 2.7. Fourier dönüşümü (Şekerci 2013)

Frekans Cevap Fonksiyonu, fourier dönüşümleri yapılmış tepki fonksiyonunun etki fonksiyonuna bölünmesiyle elde edilmektedir.

$$H(w) = \frac{X(\omega)}{F(\omega)} \tag{2.17}$$

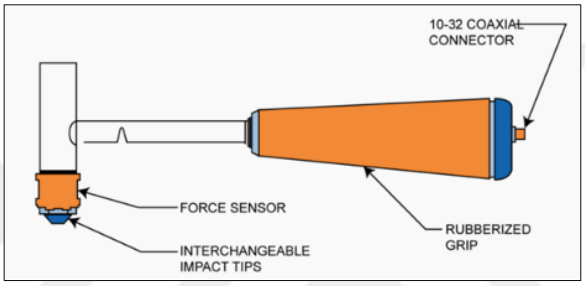
Bununla birlikte yapıda meydana gelen doğal frekanslar, sönüm oranları frekans cevap fonksiyonlarıyla belirlenebilir.

2.4. Modal Test Yöntemleri ve Ekipmanları

Bu bölümde modal test aşamasında kullanılan ekipmanlar ve kullanılma yöntemlerine değinilmiştir. Modal test uygulamaları darbe çekiç (ing. Impach Hammer Test) test yöntemi ve modal sarsıcı (ing. Modal Shaker Test) test yöntemi olarak ayrılmaktadır. Günümüzde en çok kullanılan test yöntemi ise darbe çekiç yöntemidir.

2.4.1. Darbe Çekiç Test Yöntemi

Darbe çekiç testleri genelde sabit bir çıkış ve giriş noktaları arasında FRF hesaplanarak yapılmaktadır. Burada giriş için darbe çekiç denilen ve üzerinde kuvvet ölçen sensör bulunduran çekiç kullanılır. Darbe çekicinin gösterimi Şekil 2.8'de gösterilmiştir. Çıkış için ise genelde ivmeölçerler tercih edilmektedir. Darbe çekiç testleri karmaşık yapılar üzerinde modal sarsıcı testinden önce hızlı bir önizleme olarakta tercih edilmektedir.



Şekil 2.8. Modal çekiç sistemi (Anonim 2019a)

Darbe çekiç test yöntemi çekiç veya ivmeölçeri gezdirme (ing. Roving impact hammer and roving acceloremeter) durumlarına göre adlandırılır. Çekiç gezdirme yöntemi ivmeölçeri test esnasında gezdirmek yerine ivmeölçerin belli bir noktadan yanıt almasını sağlar ve darbe çekiç DOF'lar arasında etkiye sebep verecek şekilde uygulanır. Bu yöntem ivmeölçer gezdirme yöntemine göre daha çok tercih edilmektedir. Darbe çekici gezdirmenin ivmeölçer gezdirmeye yönelik avantajları şu şekilde sıralanabilir;

- İvmeölçer hareket ettirilirken, ivmeölçerin tekrar tekrar sökülüp takılması yapı üzerinde kütle dağılımı etkiler.
- İvmeölçer gezdirme yönteminde ivmeölçerin sökülüp takılması darbe çekiç gezdirme yöntemine göre çok daha zaman almaktadır. Dolayısıyla işlem kolaylığı ve doğruluğu açısından darbe çekiç gezdirme (ing. roving hammer method) tercih edilmektedir.

Darbe Çekiç Uç Seçimi

Modal testte kullanılacak frekans aralığı belirlenirken doğru çekiç ucunu seçmek önemlidir. Daha sert bir uç malzemesi, geniş bir frekans aralığı sağlayabilir, ancak çift vuruşlardan kaçınmayı daha zor hale getirebilir. Daha yumuşak bir çekiç ucu ise düşük frekanslarda yapıya daha iyi bir enerji aktarımı sağlar, ancak modal testteki frekans aralığı daha sınırlı olabilir.

Girdi kuvvetinin frekans aralığını kontrol etmek için çekiç ucunu değiştirmenin iki yolu vardır:

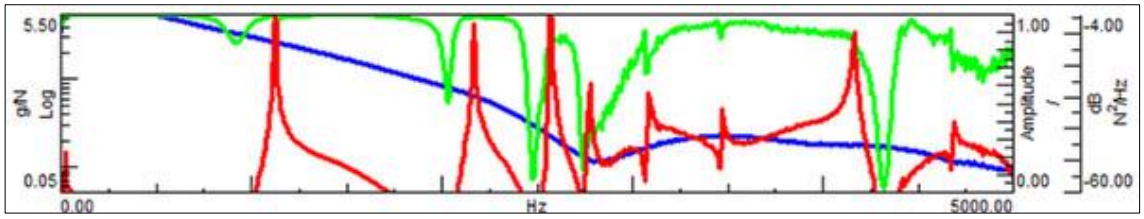
- Çekiç ucu kütlesi: Çekiç ucunun kütlesini azaltmak, çekişin temas süresini kısaltabilir. Daha hafif bir çekiç, yapıya vurduktan sonra temas süresini azaltarak çekicin ters yöne daha kolay hareket etmesine olanak tanır.
- Çekiç ucu sertliği: Ucun sertliğini artırmak, çekişin yapı ile temas süresini kısaltabilir. Örneğin, kauçuk uç, metal uç ile değiştirilebilir (Şekil 2.9).



Şekil 2.9. Uç seçimi (Anonim 2019a)

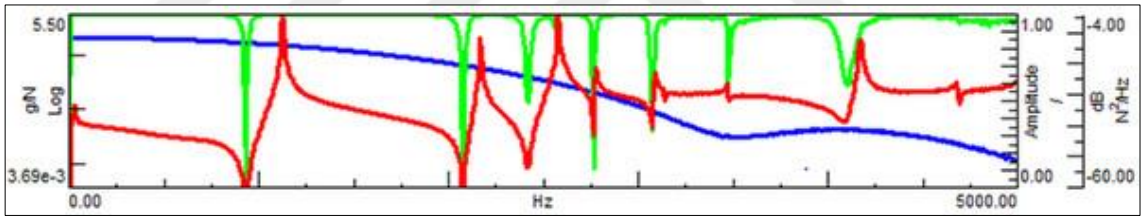
İstenen sonuç, ilgilenilen tüm frekans aralığında ve aynı frekans aralığında temiz bir FRF elde etmektir (Şekil 2.12). Eğer FRF'de yüksek frekanslarda gürültü belirginse ve giriş spektrumu önemli ölçüde düşüyorsa, bu çekiç ucunun çok yumuşak olabileceğini gösterebilir. (Şekil 2.10). İstenen sonuç, ilgilenilen tüm frekans aralığında ve aynı frekans aralığında temiz bir FRF elde etmektir (Şekil 2.12). Eğer FRF'de yüksek frekanslarda gürültü belirginse ve giriş spektrumu önemli ölçüde düşüyorsa, bu çekiç ucunun çok yumuşak olabileceğini gösterebilir. Belirtilen şekillerde gösterilen renklerden, yeşil renk

koheransı, kırmızı renk frekans cevap fonksiyonunu ve mavi renk girdi kuvvet spekturumunu göstermektedir.



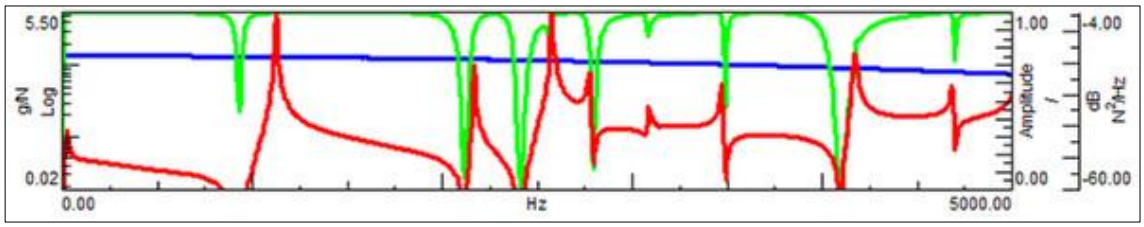
Şekil 2.10. Çekic ucu kullanımı - Yumuşak uç

İlgilenilen frekans aralığının ötesinde, yapıdaki tüm modların tahrik edilmesi durumunda, çekiç ucunun aşırı sert olduğuna işaret eder ve düşük frekanslarda FRF'de gürültü oluşabilir. Bu durum, yapı üzerinde ilgilenilen frekans aralığı dışında da tahrik edilme olasılığı olduğunu gösterir (Şekil 2.11).



Şekil 2.11. Çekiç ucu kullanımı - Sert uç

Çekiç kütlesi, yapıyı tahrik etmek ve üzerinde yeterli kuvveti oluşturmak için oldukça önemlidir. Özellikle yüksek kuvvet gerektiren durumlarda, daha ağır bir çekiç ucunun gerekebileceği unutulmamalıdır. Bu durumda, çekiç ucunun kütlesi, yapı üzerindeki istenilen etkiyi elde etmek için belirleyici olabilir.



Şekil 2.12. Çekic ucu kullanımı - Doğru uç

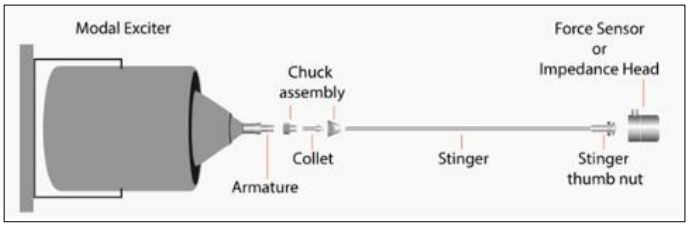
2.4.2. Modal Sarsıcı Test Yöntemi

Modal sarsıcılar, büyük veya karmaşık yapıları harekete geçirmek ve yüksek kaliteli mod verileri elde etmek için kullanılan titreşimli cihazlardır. Modal çekiçlerden farklı olarak, modal sarsıcılar yapıyı daha geniş bir frekans aralığında ve çeşitli sinyal tipleriyle uyarma yeteneğine sahiptirler. Bu özellikleriyle, çeşitli yapılar için en uygun ve doğru test sonuçlarını sağlarlar.

Ayrıca, modal sarsıcılar, düz ya da şekillendirilmiş bir uyarma eğrisi oluşturmak için kullanılabilirler ve belirli uyarma frekanslarında kullanıcı tanımlı uyarma seviyeleriyle yapıları uyarmak için kontrol edilebilirler. Sarsıcının uyarma seviyesinin ayarlanmasıyla, yapı aşırı genlik sapmalarından korunabilir ve doğrusal olmayan etkiler meydana geldiğinde farklı seviyelerde test edilebilir. Genlik ve/veya faz modelleri kontrolleri olan veya olmayan birçok sarsıcı bir arada kullanılabilir. Ağır ve kompleks yapılar üzerinde birden fazla sarsıcı kullanmak, daha gerçekçi bir kuvvet uyarımı sağlar ve tüm mod şekillerinin daha iyi incelenmesine olanak sağlar (Anonim 2022).

Modal Sarsıcı (Modal Shaker olarak da adlandırılır), modal testler sırasında diğer test metodlarına göre zaman tasarrufu yüksek yapıları sarsma gibi bazı avantajlara sahiptir. DUT (Device Under Test/Test Altındaki Cihaz)'u sarsıcının armatürüne sabitlemek yerine, bir bağlantı çubuğu aracılığıyla parçaya modal bir sarsıcı bağlanır.

Modal sarsıcılar, stinger için açık delikli bir armatürle donatılmıştır; bu sayede stinger, parça için gereken uzunluğa ayarlanabilir, böylece çalkalayıcıyı hareket ettirmeye gerek kalmaz ve kurulum süreci basitleştirilir. Modal sarsıcının genel yapısı Şekil 2.13'te gösterilmiş olup, çeşitleri Şekil 2.14'te sunulmuştur.



Şekil 2.13. Modal sarsıcı sistemi (Anonim 2022a)

Modal sarsıcılar genellikle şunlar için kullanılır:

- Elektronik kartlar,
- Alt bileşenler,
- Makine,
- Araçlar,
- Uçak ve İnşaatlar



Şekil 2.14. Modal sarsı çeşitleri (Anonim 2022a)

2.4.3. İvmeölçerler

Deneysel Modal Analiz ekipmanlarının olmazsa olmazı olan ve FRF sonucunu başarılı bir şekilde oluşmasını sağlayıp test aşamasında ivmeyi ölçen, birçok parametreye göre belirlenen ekipmanlar ivmeölçerlerdir. Modal test sırasında etkiye karşı tepkiyi oluşturan elemanlardır. Birçok çeşit ivmeölçer bulunmaktadır. Bunlardan bazıları,

- Charge Tipi İvmeölçer
- IEPE Tipi İvmeölçer
- Mems Tipi İvmeölçer

Yapısal titreşim ölçümlerinde genellikle piozelektrik özelliğindeki ivmeölçerler tercih edilmektedir. Bu tip ivmeölçerler (IEPE), bir piezoelektrik malzeme gerildiğinde elektrik yükü üretir. Sismik bir kütle ile birlikte titreşim ivmesiyle orantılı bir elektrik şarj sinyali üretebilir. Piozelektrik ivmeölçerlerin bazı avantajları şu şekilde sıralanabilir;

- Geniş frekans aralığı, çok yüksek frekanslar ölçülebilir,
- Kompakt ancak son derece hassas,
- Hareketli parça yok, aşınma yok,
- Kendi kendine üreten, harici güç gerektirmez.

İvmeölçerler yapılan titreşim testlerinin türlerine göre değişiklik göstermektedir. Bu yüzden modal testde dahil olmak üzere tüm titreşim testlerinde yapı üzerinden doğru titreşim verilerini elde etmek için kullanılacak ivmeölçerin seçimi çok önemli bir yere sahiptir. İvmeölçerin ölçüm bandı içerisinde doğal frekans saptanmamalı ve ölçüm sonuçları etkilenmemelidir. Yapılan testlerde ivmeölçerlerin türleri özellikle hassasiyeti, frekans aralığını ölçebileceği maksimum ivme değerlerine göre değişmektedir. Ayrıca yapılan testlere göre kullanılacak ivmeölçerlerin hassasiyetleri farklılık göstermektedir. Örneğin yapılan random veya sinüs teslerindeki ivmeölçer hassasiyetleri ile şok testlerinde kullanılan ivmeölçer hassasiyetleri, testlerin etki edeceği genlik aralıklarına göre farklılık göstermektedir veya düşük frekansa sahip yapılarda yüksek hassasiyetli ivmeölçerler kullanılırken, yüksek frekansa sahip yapılarda ise düşük hassasiyetli ivmeölçerler kullanılmaktadır.

2.4.4. Veri Toplama Sistemleri

Veri toplama (genellikle DAQ veya DAS olarak kısaltılır), gerçek dünyadaki fiziksel olayları ölçen sinyalleri örnekleme ve bunları bir bilgisayar yazılımı tarafından manipüle edilebilecek dijital bir forma dönüştürme sürecidir. Veri Toplama, genel olarak, teyp veya kağıt çizelgelere yapılan önceki kayıt biçimlerinden farklı olarak kabul edilir. Bu yöntemlerden farklı olarak, sinyaller analog alandan dijital alana dönüştürülür ve daha sonra dijital bir ortama kaydedilir. VTS sistemleri sensörler, sinyal koşullandırıcılar, analog-dijital dönüştürücüler ve yazılımın olduğu bir bilgisayar ile çalışır. Tipik veri

toplama (DAQ) sistemi, harici sensörler ve A / D dönüşüm alt sistemi arasında arayüz sağlayan çoklu sinyal koşullandırma devresi kanallarına sahiptir. Veri toplama sistemleri modal test sırasında kuvvet uyarıcı (darbe çekiç ve sarsıcı) ve ivmeölçerden sonra gelen en önemli ekipmandır. Veri toplama sisteminin önemi darbe çekiç ile ivmeölçer arasında köprü kurmaktır. Yapıların dinamik özelliklerini belirlemek için ivmeölçerlerden veri toplama ünitesine aktarılan ve saklanan sinyallerin işlenmesi gerekmektedir. Bu sürece sinyal işleme denir. Bu adım, sinyallerin veri toplama ünitesinde sinyal koşullama işlemlerinden sonra bilgisayar ortamına aktarılmasıyla başlar. Sinyal işleme, bilgisayarda geliştirilen özel yazılımlar kullanılarak gerçekleştirilir. Sinyaller, bilgisayara zaman alanında aktarılır. Ancak pratik ve hesaplama gereksinimleri nedeniyle genellikle frekans alanı tercih edilir. Frekans alanında, sinyallerin işlenmesinde Fourier Dönüşümleri kullanılır (Altunışık 2010).

2.5. Hızlı Fourier Dönüşümleri (FFT)

Fourier dönüşümleri, sinyal analizinde en sık başvurulan teknikler arasındadır, çeşitli uygulama alanlarında kullanılırlar. FFT ise (Hızlı Fourier Dönüşümü), zaman alanında bulunan sinyalleri frekans alanına dönüştürmek için kullanılan etkili bir algoritmanın kısaltmasıdır.

FFT analizi, zaman alanı verilerinin değerlendirilmesinden daha kapsamlı bir şekilde birçok sinyal özelliğini keşfetme imkanı sunar. Frekans alanında, sinyal özellikleri bağımsız frekans bileşenleriyle tanımlanırken, zaman alanında ise tüm özellikler tek bir dalga formunda toplanır.

Yukarıda da bahsedilen DAQ sistemleri (Veri toplama sistemleri), genellikle sensörlerden gelen zaman alanı verilerini elde etmek için kullanılır ve FFT analizi için yaygın bir araçtır. Sensörlerden gelen veriler, analiz edilebilmesi için sayısallaştırılır ve daha sonra bir bilgisayar ve yazılım tarafından işlenir. Özel bir DAQ sistemi, FFT analizi yazılımına sahip bir bilgisayara bağlanarak sensörlerle birlikte kullanılır. Bu

yapılandırma, genellikle tercih edilen bir yapıdır. DAQ sisteminin analogdan dijitale dönüştürücüsü, dijital zaman sinyallerinin örnekleme hızını belirler.

Sinyallerin bilgisiyara zaman alanında aktarılması ve sinyallerin incelenmesi adına tercih edilen frekans alanına aktarımı da yani zaman alanındaki sinyallerin frekans alanına çevrilmesi hızlı fourier dönüşümleri sayesinde olur ve bu aktarımda da Fourier serilerinden yararlanılmaktadır (Altunışık 2010) (Anonim 2022b).

Fourier serisi açıldığında,

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty}[a_n \cos\left(\frac{2\pi n}{T}t\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi n}{T}t\right)] \quad (2.18)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada, a_0, a_n ve b_n sırasıyla aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$a_0 = \frac{2}{T}\int_0^T x(t)dt$$

$$a_n = \frac{2}{T}\int_0^T x(t)\cos\left(\frac{2\pi n}{T}t\right)dt$$

$$b_n = \frac{2}{T}\int_0^T x(t)\sin\left(\frac{2\pi n}{T}t\right)dt \quad (2.19)$$

Sonsuz Fourier serisine açılan sinyal t_k (k=1,2,3,…,N) gibi sonlu elemana karşılık gelmektedir. Bu durumda sonlu Fourier serisi açıldığında

$$x_k = x(t_k) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{N/2}[a_n cos\left(\frac{2\pi k}{N}n\right) + b_n sin\left(\frac{2\pi k}{N}n\right)], k = 1, 2, \dots N \quad (2.20)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada, a_0, a_n ve b_n sırasıyla aşağıdaki gibi ifade edilmektedir (Ramos 2007).

$$a_0 = \frac{2}{N}\sum_{k=1}^{N} x_k$$

$$a_n = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} x_k \cos\left(\frac{2\pi k}{N} n\right)$$

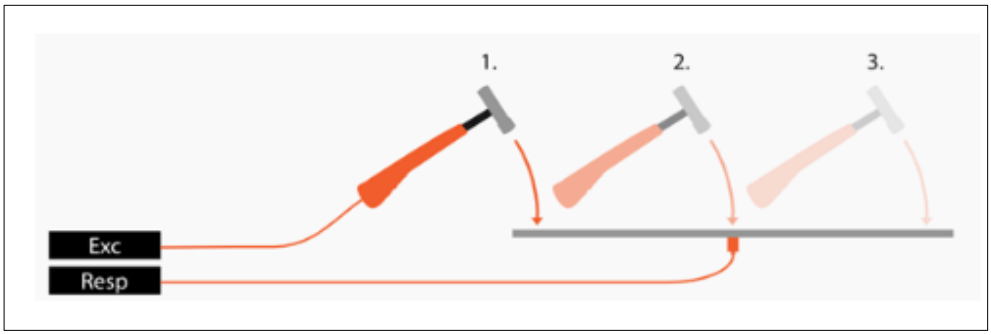
$$b_n = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} x_k \sin\left(\frac{2\pi k}{N} n\right) \quad (2.21)$$

2.6. Modal Test Uygulama Çeşitleri

Deneysel modal analiz hazırlıkları tamamlandıktan sonra modal test aşamasına geçilir. Deneysel modal testler için bir çok sinyal görüntüleme yöntemi vardır. Tek referanslı ve çok referanslı modal testler altında deneysel modal analizler gerçekleştirilir.

2.6.1. Tek referanslı gezdirilen çekiç testi

Bu test yalnızca bir DOF (Serbestlik derecesi) yanıtına ihtiyaç duymaktadır yani yapıya bağlanan bir ivmeölçer tek referans olarak baz alınır ve bunla birlikte bir çekiç etki olarak DOF'lar arasına gezdirilerek veriler toplanr (Şekil 2.15)

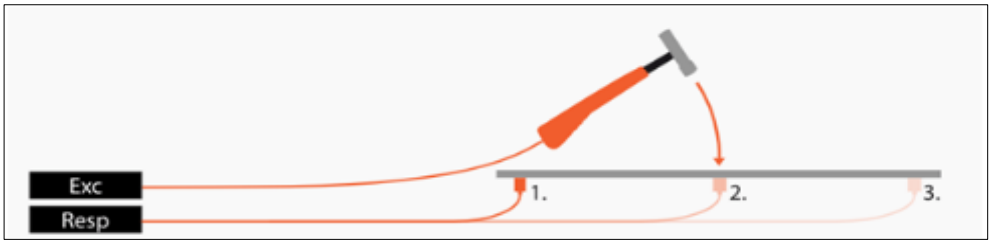


Şekil 2.15. Tek referanslı çekiç testi (Anonim 2000)

2.6.2. Tek referanslı Gezdirilen İvmeölçer Testi

Bu test konfigürasyonunda referans DOF olarak kullanılan modal uyarıcı bir noktaya etki ederken, bir veya birden fazla ivmeölçer tüm DOF'lar ölçülene kadar hareket etmektedir. Test ivmeölçer kütlelerinin yapıyı etki etmesinden kaynaklı ve gezdirilen ivmeölçer

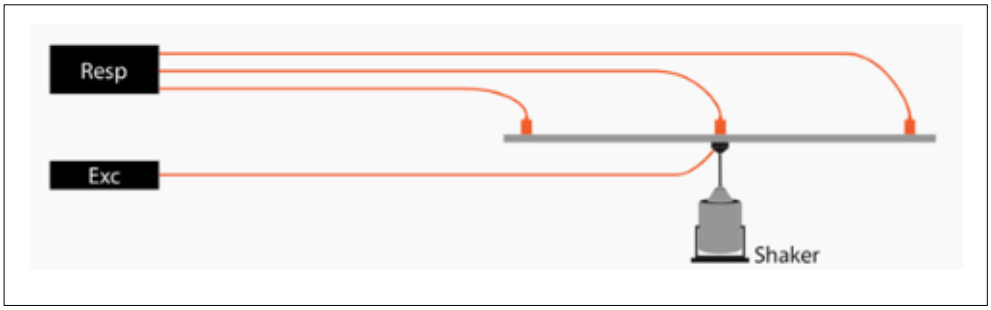
sisteminde sensörlerin taşınması ve yeniden takılmasından dolayı gezdirilen çekiç testinden daha fazla zaman almakta ve daha az tercih edilmektedir (Şekil 2.16).



Şekil 2.16. Tek referanslı gezdirilen ivmeölçer testi (Anonim 2000)

2.6.3. Tek Referanslı Sarsıcı Testi

Daha doğru bir modal model belirlemek için genelde sarsıcı tercih edilmektedir. Tek referanslı bir model test için modal sarsıcı da kullanılabilir. Modal sarsıcı kullanılırken referans DOF sıklıkla sarsıcının uyarma konumu olarak seçilmektedir (Şekil 2.17).

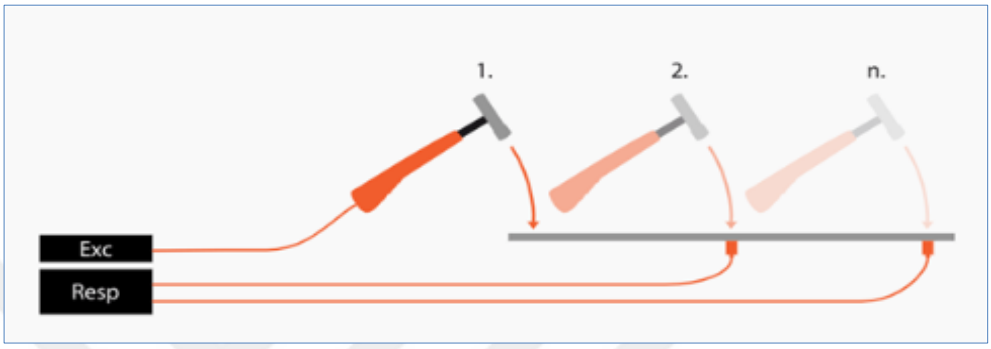


Şekil 2.17. Tek referanslı sarsıcı testi (Anonim 2000)

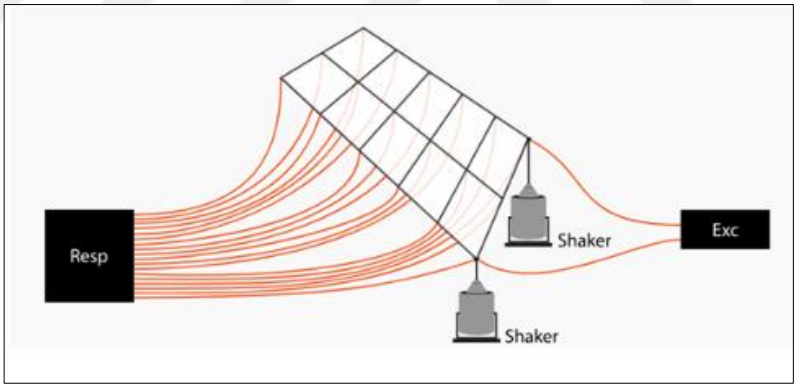
2.6.4. Çok Referanslı Modal Testleri

Bazı durumlarda, test sırasında birden fazla referans derecesinin ölçülmesi gerekebilir. Bu durumda, ölçülen verilerde tüm modların yeterince "belirgin" olduğu ve uygun bir referans derecesinin bulunamadığı durumlar olabilir.

Yapı, farklı bölgelerinde baskın mod sapmaları ile farklı modları sergileyebilir. Ayrıca, çok referanslı teste ihtiyaç duyulabilir; özellikle test nesnesinin aynı rezonans frekansında daha fazla moda sahip olduğu durumlarda ihtiyaç söz konusudur. Çok referanslı sistemlerin şemaları Şekil 2.18 ve Şekil 2.19'da verilmiştir.



Şekil 2.18. Çok referanslı çekiç testi (Anonim 2000)



Şekil 2.19. Çok referanslı sarsıcı testi (Anonim 2000)

2.7. Deneysel Modal Analiz Parametreleri

Deneysel modal analiz gerçekleştirirken ve sonrasında testin sonuçlarını incelenirken birçok kavram ve parametre hakkında bir fikir sahibi olunması gereklidir. Bunlardan modal test ekipmanlarına ek olarak sinyal okuma, grafiği inceleme ve anlama gibi konular üstünde durmak da en az test ekipmanlarını bilmek kadar önemlidir. Önceki başlıklar altında bahsedilen Fourier dönüşümlerini (FFT) anlamak ve modal test aşamasında testi

gerçekleştirenlere ne gibi olanak sunduğunu bilmek gerekmektedir. Daha sonrasında Fourier dönüşümlerinin, frekans cevap fonksiyonu ile bağlantısını anlamak ve frekans cevap fonksiyonundan neler elde edilebileceğini testin tutarlılığı gibi parametreleri göz önüne almak gereklidir. Dolayısıyla bu başlık altında frekans cevap fonksiyonu, tutarlılık, test sonrası yapılması gereken parametrelere değinilecektir.

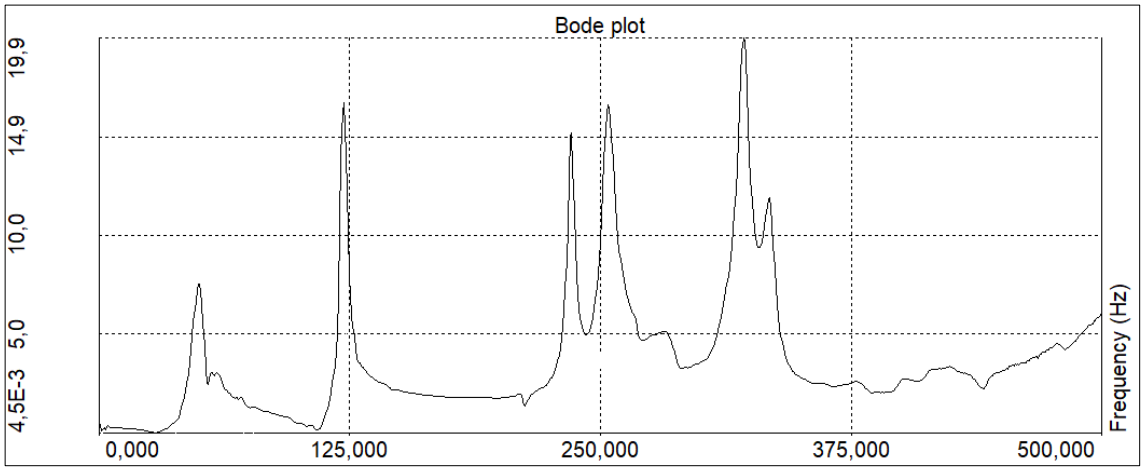
2.7.1. Frekans Cevap Fonksiyonu (FRF)

Frekans cevap fonksiyonu, frekans tabanlı bir ölçüm fonksiyonudur ve genelde ingilizce kısaltması FRF olan (frequency response function) olarak adlandırlır. Deneysel modal analizlerden çıkarılacak ilk sonuç, geometri ve DOF'lar arasındaki cevap fonksiyonlarıdır. Frekans cevap fonksiyonu tepki hareketi olan çıkışlar ile etki hareketi olan girdiler arasındaki ilişkilerdir ve FFT sinyalleri sayesinde zaman alanındaki sinyal frekans alanına aktarılarak her bir FFT sinyal bileşeni için FRF oluşturulur.
Frekans cevap fonksiyonu, rezonans frekanslarınının ve sönümlerin tanımlanmasında, fiziksel yapının mod şekilerinin oluşturulmasında rol alır.

Bahsedilen kavramların FRF' de gösterimi ise şu şekilde gerçekleştirilir;

- Rezonans, grafikte zirvede olan noktalar yani peak yapan yerler test altındaki yapının doğal frekansını belirtir ve rezonansa o frekans aralığında girdiğini gösterir.
- Sönümleme, peak genişliğinin orantısıdır ve grafikte peak yapılan kısımlar ne kadar geniş ise sönümleme o kadar yüksektir.
- Mod şekilleri, yapı üstünde ortak bir referans belirten çoklu FRF fazları ve genlikleri, mod şekilerinin belirlenmesinde kullanılır.

Bir FRF'in genellikle birimleri [$m/s^2/N$] veya [g/lbf] şeklinde ifade edilir. Yüksek FRF büyüklükleri, yapıyı daha hassas hale getirir ve daha düşük giriş kuvveti seviyelerinde bile çıkış tepkisi nispeten yüksek olabilir. FRF grafiğinin genel olarak gösterimi Şekil 2.20'de verilmiştir.



Şekil 2.20. Frekans cevap fonksiyonu

FRF büyüklüğü maksimum / zirvede olduğunda ve faz bu noktada 90 derece döndüğünde, genellikle bir rezonans meydana gelir. Bu, tutarlılık incelenerek doğrulanabilir. Düşük FRF büyüklük değerlerine sahip frekanslarda ise yapı, giriş kuvvetlerine daha dirençlidir ve çıkış tepkisi, daha yüksek giriş kuvveti seviyelerinde bile nispeten düşük olabilir. Çukur konumları genellikle yapının anti-rezonans frekanslarını gösterir.

Buradan da anlaşılacağı üzere başarılı bit test elde edimi için kaliteli bir FRF grafiği olmalıdır çünkü grafikten elde edilen değerler rezonans, mod şekilleri, sönümlemeyi belirtmektedir.

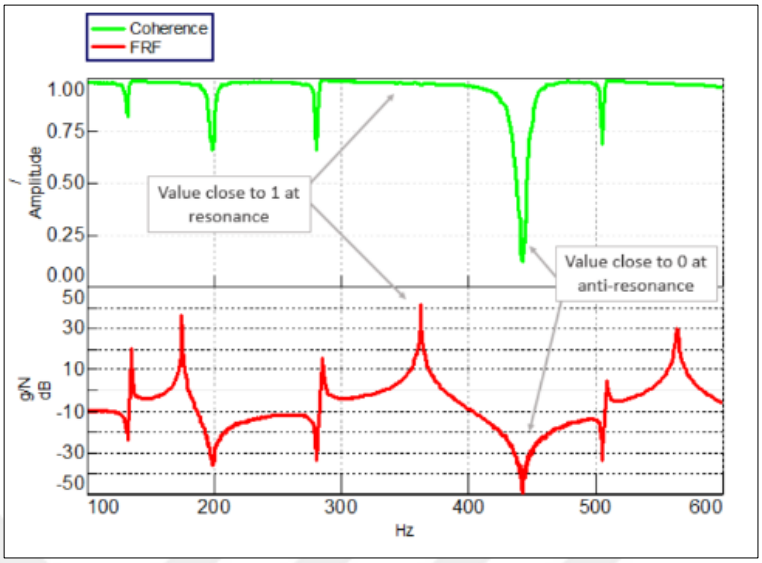
2.7.2. Tutarlılık

Tutarlılık aslında genel olarak ingilizcesi ile adlandırılan Coherence, çıktının FRF'deki girdiden ne kadar belirtildiği frekansa karşılık bir fonksiyondur yani FRF kalitesinin göstergesidir ve FRF tutarlığını değerlendirir.

Coherence değerleri 0 ile 1 arasındadır;

- 1 değeri, FRF frekansının ölçümden ölçüme tekrar edilebilir olduğunu gösterir.
- 0 değeri ise tam tersidir, ölçümün tekrar edilemediğini, ölçüm kurulumunda bir hata olduğunu belirtir.

FRF ve tutarlılık (coherence) arasındaki bağlantı grafikler altında şu şekildedir;



Şekil 2.21. FRF ve tutarlılık grafiği. (FRF-kırmızı, Tutarlılık-yeşil) (Anonim 2020)

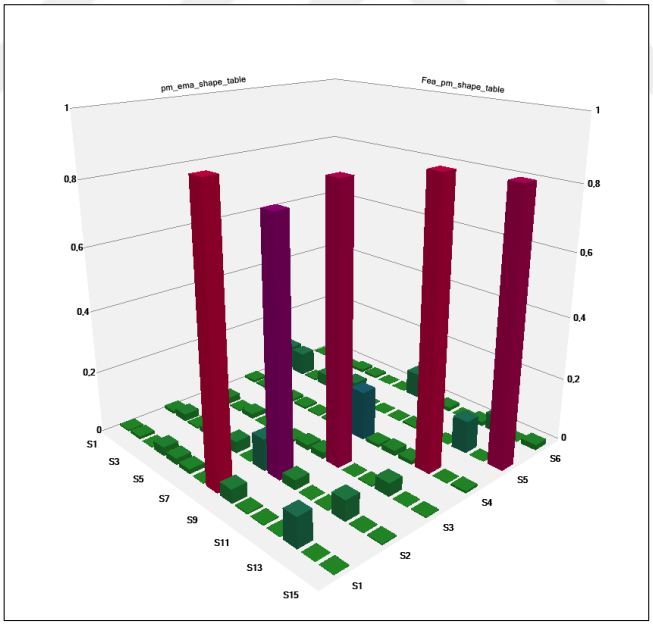
Şekil 2.21'de de görüldüğü üzere FRF genliğinin fazla olduğu yerlerde yani rezonansa uğranılan frekans noktalarında, tutarlılık değeri coherence grafiğinde 1 değerine yakın olacaktır.

FRF grafiğinde genlik değeri düşük olduğunda dolayısıyla anti-rezonans (rezonans olmayan) noktalarda, tutarlılık değeri coherence grafiğinde 0 değerine yakın olacaktır. Bunun nedeni sinyallerin düşük olmasından kaynaklanır. Bu kabul edilebilir bir durumdur fakat coherence değeri, FRF grafiğindeki rezonans noktasında 0'a, 1'den daha yakın olduğunda bu durum bir problemin ölçüm ile alakalı olacağını belirtir.

Kısacası Tutarlılık değerleri, modal test aşamasında testin doğru ölçüm ile ilişkilendirilmesinde ve FRF grafiklerinin kalitesinde önemli bir rol almaktadır. Ayrıca oluşan hataların ölçüm tabanlı olup olmadığını da belirtmede yardımcı olmaktadır (Anoninm 2020).

2.7.3. Modal Doğrulama (Modal Güvence Kriteri, MGM/MAC)

Modal güvence kriteri (ing. Modal Assurance Criterion, MAC) yapılan modal testler sonrasında en önemli parametrelerden biridir. MAC, test sonrası oluşan mod şekillerinin benzerliğini incelemeye, doğruluğunu öngörmeye yarayan bir matris sisteminidir. Modal güvence kriterinin, testi yapan kişiler için önemi ise bilgisiyar destekli programlar kullanılarak yapılan sayısal analizlerin fiziksel analizlerle kıyasını sağlamakta ve testin doğruluğunu yüzdesel olarak ortaya çıkartmaya yarayan bir doğrulama sistemidir.
Tipik bir MAC analizinde, bir 'MAC Matrisi' yapılabilir. "MAC Matrisi", MAC değerlerinin her biri Şekil 2.22'de gösterildiği gibi yüzdelik olarak 0 ile 100 arasında değişen bir dizi bar grafiktir. MAC analizinde bir takım paket programlardan yardım alınır ve bu paket programlara ileriki başlıklar altında kullanım örneği ile değinilecektir.



Şekil 2.22. MAC matrisi

Şekil 2.22' deki bir deneysel modal test ile sayısal modal analiz için kıyaslanmış bir moddur. Mod seti dokuz farklı mod içerir, bu nedenle 81 farklı MAC değeri hesaplanmaktadır. Değerlerin yaklaşık yarısı aynıdır. Mod 1 ve 3 arasındaki MAC

değeri, mod 3 ve 1 arasındaki ile aynıdır. Kırmızı değerler %100 MAC değeridir. Koyu yeşil MAC değeri %10'dan az olan değerlerdir. Örnek olarak şekil 2.22'de deneysel modal testin ilk modu, sayısal modal analiz ile kıyaslandığında benzerlik oranlarının yüksek ve doğruluk payının olduğu gözlemlenmektedir. İdeal olarak, her mod benzersiz bir şekilde gözlemlenmeli ve diğer modlardan farklı bir şekle sahip olmalıdır.

Yukarıda bahsedilen paragraftan da anlaşılacağı üzere mod şekilleri benzer ise MAC, %100 değerine sahip veya yakın olacak ve doğrulunu ispatlayacaktır. Mod şekillerinde farklılık gözükmesi dahilinde MAC matrisindeki değerler de azalma gözükecek ve bunun sonucunda testin gözden geçirilmesi sağlanacaktır.

İki mod şekli arasındaki MAC değeri Denklem 2.22'de gösterildiği gibi ifade edilir. Ayrıca, iki modal vektör φr ve φs arasındaki korelasyonun karesi olarak da düşünülebilir.

$$MAC(\{\varphi_r\},\{\varphi_s\}) = \frac{[\{\varphi_r\}^{*t}\{\varphi_s\}]^2}{(\{\varphi_r\}^{*t}\{\varphi_s\})(\{\varphi_s\}^{*t}\{\varphi_s\})} \tag{3.22}$$

İki mod şeklini karşılaştırmak için Modal güvence kriteri Denklem 2.22'de tanımlanmıştır. Eğer iki karmaşık vektör arasında doğrusal bir ilişki varsa (yani, vektörler aynı yönde hareket ediyorsa), MAC değeri yaklaşık olarak 1 olacaktır. Ancak eğer vektörler doğrusal olarak bağımsızsa, MAC değeri küçük (sıfıra yakın) olacaktır (Anonim 2020).

Modal Güvence Kriteri (MAC) analizi birkaç farklı şekilde kullanılabilir;

- FEA – Test Karşılaştırması: MAC Deneysel Modal Analiz Testi ile Sonlu Elemanlar Analizine (FEA) ait modları karşılaştırmak için kullanılabilir.
- FEA-FEA karşılaştırması: FEA analizi sırasında çeşitli varsayımlar yapılır; Young Modülü, sınır koşulları ve kütle yoğunluğu değerleri bunlardan bazılarıdır. MAC analizi, bu varsayımların, elde edilen mod şekillerini ne derece etkilediğini belirleyebilir.

- Test-Test karşılaştırması: MAC analizi, modal analiz sonuçlarıyla ilgili olası sorunları saptayabilir. MAC genellikle yapı hakkında daha fazla veri noktası elde etmekten faydalanabilecek modları ve alanları belirler (Anonim 2019b).

Ayrıca MAC matrisinin frekans değerlerine değil mod şekillerine odaklandığı ve değerler arasında karşılaştırma yapmayıp mod şekillerini karşılaştırdığı bilinmelidir.
Bu tez çalışmasında MAC matrisinin kullanım örneklerinden olan FEA-Test karşılaştırması ile Test-Test karşılaştırmalarına başvurulmuştur.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde gerçekleştirilen testler esnasında kullanılan ekipmanlar yararlanılan bilgisiyar destekli programlar, kullanılan veri toplama sistemleri ve test altındaki parçalar hakkında genel bilgiler verilmiş ve cihazların özelliklerinden bahsedilmiştir.

3.1. Darbe Çekiç

Test esnasında girdi sinyallerini sağlayan darbe çekicinde DJB® Instruments firmasının IH-01 kodlu darbe çekici kullanılmıştır. Şekil 3.1'de darbe çekicine ait görselleri ve özellikleri verilmiştir.

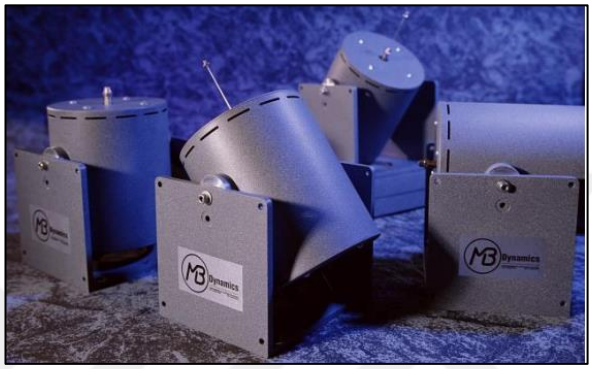


Şekil 3.1. Darbe çekici IH-01 (Anonim 2017)

Hasaasiyet : 25mV/N
Ölçüm aralığı : 200N
Çekic Ucu Çapı : 21mm
Çekic Ucu Ağırlığı : 28gr
Toplam Çekiç Ağırlığı : 110g
Çıkış Bağlantısı : BNC
Çekic Ucu Tipleri : Kauçuk, Naylon, Alüminyum, Çelik

3.2. Modal Sarsıcı

Test sırasında darbe çekiç haricinde parçaya etki kuvvetlerini sağlayan modal sarsıcıda MB Dynamics MODAL 50A markalı modal sarsıcıdan yararlanılmıştır. Kullanılan sarsıcının modeli Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Modal sarsıcı (Modal 50A) (Anonim 2021a)

- Nomminal Kuvvet : Sine Peak/ Random RMS : 110 / 75N
- Max. İvme : Sine peak/ Random RMS : 100g Peak / 70g RMS
- Max. Hız : 1.5 m/s
- Max. Nominal Akım : RMS : 8.0 A
- Armatür Rezonansı : > 7 kHz
- Armatür Ağırlığı : < 0.15 kg
- Armatür Süspansiyon Sertliği : 2.6 N/mm

Modal sarsıcı kullanımı esnasında DYTRAN Instruments 1053V3 modeli olan IPEPE tipi kuvvet sensörü kullanılmıştır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Kuvvet sensörü modeli (Anonim 2023)

- Hassasiyet : 11.2 mV/N
- Sıkıştırma Aralığı : 0.44 kN

3.3. İvmeölçerler

Test aşamasında ivme sinyallerini ölçmeye yarayan, tepki girdisi olarak görev yapan ivmeölçerlerden DYTRAN Instruments 3055D2 modeli ve PCB PIOZETRONICS 356A03 3 eksenli modeli olan IEPE/ICP tipi olan ivmeölçerden yararlanılmıştır (Şekil 3.4 ve Şekil 3.5).



Şekil 3.4. DYTRAN ınstruments ivmeölçer modeli (Anonim 2023b)

- Hassasiyet : 100 mV/g
- Ölçüm Aralığı : 50 g pk
- Geniş Band Çözünürlüğü : 0.004 g rms (0.03 m/s² rms)
- Ağırlık : 0.35 oz (10 g)

- Frekans Aralığı : 54 – 10000 Hz



Şekil 3.5. PCB PIOZETRONICS ivmeölçer modeli (Anonim 2023c)

- Hassasiyet: x= 10.65 mV/g y= 9.90 mV/g z= 10.69 mV/g
- Ölçüm aralığı: 500 g pk
- Geniş Bant Çözünürlüğü: 0.003 g rms (0.03 m/s^2 rms)
- Ağırlık: 0.04 oz (1.13g)
- Frekans Aralığı: 2 – 8000 Hz (y ve z ekseni) 2 – 5000 Hz (x ekseni)

3.4. Paket Programlar

Modal Test aşamasında kullanılan programlar;
Sonlu elemanlar metodu ile modal analiz gerçekleştirmek için ANSYS WB® R23.2 programı kullanılmıştır.
Test esnasında çekiç testleri için FFT/FRF grafiklerinin elde edilmesini sağlayan DEWESoft® X3 programı ve modal sarsıcı için MEScope® programı kullanılmıştır.
Modal Güvence Kriteri (MGM) hesaplarını yapmak ve yapılan testlerin doğrulanması ve karşılaştırılması için de MEScope® yazılımı kullanılmıştır.

3.5. Veri Toplama Sistemi

Darbe çekiç veya modal sarsıcı ile verilen kuvvet sinyallerinin ve ardından ivmeölçer ile alınan ivme sinyallerinin eş zamanlı olarak ölçülmesinde ve verilerin toplanmasında DEWESoft® Sirius HD 16xSTGS veri toplama sistemi kullanılmıştır. DEWESoft® daha çok darbe çekiç testlerinde tercih edilirken sarsıcı için uyumlu olan National Insturments USB 4431 veri toplama sistemi kullanılmıştır. Şekil 3.6 ve Şekil 3.7'de veri toplama sistemlerinin resmi verilmiştir.



Şekil 3.6. DEWESoft® 16 kanallı veri toplama sistemi

DEWESoft® Kanallı veri toplama sistemine ait genel özellikler
Çizelge **3.1**'de verilmiştir (Anonim 2023d) .

Çizelge 3.1. Dewesoft veri toplama sistemi özellikleri

Analog Girişler	16 kanallı voltaj, tam/yarım/çeyrek köprü birim uzama, akım (dış şant'lı)
ADC Tipi	Anti-alliasing filtreli 24 bit delta-sigma
Örnekleme Hızı	Eşzamanlı 200kS/s
Aralıklar	±10V,±1V,±100mV,±10mV
10Vexc'te Br aralıkları	1000mV/V,100mV/V,10mV/V,1mV/V
10kS'te Dinamik Aralıklar	137 dB
Giriş Bağlantısı	DC
Giriş Empedansı	10 MΩ

Köprü Modları	Tam/Yarım/Çeyrek Br120/3500 3-tel, içten köprü tamamlama
İç Şant Direnci	100 kΩ, çift kutupludan Exc + yada – (diğerleri talep edilirse)
Uyarma Gerilimi	0'dan 12 VDC'ye kadar yazılımdan programlanabilir (16 bit DAC), maks 44mA
TEDS	Desteklenir, 9pinli DSUB'a uyumlu MSI adaptörler
Yüksek Gerilim Koruyucu	IN+ 'dan IN –'ye, sürekli 50V, 200V tepe (10ms)
Tipik Güç Tüketimi (maks)	11W(22W)
Kullanılabilir Giriş Konnektörleri	DB9,L1B10f (diğerleri talep edilirse)



Şekil 3.7. NI USB-4431 veri toplama sistemi

NI USB-4431 veri toplama sisteminden yapılan modal sarsıcı testlerinde sarsıcıya güç aktarımını sağlamak ve veri toplamak amacı ile kullanılmıştır. Kullanılan veri toplama sistemine ait genel özellikler Çizelge 3.2'de belirtilmiştir (Anonim 2023e).

Çizelge 3.2. NI USB-4431 veri toplama sistemi genel özellikleri

Analog Kanallar	5 kanallı; 4 Kanallı Giriş kanalı mevcuttur. 1 Kanal güç kaynağına çıkışlıdır.
ADC Tipi	Anti-alliasing filtreli 24 bit delta-sigma
Örnekleme Hızı	Eşzamanlı 102.4kS/s
Aralıklar	±10V,±1V,±100mV,±10mV
10Vexc'te Br aralıkları	1000mV/V,100mV/V,10mV/V,1mV/V
10kS'te Dinamik Aralıklar	100 dB
Çıkış Bağlantısı	DC
Çıkış Empedansı	50Ω

3.6. Test Edilen Parçalar

Bu bölümde gerçekleştirilen testlere konu olan parçalara ve bu parçaların nereden referans alınarak kullanıldığına değinilmiştir

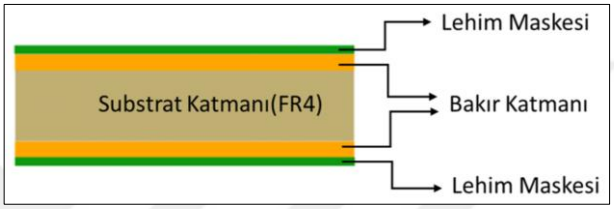
3.6.1. FR4 PCB Plakası

Elektronik devrelerin bileşenlerinin monte edildiği ve bu bileşenler arasındaki elektriksel bağlantının bakır kaplı yüzeyler arasındaki izlerle sağlandığı plakalara baskılı devre kartları (PCB) denir. PCB'lerin 2 önemli amacı vardır;

- Elektronik bileşenleri bir arada tutan bir parça işlevi görmesi,
- Bileşenler arasında elektriksel bağlantıyı sağlaması.

PCB'ler günümüzde modern elektronik cihazların olmazsa olmaz parçalarından biridir. Yapıldıkları malzemeye görede değişen özelliklere sahiptir. Düz, sert ve yalıtkan özelliklere sahip, üzerinde iletkenler ve ince yapılar bulunduran katmanlı bir karttır. Bu katmanlar serigrafi, lehim maskesi, bakır, FR4 olup; birbirine ısı ve yapıştırıcı ile lamine

edilmiştir. Bu katmanlardan FR4, ısıya, neme ve sarsıntıya dayanıklı üzerinde rahat çalışabilen yapıya sahiptir. Kaliteli olmayan PCB`lerde FR4 yerine başka malzemeler kullanılması, dayanıklılığı önemli ölçüde azaltmaktadır (Anonim 2021b). Devre kartları üzerinde kullanılan malzemeler kullanıkları alana göre de değişiklik göstermektedir. En çok kullanılan ve tercih edilen ana taşıyıcı malzemeler; FR4, Alüminyum veya Alüminyum Fiberglass karışımı, CEM1 olarak görünmektedir.



Şekil 3.8. PCB katmanları

Şekil **3.8**'de görülen PCB yapısı bir çift katmanlı yapıdır. Baskı devre kartları bakır bileşeni katmanına göre sınıflandırılır. Bakır bileşeni katmanı eğer sadece bir kısımda var ise tek katmanlı, iki kısımda var ise çift katmanlı veya birden fazla bakır katmanına sahipse çok katmanlı baskı devre kartları olarak sınıflandırılırlar. Alt katman (İng. Substrat) ise baskı devre kartlarının rijitliğini sağlamakta ve genellikle FR2, FR3, FR4, CEM1, CEM2, CEM3, Al ve FR karışımı gibi malzemelerden oluşmaktadır. FR4 (ing. Flame reterdant) aleve dayanaklı anlamına gelmektedir ve epoksi reçineden oluşmuş bir cam elyaf kompozit malzemesidir. Bir çok epoksi reçineden oluşmuş cam elyaf malzemesi vardır fakat sunduğu avantajlar nedeniyle en çok tercih edilen alt katman malzemesi FR4 olarak kullanılmaktadır. Ayrıca otomotiv endüstirisinde aydınlatma sistemlerinin öncüsü olan far ve stoplarda bulunan baskı devre kartlarıda malzeme özelliklerinin standartlara uyması nedeniyle FR4 epoksi levha olarak üretilip kullanılmaktadır (Anonim 2022c).

PCB'lerde en çok tercih edilen ve bu çalışmada da malzemenin seçilmesini etkin kılan FR4 (cam epoksi levha);

- iyi mukavemet/ağırlık oranlarına sahip,
- Sıcaklık ve aleve karşı yüksek direnç kapasitesi,
- Sürtünme gibi aşındırıcı fiziksel kuvvetlere karşı yüksek koruyuculuk,
- popüler ve çok yönlü yüksek basınçlı termoset plastik laminat kalitesine sahip,
- sıfıra yakın su absorpsiyonu ile önemli mekanik mukavemete sahip en yaygın kullanılan elektrik yalıtkanı,
- malzemenin hem kuru hem de nemli koşullarda yüksek mekanik değerlerini ve elektriksel yalıtım özelliklerini korumaktadır.

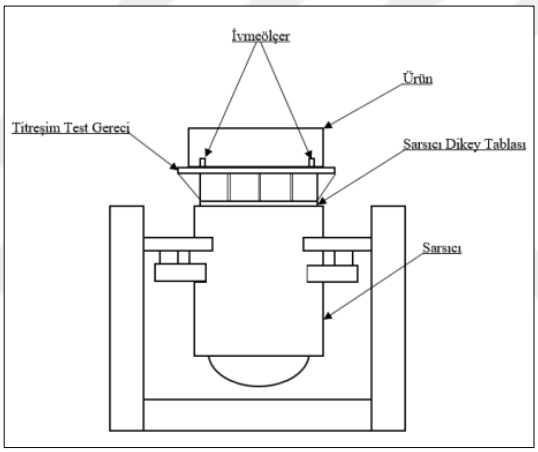
Bu nitelikler, iyi imalat özellikleriyle birlikte, çok çeşitli elektrik ve mekanik uygulamalar içinde kaliteye fayda sağlamaktadır (Anonim 2022d).

3.6.2. Alüminyum Test Plakası

Deneysel modal test yöntemlerini incelemek ve sonlu elemanlar sonuçlarını kıyaslabilmek için FR4 plakasından ayrı olarak Al malzemden üretilmiş bir plaka tercih edilmiştir. Al plakanın, FR4 plakasına göre daha ağır olması ve büyük olması ve bu ağırlığın test yöntemlerine etkisini görebilmek, devre kartlarında tek başına veya cam elyaf karışımı ile birlikte en çok tercih edilen malzemeler arasında yer alması ve son olarak sıklıkla baskı devre kartlarının titreşim fikstürlerinin Al malzemeden üretilmiş olması plakanın test için tercih edilme sebepleri arasında yer almıştır. Al malzemenin devre kartlarında sık kullanılma sebepleri arasındaki en büyük etken yüksek ısı dayanımı özelliğidir dolayısıyla aydınlatma sektöründe daha çok tercih edilmektedir. Diğer sık kullanım alanı iste titreşim testleri tarafındadır. Titreşim fikstürleri, titreşime tabi tutulacak parçaları belli prosedürler altında uygulanacak sinüs, random ve şok testleri için sarsıcıya bağlanmasında yardımcı olan ara aparatlardır. Titreşim fikstürleri test esnasında sarsıcı tarafından uygulanacak kuvvete maruz kaldığında şekil değiştirmemesi için rijit olarak tasarlanmalı ve üretilmelidir. Dolayısıyla titreşim fikstürleri bir çok yükle direkt

temas halinde olduğundan dolayı titreşim testleri esnasında fikstürlerin ilk doğal frekansları herhangi bir titreşim sorununa el vermemek için test profilindeki frekanslardan yüksek olmalıdır bu yüzden parçaların modal analizleri gerçekleştirilmeli ve rezonans frekansları belirlenmelidir.

Bir çok endüstride önemli bir konu olan titreşim sorunu ve bu sorunları öngörmek için yapılan titreşim testlerinin genel düzeneği
Şekil **3.9**'da gösterilmiştir.

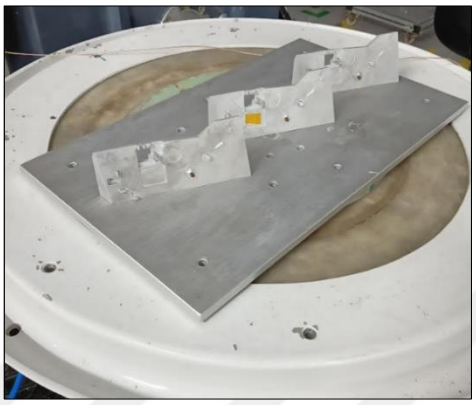


Şekil 3.9. Titreşim test düzeneği (Kaya 2021)

Şekil **3.10**'da gösterildiği üzere aydınlatma sistemlerinde kullanılan devre kartlarının titreşim test profillerine uygun ve devre kartlarının sarsıcıya bağlanmasında önemli rol oynamaktadır. Alüminyum alaşımlarının test fikstürlerinde kullanılmasının başlıca sebepleri arasında şu özellikler gelmektedir;

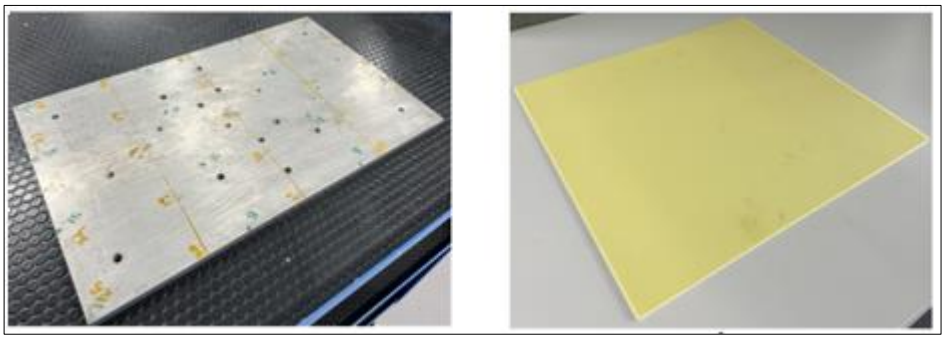
- Hafif ve sağlam olması,
- Korozyon direncinin yüksek olması,
- Düşük sıcaklıklarda mukavemet dayanımına sahip olması,
- Ağırlıktan tasarruf edilebilmesi

Alüminyum malzemesinden üretilmiş bir plaka hem titreşim fikstürü yönüyle hem de devre kartlarında tercih edilen taşıyıcı malzeme yönü ile sektörde çok tercih edilmesinden dolayı çalışmada malzemenin seçilmesini etkin kılmış ve modal testlere dayanıklılığında önemi göstermek için tabi tutulmuştur.



Şekil 3.10. Alüminyum PCB titreşim testi fikstürü

Aşağıda deneysel modal analiz çalışmasında kullanılacak test numunelerine ait şekiller gösterilmiştir. Kullanılan plakaların malzemeleri, ağırlıkları, geometrileri ve üretim metodlarının farklı olmasına dikkat edilmiş ve test yönteminin çeşitliliği arttırılmıştır.



Al Plaka FR4 Plaka

Şekil 3.11. Test numuneleri

4. BULGULAR

Bu çalışmada farklı malzemelere sahip 2 farklı geometri üzerinde belli parametreler değiştirilerek ve farklı metodlar uygulanarak deneysel modal analizler gerçekleştirilmiş

ve bunlara ek olarak sonlu elemanlar metodu ile sayısal analizler yapılmıştır. Bilgisayar ortamında yapılan Sonlu elemanlar analizi sonucu elde edilen modal analizlerin doğal frekansları ve mod şekilleri ile deneysel modal analiz sonucunda elde edilen doğal frekans ve mod şekilleri modal doğrulama ile yani MAC matrisi ile hesaplanarak sonuçların karşılaştırılmasına gidilmiştir. Farklı modal analiz metodları ve farklı parametrelerin uygulanması ile sonuçların benzerliklerinin ne kadar değiştiğini gösteren matris hesapları yapılmıştır. Deneysel modal analiz çalışmasında yapılan çalışmalar özet olarak şu şekilde gerçekleştirilimiştir;

1- Test numuneleri sonlu elemanlar programında modal analizlere tabi tutulmuştur. Öncelikle test fikstür ve devre kartı katmanlarında kullanılan plakanın Al malzeme olarak sonlu elemanlar programında modal analizleri hesaplatılmıştır. F4 PCB plakasınında modal analizleri aynı metod ile hesaplatılmıştır.
2- Test numuneleri sonlu elemanlar programında x,y ve z eksen koordinatlarına göre çizilmiş ve deneysel testlerde kullanılacak programlarda (DEWESoft® ve MEScope®) numunelerin geometrileri koordinatlara göre oluşturulmuştur.
3- Parçalar üzerinde yapılan modal analiz sonuçlarına göre her iki numunede de ölçüm noktaları belirlenmiş ve bu noktalar numuneler üzerine koordinatlara göre işaretlenmiştir.
4- Sayısal modal analizlerinin hesaplanmasının ardından deneysel modal analiz çalışmalarına Alüminyum plakasından başlanarak öncelikle serbest serbest sınır koşullarını sağlamak adına elastik iplerle asılarak çekiç gezdirme ve ivmeölçer gezdirme testlerine tabi tutulmuştur. Daha sonrasında meydana gelen FRF verileri incelenerek test sönümlü ortamda gerçekleştirilmiştir.
5- Al plakası diğer bir deneysel modal analiz metodu olan sarsıcı testine tabi tutulmuştur. Test datası Mescope programı üzerine hazırlanarak ve test düzeneği kurulduktan sonra hangi test metodunun hangi tür plakalarda daha sağlıklı bir yöntem olacağı kararlaştırılmıştır.
6- FR4 PCB plakası için ise aynı adımlar izlenerek testler gerçekleştirilmiştir. Plaka üzerinde serbest sınır koşullarını sağlamak için elastik ipler kullanılmış ve deneysel testler gerçekleştirilmiştir. Plaka üstünde düğüm noktaları parametreleri

değiştirilerek testler yapılmıştır. Parça üstünde analiz sonuçlarına göre 18 ve 55 ölçüm noktası konumları belirlendikten sonra testler ayrı ayrı gerçekleştirilmiş ve ölçüm noktalarının test sonuçlarına etkisi izlenmiştir. Ayrıca çekiç gezirme ve ivmeölçer gezdirmenin test sonuçlarına etkisinin olup olmadığı incelenmiştir.

7- Her iki numune üzerinde de çekiç testleri için DEWESoft® programı ve veri toplama sisteminden, sarsıcı testleri için MEScope® programı ile National Instruments veri toplama sisteminden yararlanılmıştır.
8- Yapılan deneysel modal analizler sonucunda elde edilen veriler ve sayısal modal analiz sonucundan elde edilen veriler MEScope® programına aktarılarak ilk 3 ve 4 mod için MAC matris yöntemi ile test ve analiz sonuçları karşılaştırılmış ve sonuçların benzerliği incelenmiştir. Ayrıca gerçekleştirilen farklı parametrelerdeki modal testler de MAC matris yöntemi ile MEScope® programında karşılaştırılarak testlerin birbirleri arasındaki tutarlılıkları incelenmiştir.

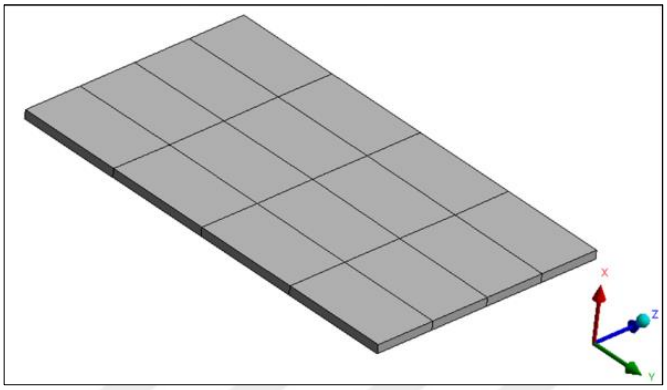
4.1. Test Numunelerinin Sonlu Elemanlar Modal Analizi

Bu bölümde her iki parçanın da sırası ile bilgisayar ortamında sonlu elemanlar modal analizler gerçekleştirilmiş ve test öncesi analiz sonuçları belirlenmiştir.

4.1.1. Alüminyum plaka

Bu çalışmada, numunelerin sonlu elemanlar modal analizi oluşturulmasında Ansys 2023 R2 versiyonundan yararlanılmıştır. Al plakanın sonlu elemanlar modeli Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Sonlu elemanlar modeli ile birlikte plaka üzerinde ilk 3 mod çözdürülmüştür. Şekil 4.2'den Şekil 4.4'e kadar sonlu elemanlar modal analizinden çıkan sonuçlar gösterilmiştir. Sonlu elemanlar modal analizi için dörtgen kabuk eleman yapısı yaratılmıştır. Malzeme özellikleri bakımından analiz ortamına elastisite modülü ve yoğunluk girilerek, serbest sınır şartları altında çözülmüştür. Sonlu elemanlar modelinde çekirdek plaka 480x280 mm boyutlarında ve kalınlığı 10 mm olacak şekilde modellenerek tamamlanmıştır. Analiz sonucuna göre parçanın hareketleri baz alınarak

numuneler üzerindeki ölçüm noktaları x,y ve z eksenlerine göre koordinatları belirlenmiştir.

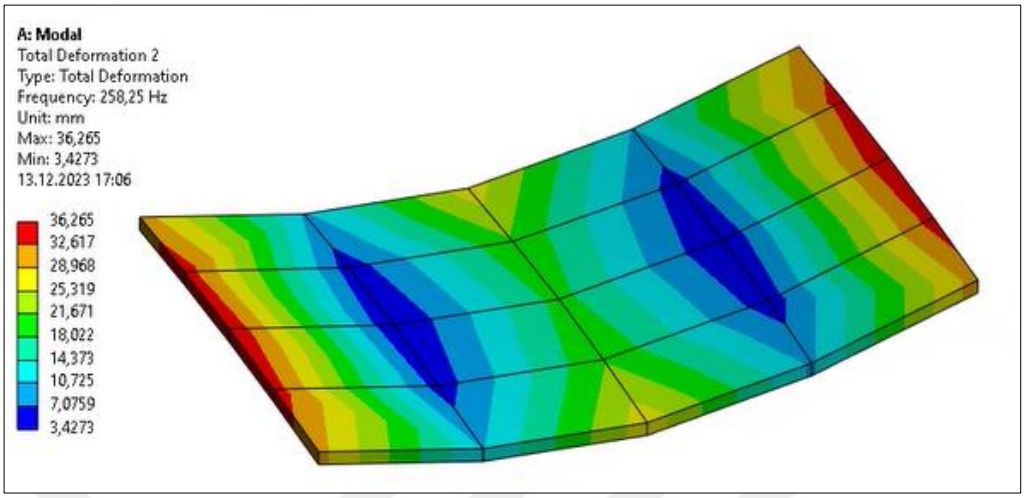


Şekil 4.1. Sonlu elemanlar Al plaka modeli

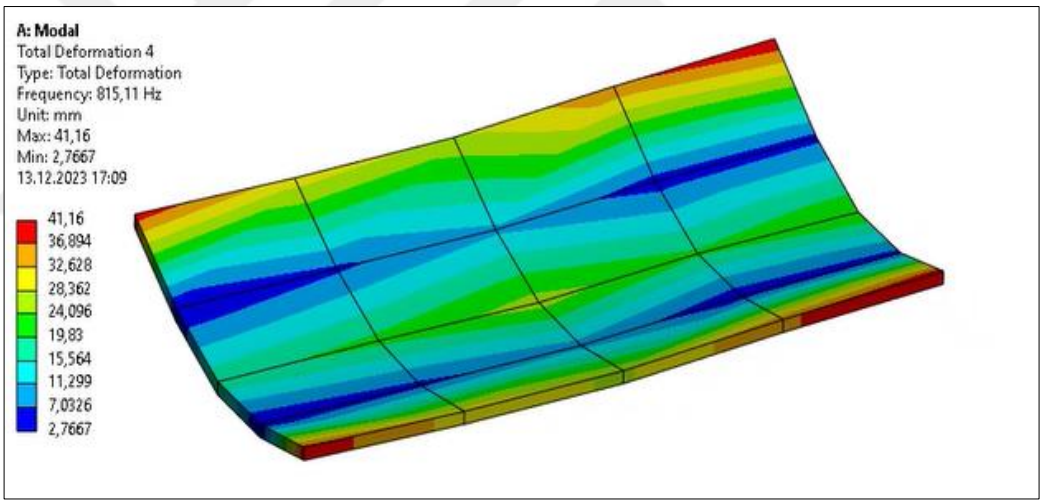
Sonlu elemanlar modal analizine başlamadan önce Alüminyum malzeme özellikleri Çizelge 4.1'de belirtildiği şekilde ANSYS WB® yazılım kütüphanesinden faydalanılarak kullanılmıştır.

Çizelge 4.1. Al plakası malzeme özellikleri

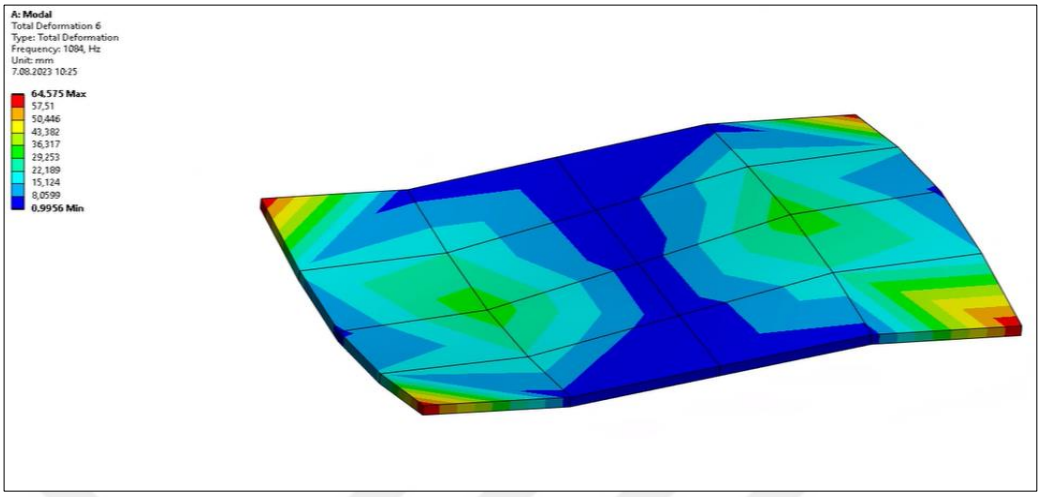
Yoğunluk (g/cm^3)	Elastik modülü (GPa)	Poisson Oranı	Kayma Modülü (GPa)
2,77	70	0,33	26



Şekil 4.2. Al plaka 1. mod - 258,25 Hz



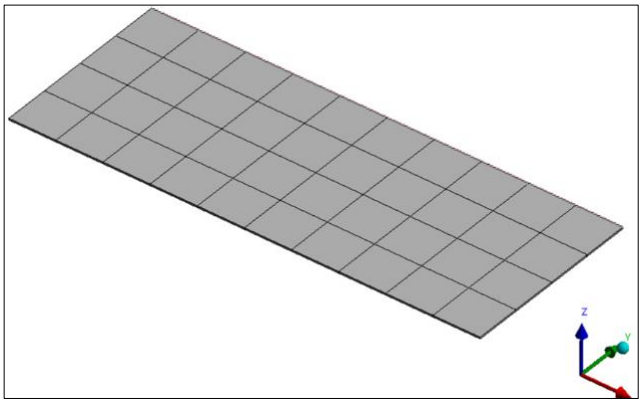
Şekil 4.3. Al plaka 2. mod - 815,11 Hz



Şekil 4.4. Al plaka 3. mod - 1084 Hz

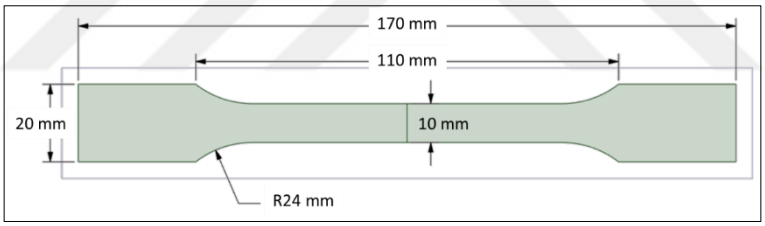
4.1.2. FR4 PCB plaka

Al test plakası üzerinde yapılan çalışmaların ardından aynı paket program kullanılarak FR4 malzemesinden oluşan PCB plakasında da sonlu elemanlar modal analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan analiz çalışmasında 160x400 mm ve kalınlığı 1.5 mm olan yapı modellendikten sonra dörtgen kabuk elemanlar oluşturularak sonlu elemanlar modal analizi geçrekleştirilmiştir. Plakanın sonlu elemanlar modeli Şekil 4.5'de gösterildiği gibi çözdürülmüştür. Gerçekleştirilen analizde malzeme üzerinde yapılan çekme testi sonucu ortaya çıkan parametreler belirlenerek sonlu elemanlar modelinde kullanılmış ve bu parametrelere göre analiz gerçekleştirilmiştir. Çekme testi numunesi Şekil 4.7'de gösterilmiştir. Sonlu elemanlar modeli ile birlikte ilk 4 modun modal analizleri çözdürülerek incelenmiştir. Analiz sonuçları Şekil 4.11'den Şekil 4.14'e kadar gösterilmiştir. Analiz, yapılacak olan deneysel analizi karşılamak adına oda sıcaklığında ve serbest sınır koşulları altında çözdürülmüştür. Yapılan analiz çalışmaları sonucunda ortaya çıkan parçanın davranışları baz alınarak x,y ve z eksenlerine göre ölçüm noktaları belirlenmiştir.

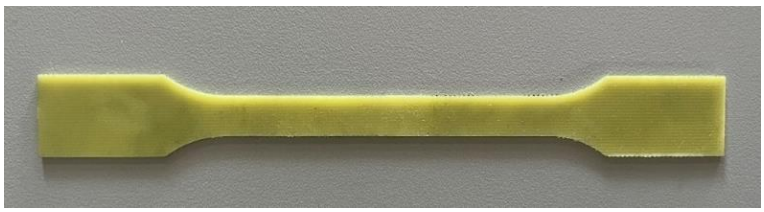


Şekil 4.5. FR4 plaka modeli

Bu çalışmada FR4 malzeme plakasının özelliklerini elde etmek amacıyla öncelikle ISO 527-4 standartlarına uygun numuneler x ve y yönlerinde hazırlanmış ve çekme testi ile birlikte malzemenin özellikleri belirlenmiştir. FR4 plakasının test numunesi, çekme testi ve test sonrası oluşan diyagramlar aşağıda belirtilmiştir.



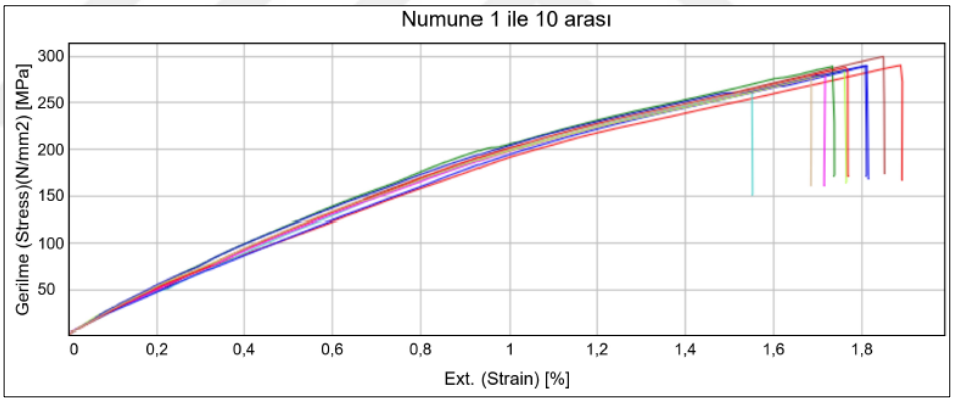
Şekil 4.6. ISO 527-4 Çekme testi numune boyutları



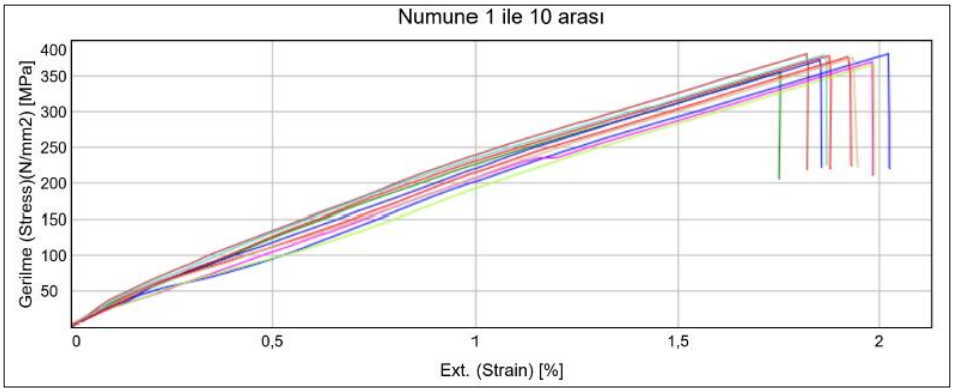
Şekil 4.7. FR4 PCB plaka çekme testi numunesi



Şekil 4.8. Çekme testi



Şekil 4.9. FR4 çekme testi diyagramı (x yönünde)

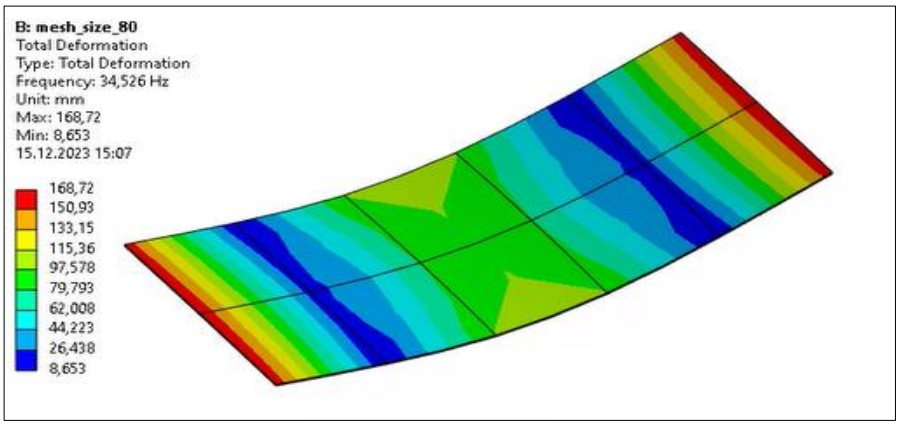


Şekil 4.10. FR4 çekme testi diyagramı (y yönünde)

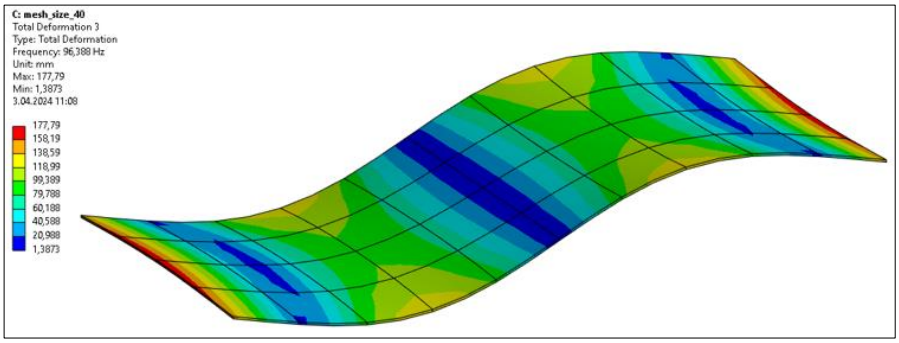
FR4 plakası üzerine gerçekleştirilen çekme testi sonrasında malzemenin özellikleri Çizelge 4.2'de belirtilmiştir. Belirtilen bu özellikler Amalu ve arkadaşlarının yaptıkları çalışma makalesinden alınmıştır ve sonlu elemanlar modal analizinde kullanılmıştır (Amalu ve ark. 2012).

Çizelge 4.2. FR4 çekirdek plakası malzeme özellikleri

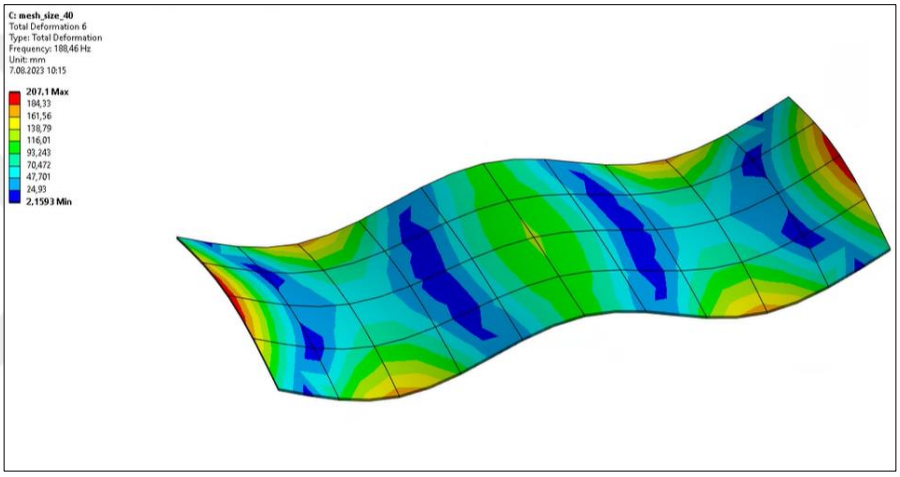
Yoğunluk	Elastik Modülü			Poisson Oranı			Kayma Modülü		
ρ (g/cm^3)	Ex (GPa)	Ey (GPa)	Ez (GPa)	vxy	vyz	vzx	Gxy (GPa)	Gyz (GPa)	Gxz (GPa)
1.9	25,7	23,9	22	0,17	0,2	0,17	27	22	27



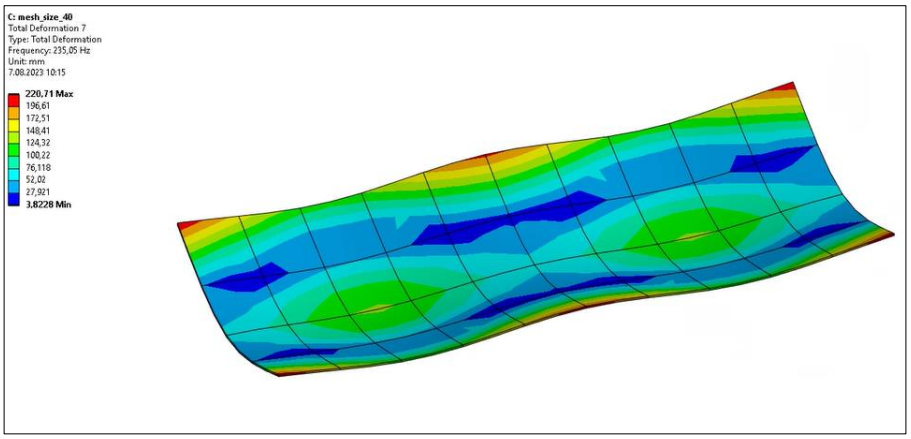
Şekil 4.11. FR4 plaka 1. mod - 34.5 Hz



Şekil 4.12. FR4 plaka 2. mod - 96.4 Hz



Şekil 4.13. FR4 plaka 3. mod - 188 Hz



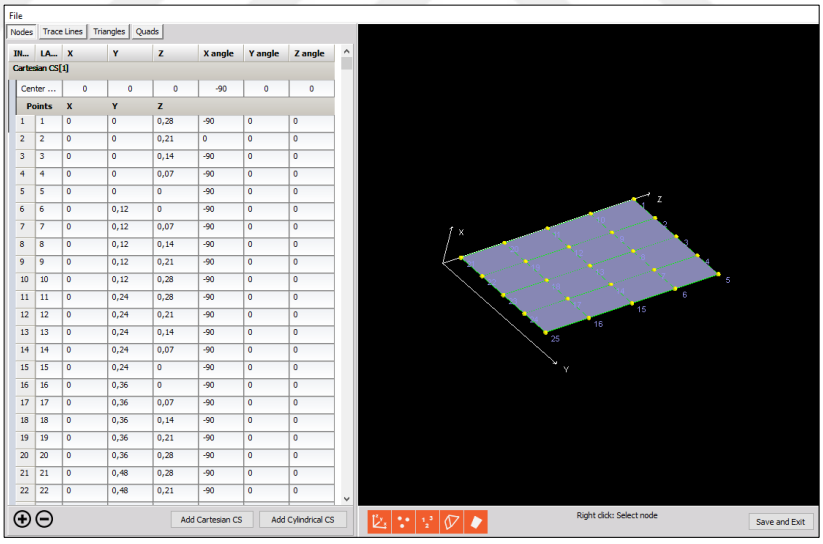
Şekil 4.14. FR4 plaka 4. mod - 235 Hz

4.2. Test Numunelerinin Deneysel Modal Analizi

Yapılan sonlu elemanlar modal analiz çalışmalarından sonra parçann davranışlarına göre x, y ve z eksenleri baz alınarak koordinatlara göre parça deneysel modal analiz için hazırlanmış ve ölçüm noktaları belirlenmiştir.

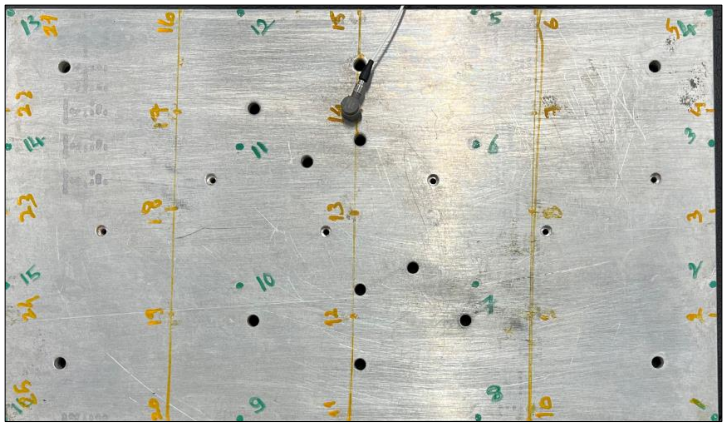
4.2.1. Al Plaka

Öncelikle Al plaka baz alınarak yapılan çalışmalarda Al plakanın DEWESoft® programında numune geometrileri ve koordinatları Şekil 4.15'de olduğu gibi oluşturulmuştur. Al plakasının sonlu elemanlar modal analiz çalışmalarından sonra ilgilenilen mod şekilleri baz alınarak plaka üzerinde 25 ölçüm noktası belirtilmiş ve test her bir nokta için gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.15).



Şekil 4.15. Al plaka geometrisi

Belirlenen 25 ölçüm noktası parça üzerinde ölçülere göre işaretlenmiştir (Şekil 4.16).

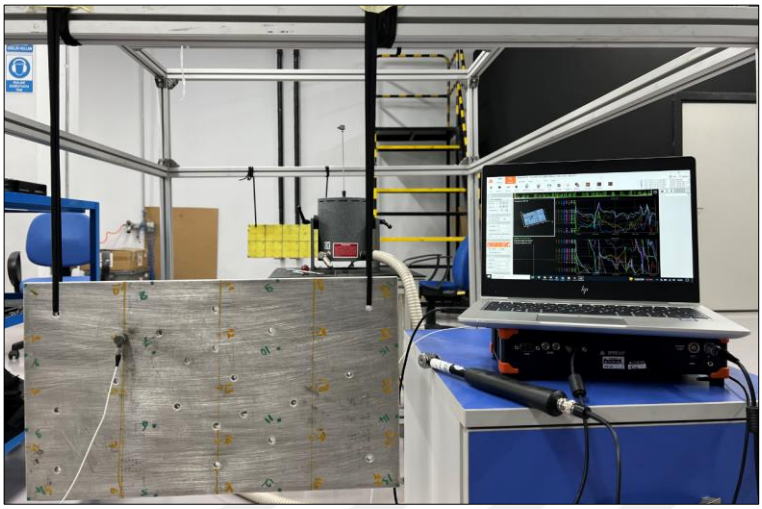


Şekil 4.16. Al plaka test numunesi

Yapılan bu işlemler ardından plaka testin başlatılması için hazır hale gelmiştir. Öncelikle parçanın serbest sınır koşulları altında test edilebilmesi elastik ipler kullanılarak delikler vasıtası ile parça darbe çekiç test metodu için test sehpasına asılmıştır (Şekil 4.17).

Al Plaka Üzerinde Darbe Çekiç Test Metodu

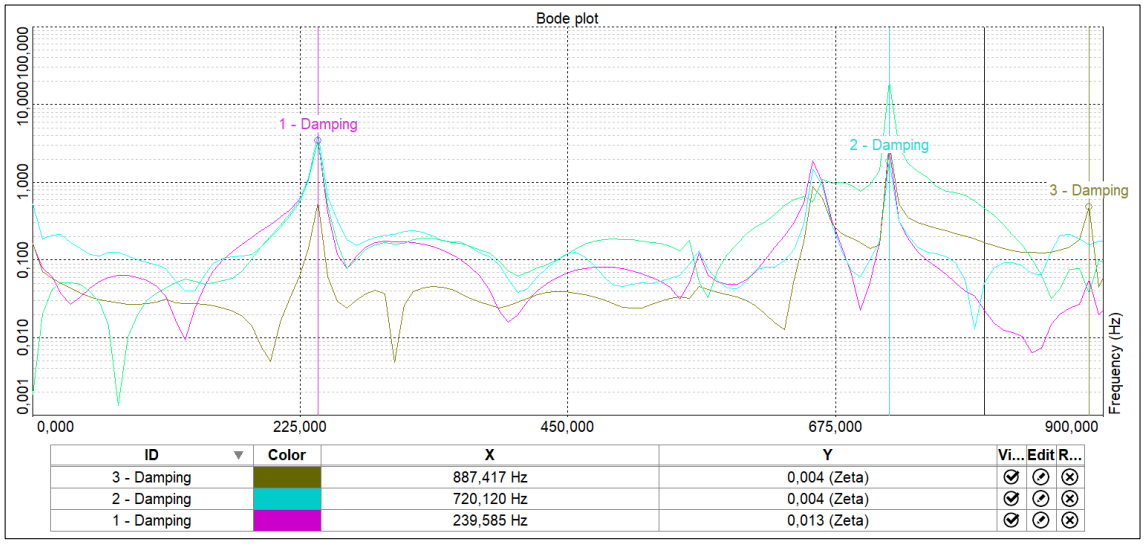
Darbe çekiç test metodu, etki olarak gerçekleştirilen çekiç vuruş sayısını her vuruşun hesabı ile birlikte ortalama alarak FRF grafiğini daha temiz hale getirmektedir. Normal şartlarda ise çekiç vuruşunun bir nokta üzerinde 6 ile 8 kez uyarı verilmesi önerilmektedir. Önerilere göre test kurulumunda çekiç etkisi 6 kez girilerek bir ölçüm noktasından 6 vuruş ortalamasına sahip FRF grafiği elde edilmiştir.



Şekil 4.17. Al test plakası test düzeneği

Çalışma sırasında Al plakanın bazı noktalarında modların olmadığı gözlemlenmiş ve her çekiç etkisinde plakadan çıkan ses ve DEWESoft® programından kontrol edilen FRF grafiği analiz edilerek parçanın çekiç etkisi esnasında sönümlenemediği ve grafikte rezonans noktaları arasında sızdırma sorununun ortaya çıktığı tespit edilmiştir (

Şekil **4.18**).

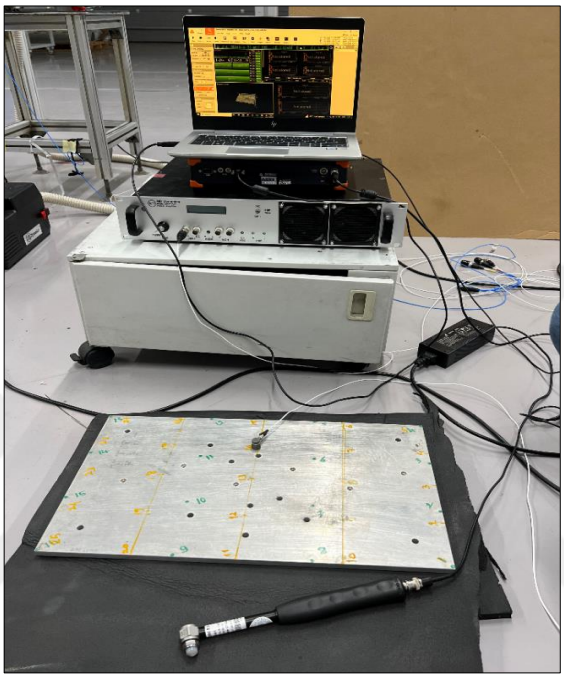


ID	Color	X	Y	Vi...	Edit	R...
3 - Damping		887,417 Hz	0,004 (Zeta)			
2 - Damping		720,120 Hz	0,004 (Zeta)			
1 - Damping		239,585 Hz	0,013 (Zeta)			

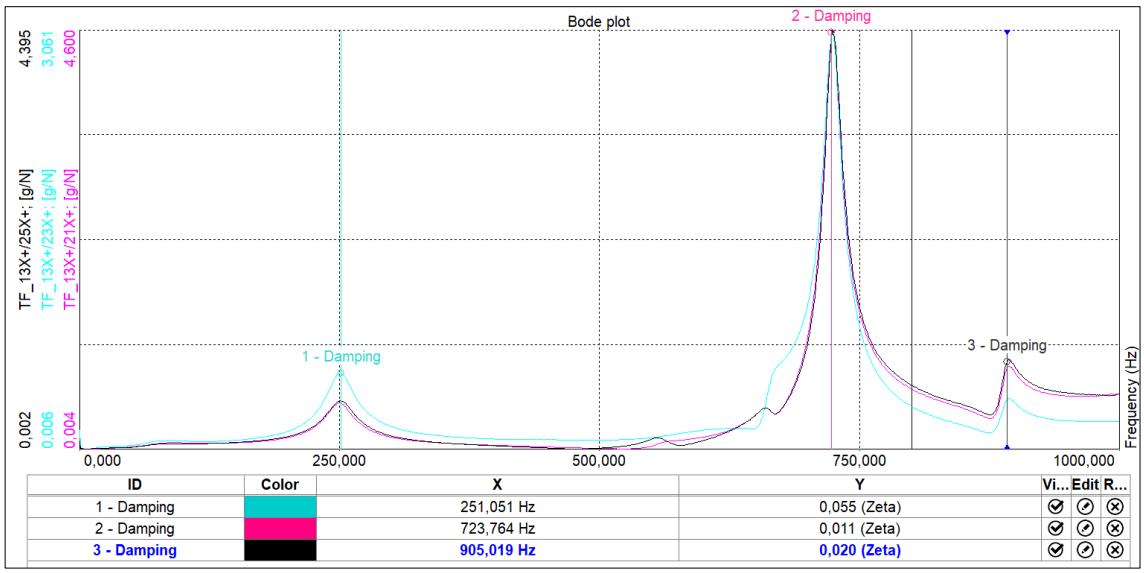
Şekil 4.18. Al plaka elastik iple asma sonucu FRF sonuçları (Çekiç gezdirme metodu)

Bu tarz sorunları ortadan kaldırmak adına diğer bir metod olan sönümleme metodu ile test tekrar edilmiştir. Al plakayı sönümlemek adına kullanılan bir çeşit sünger, test

düzeneğine ilave edilerek (Şekil 4.19) plaka üstünde yapılan modal testler sönümleyici sünger ile gerçekleştirilerek parçanın sönümlenmesi sayesinde grafikteki sinyallerin sızma sorunu çözülerek FRF ve tutarlılık grafikleri analiz edilmiştir.



Şekil 4.19. Sönümleyici test düzeneği



ID	Color	X	Y	Vi...	Edit	R...
1 - Damping		251,051 Hz	0,055 (Zeta)			
2 - Damping		723,764 Hz	0,011 (Zeta)			
3 - Damping		**905,019 Hz**	**0,020 (Zeta)**			

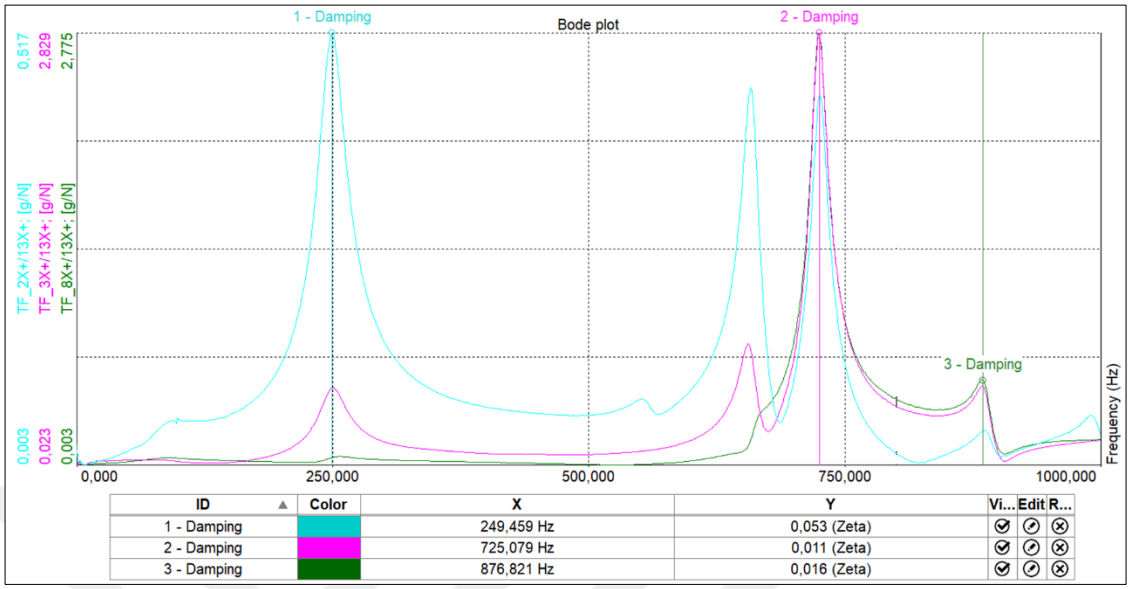
Şekil 4.20. Al plaka sönümleyici ortamda FRF sonuçları (Çekiç gezdirme metodu)

Şekil 4.20'deki test sonrası oluşan eğriler mevcut numunenin mod şekillerinin en iyi gözlemlendiği noktalardır. 1. mod şekli için 21 numaralı, 2. mod şekli için 23 numaralı, 3. mod şekli için 25 numaralı noktalardır. Numune bu noktalarda ilgili frekansta maksimum genliğe ulaşmaktadır.

Al Test Plakası Üzerinde İvmeölçer Gezdirme Test Metodu

Yapılan darbe çekiç test metodundan sonra testin hem fiziksel hemde deneysel modal analiz ile kıyaslamak, doğruluğunu ispatlamak ve aynı zamanda parça üzerinde ivmeölçer gezdirmenin etkisini gözlemlemek adına bu test metoduna başvurulmuştur. Test bir önceki çekiç gezdirmede elde edinilen deneyime göre sadece sönümleyici ortamda gerçekleştirilmiştir. Plaka bir ölçüm noktası üzerinden 6 kez çekiç ile uyarılarak ve her 6 adet uyarıdan sonra ivmeölçer diğer bir noktaya montajlanarak FRF grafikleri gözlemlenmiştir. Yapılan çalışmanın amacı ise çekiçin yakalayamadığı herhangi bir mod şeklini görmek ve yapılan çekiç testinin hem fiziksel hemde sayısal olarak ispatını yapmak amacı ile sonuca varılmıştır. Ayrıca ivmeölçer gezdirmenin plaka çeşidine göre sonuçların değişip değişmediği de yapılacak bir sonraki FR4 malzemesi üzerindeki çalışmalarda anlaşılmıştır.

İvmeölçer gezdirme test metodu çalışmasından sonra çekiç testinin hem işlevsel hemde zamansal olarak ivmeölçer metoduna göre belli başlı plaka parçalarında daha avantajlı olduğu gözlemlenmiştir. Al plaka parçasının rijit olmasından kaynaklı ivmeölçer gezdirmenin plaka üzerinde herhangi bir hataya sebebiyet vermediğide anlaşılmıştır.
İvmeölçer gezdirme test metodu sonucu FRF grafiği ve doğal frekansları Şekil 4.21'de gösterilmiştir.

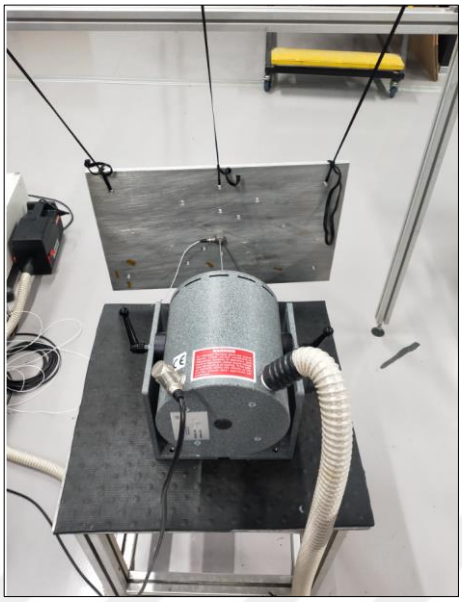


Şekil 4.21. Al plaka FRF sonuçları (İvmeölçer gezdirme metodu)

Şekil 4.21'deki eğriler mevcut numunede ilk 3 modun en iyi açığa çıktığı noktalar olup sırasıyla 2, 3 ve 8 numaralı noktalardır.

Al Test Plakası Üzerinde Modal Sarsıcı Test Metodu

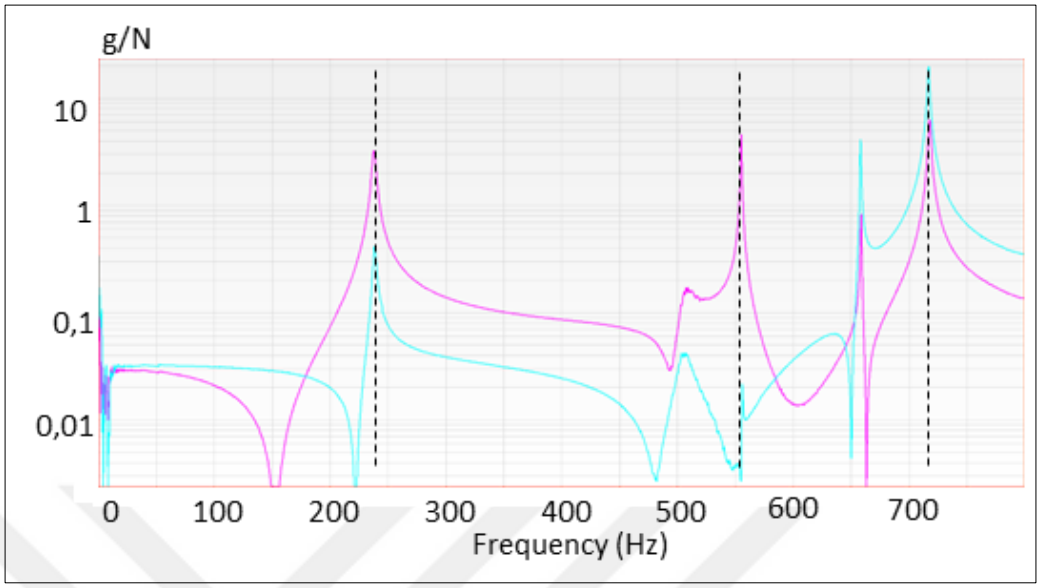
Yapılan çekiç gezdirme ve ivmeölçer gezdirme testlerinden sonra Al test plakası üzerinde modal sarsıcı kullanılarak test işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem ile öncesinde yapılan test metodlarından farklı olarak ayrı bir test kurulumu gerçekleştirilmiştir. Bu test metodu ile yapılan çekiç ve ivmeölçer gezdirme testlerine kıyasla sarsıcının plaka üzerindeki etkisini görmek amaçlanmıştır. Diğer test metodlarından kullanılan DEWESoft® veri toplama sisteminden ziyade sarsıcı, NI sürücü kartı ile eş zamanlı çalıştığı için NI sürücü kartı devreye alınmış ve test datası MEScope® programında oluşturularak test düzeneği kurulmuştur (Şekil 4. 22).



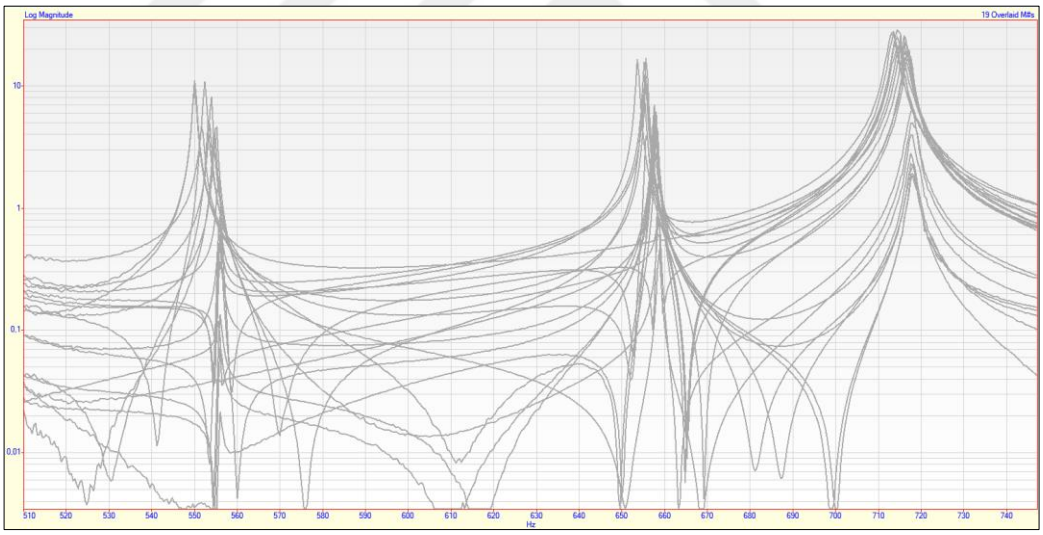
Şekil 4. 22. Modal sarsıcı test sistemi

Modal Sarsıcı test metodunda sarsıcının belli bir noktadan bir ölçüm noktası için doğru bir FRF grafiği almak adına 30 ile 60 kez sarsması önerilmektedir. Bu çalışmada verilen önerilere göre sinüs sinyal türü kullanılarak bir noktadan plaka her ölçüm noktası için 32 kez sarsılmıştır.

Sarsıcı sonucu elde edilen FRF grafiği Şekil 4.23'de gösterilmiştir. Bu sonuç ile birlikte FRF grafiklerinde doğal frekans noktalarında kaymalar tespit edilmiş ve eğri uydurma yötnemi ile belirlenen mod şekilleri çekiç gezdirme veya ivmeöçer gezdirme gibi sağlıklı olmamıştır. FRF grafiğindeki kaymalar Şekil 4.24'de gösterilmiştir. Bu test metodu ile sarsıcının daha karmaşık ve ağır yapılarda sağlıklı sonuç verebileceği anlaşılmıştır.
Hafif ve düz yapılarda örnekte olduğu gibi Al plakasda sarsıcı ucundaki kuvvet sensörü ve sarsıcı çubuğunun (ing. Stinger), parçaya montajı sonrası sarsıcının bir parçası gibi hareket etmesine sebebiyet vermesinden kaynaklı bu tarz plakalarda sarsıcı, çekiç metoduna nazaran sağlıklıklı bir sonuca ulaşamamıştır. Bu tarz parçalar için ise daha düşük kuvvet aralığındaki sarsıcı çeşitleri tercih edilebilir veya bu test metodunda gerçekleştirilen sarsıcı çeşitleri için ise daha karmaşık ve ağır yapılarda test doğruluğu tekrarlanabilir.



Şekil 4.23. Al plaka FRF sonuçları (Sarsıcı test metodu)



Şekil 4.24. Al plaka genel FRF sonuçları (Sarsıcı test metodu)

Al plaka üzerinde gerçekleştirilen deneysel modal test yöntemleri belirtildiği üzere sırasıyla gerçekleşmiştir. Yukarıdaki grafiklerde elde edilen verilere yönelik çizelgelerde deneysel modal test verileri ve sonlu elemanlar verileri arasındaki yüzdesel sapma oranları hesaplanmıştır. Ayrıca son yapılan modal sarsıcı yönteminde bir önceki test metodlarına göre daha benzer bir bükülme,eğmeye yakın bir mod şekli ortaya çıkmıştır fakat bahsedildiği üzere sarsıcının test edilen yapı için tam uygun olmadığı nedeniyle

mod şeklini tam yansıtmadığı düşünülmüştür. Gerçekleştirilen testlerin test ve analiz sonuçları Çizelge 4.3, Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. Al plaka analiz ve çekiç gezdirme test sonuçlarının karşılaştırılması

	Al Plaka Deneysel Modal Analiz Frekansı	Al Plaka Sonlu Elemanlar Modal Analiz Frekansı	Yüzdesel Fark %
1. Mod	251,05	258,25 Hz	2,8
2. Mod	724,966	815,11 Hz	12,4
3. Mod	899,985	1084 Hz	20,4

Çizelge 4.4. Al plaka analiz ve ivmeölçer gezdirme test sonuçlarının karşılaştırılması

	Al Plaka Deneysel Modal Analiz Frekansı	Al Plaka Sonlu Elemanlar Modal Analiz Frekansı	Yüzdesel Fark %
1. Mod	249,459 Hz	258,25 Hz	3,5
2. Mod	725,079 Hz	815,11 Hz	12,4
3. Mod	876,821 Hz	1084 Hz	23,6

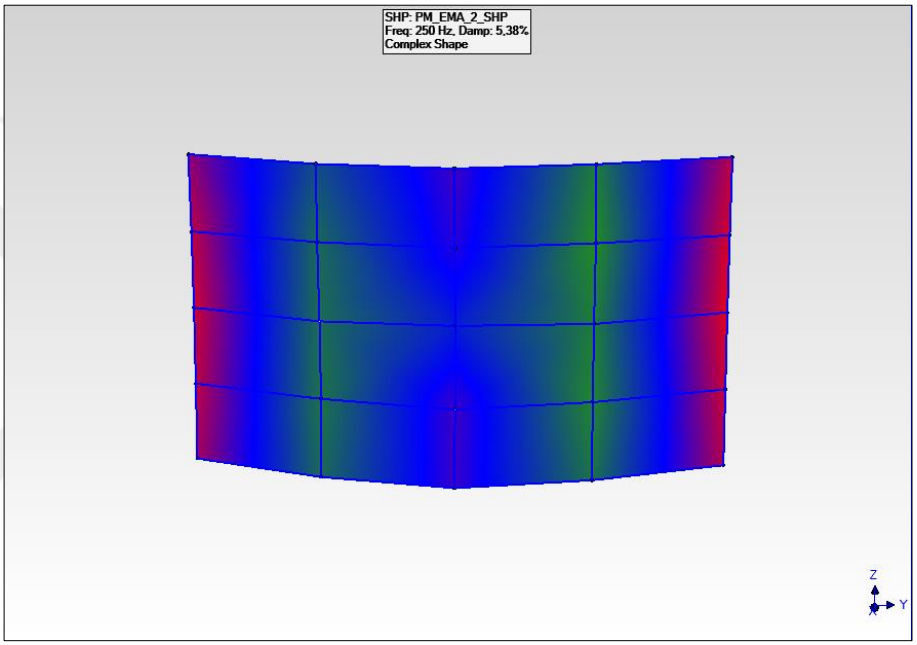
Çizelge 4.5. Al plaka analiz ve modal sarsıcı test sonuçlarının karşılaştırılması

	Al Plaka Deneysel Modal Analiz Frekansı	Al Plaka Sonlu Elemanlar Modal Analiz Frekansı	Yüzdesel Fark %
1. Mod Şekli	237 Hz	258,25 Hz	8,9
2. Mod Şekli	550 Hz	606 Hz	10,18
3. Mod Şekli	714 Hz	815 Hz	14,14

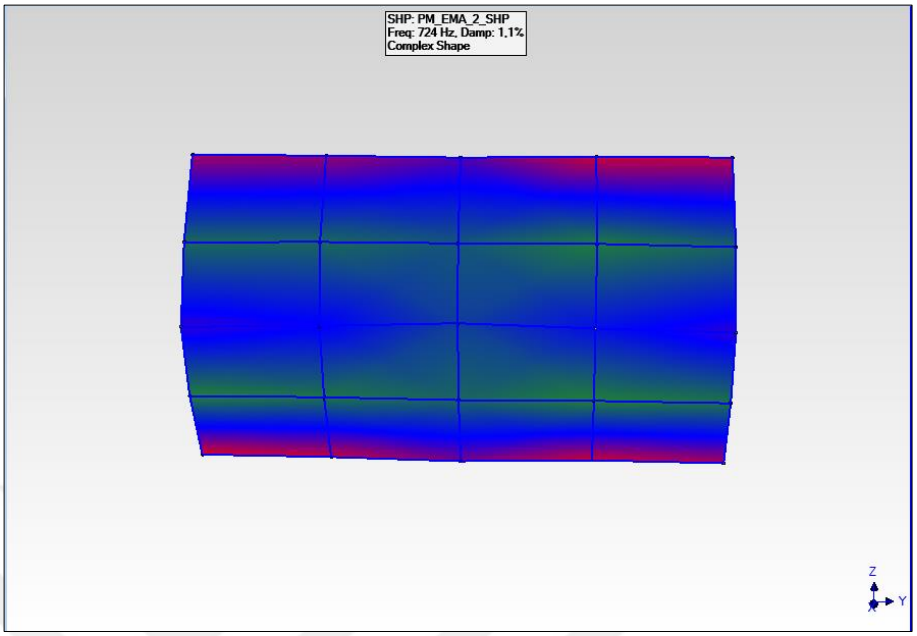
Yukarıda da belirtilen Çizelge 4.3, 4.4, ve 4.5 tablolarına bakıldığında da mod şekilleri ve FRF grafiklerinde incelenen veriler doğal frekans üzerinden de incelendiğinde yapının sonlu elemanlar modal analiz sonuçları ile arasında en az yüzdesel sapma payı bulunan test metodunun darbe çekiç gezdirme test metodu olduğu anlaşılmaktadır. İvmeölçer gezdirmenin yapı üzerinde kütle dengesizliğinden kaynaklı ve sarsıcının da düz ve bir nebze hafif yapılarda etkisinin sonuçları çizelgeler ve MAC hesapları karşılaştırıldığında da anlaşılmaktadır ve sarsıcı testinin daha ağır ve karmaşık yapılarda efektif sonuç vereceği düşünülmektedir.

Al Plaka Deneysel Modal Analiz Gösterimleri

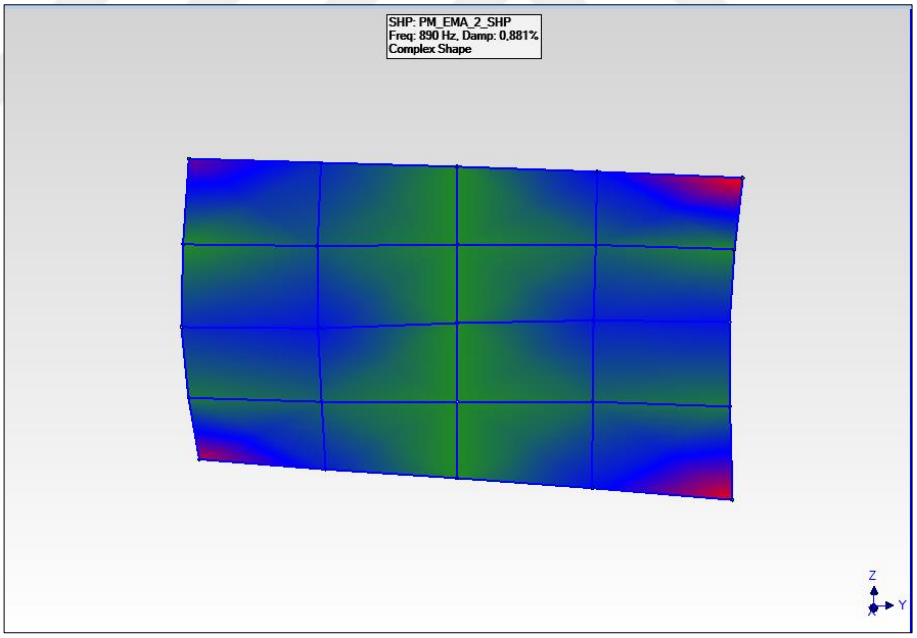
Al test plakası üzerinde gerçekleştirilen farklı parametrelerdeki deneysel modal testlerde sonuçlara bakıldığında yüzdesel olarak en yakın sonuca ulaşan darbe çekiç gezdirme test metodunun deneysel modal analiz gösterimleri Şekil 4.25'den Şekil 4.27'ye kadar gösterilmiştir.



Şekil 4.25. Al test plakası 1. mod



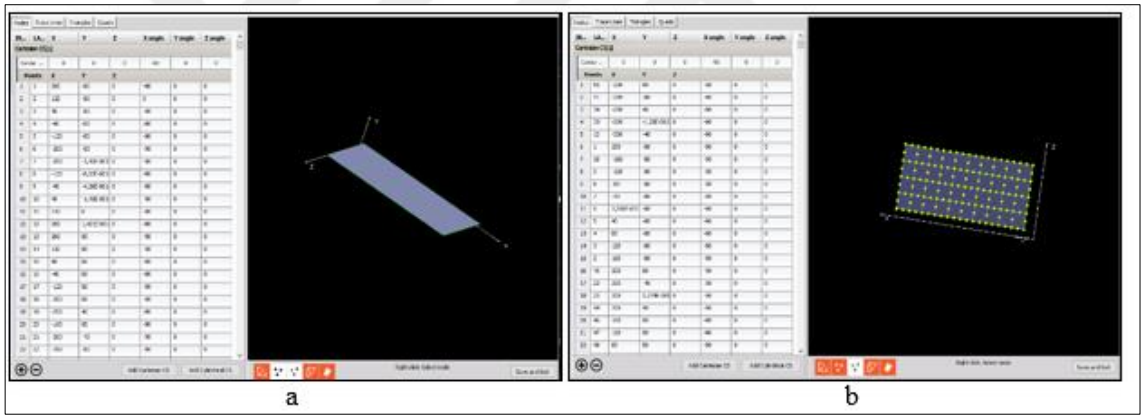
Şekil 4.26. Al test plakası 2. Mod



Şekil 4.27. Al test plakası 3 .mod

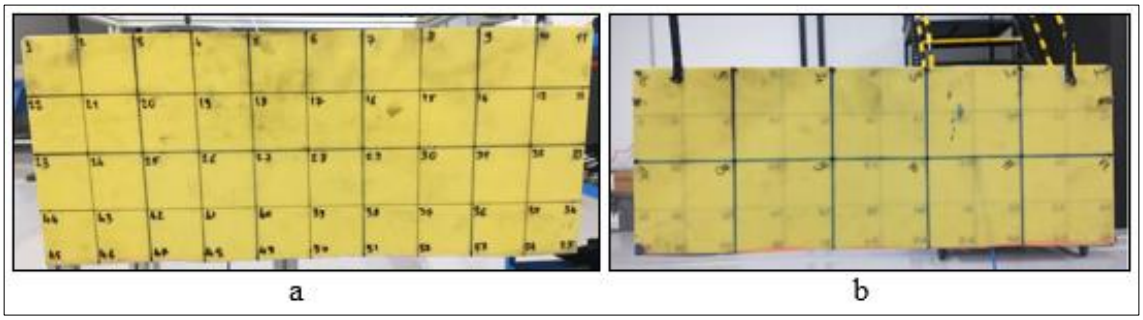
4.2.2. FR4 PCB Plaka

Yapılan ilk çalışmadan sonra daha hafif ve ince bir yapı olan FR4 PCB plakası tercih edilmiş ve deneysel modal test yöntemleri bir bir plaka üzerinde denenerek incelemeler yapılmıştır. Plakanın sonlu elemanlar modal analiz çalışmasından sonra mod şekilleri baz alınarak ölçüm noktaları belirlenmiştir. Yapılan bu çalışmada plaka üzerinde çok noktalı ve az noktalı olmak üzere testler gerçekleştirilmiştir. Plaka üzerindeki mod şekillerinin farklı test yöntemleriyle birlikte model yapısına göre sergilediği davranışların incelenmesi amaçlanmıştır. Test aşamasına geçmeden önce FR4 PCB plakasının geometrisi eksen koordinatlarına göre ölçüm noktalarıyla birlikte DEWESoft® programında oluşturulmuştur (Şekil 4.28).



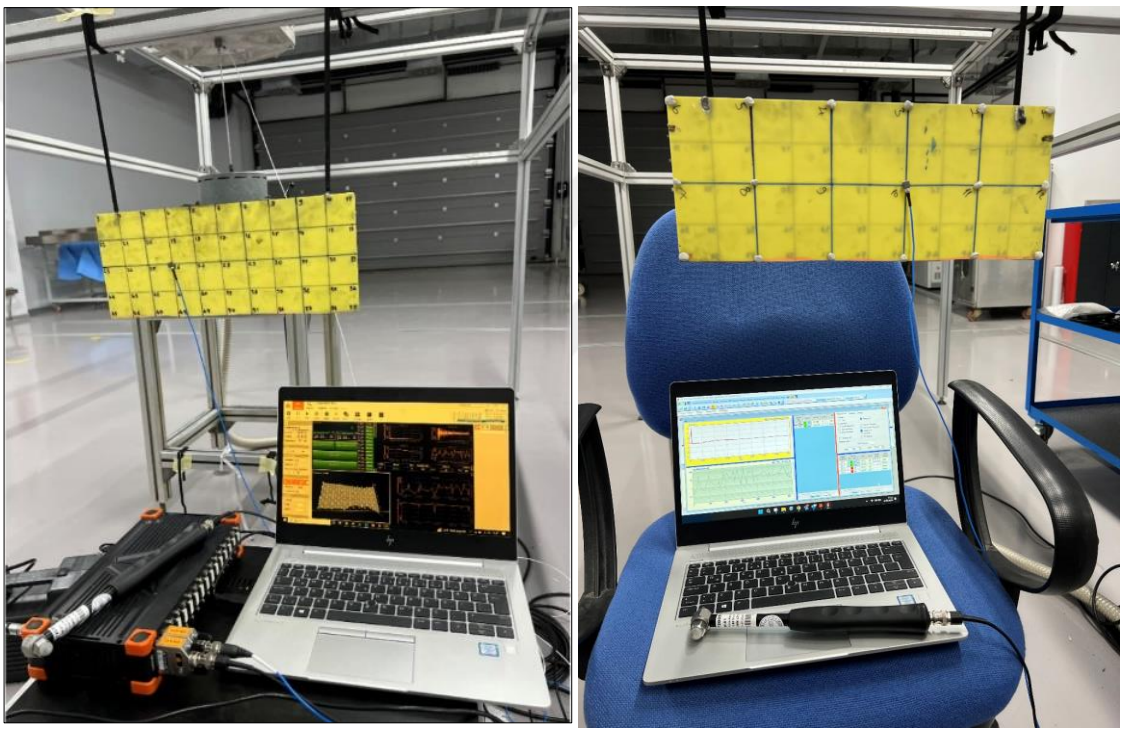
Şekil 4.28. FR4 PCB plaka geometrisi

Test geometrisi ve test programı hazır olduktan sonra testin başlatılabilmesi için test düzeneği hazır hale getirilmiştir. Test serbest sınır koşullarını sağlamak adına elastik bir iple test sehpasına asılarak denemeler yapılmış ve FRF grafiğinde herhangi bir yanlışlığa sebebiyet verecek bir problem ile karşılaşmayınca deneysel modal test bu düzenek ile gerçekleştirilmiştir.



a b

Şekil 4.29. (a) 55 ölçüm noktalı FR4 plaka, (b) 18 ölçüm noktalı FR4 plaka

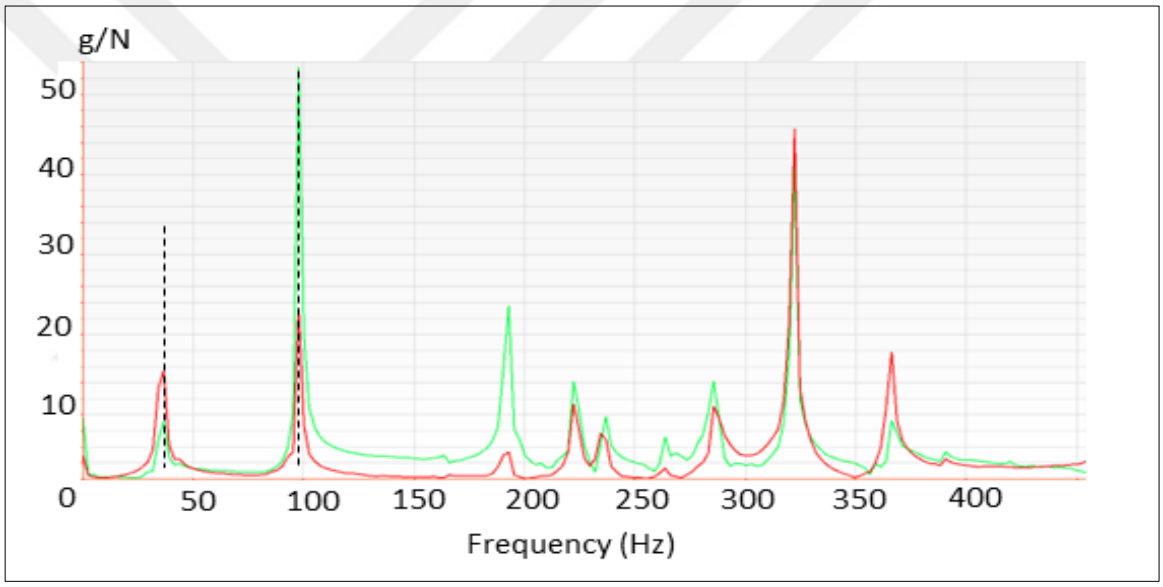


a b

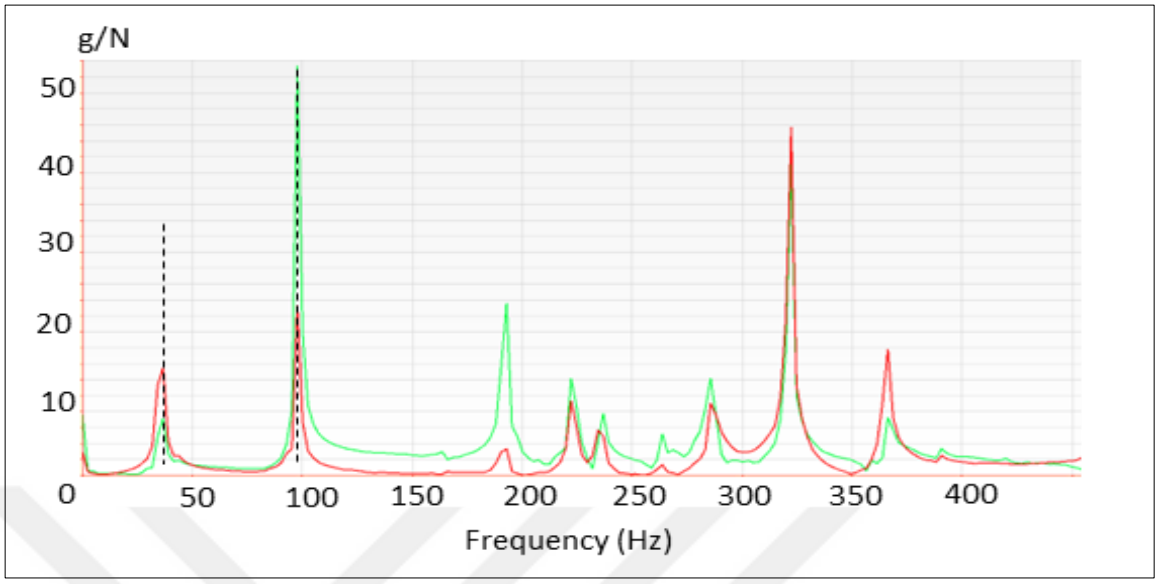
Şekil 4.30. FR4 plaka test düzeneği
(a) FR4 test düzeneği kauçuk montajlanmadan
(b) FR4 test düzeneği her noktaya kauçuk montajlanarak

Şekil 4.30'da belirtilen test düzeneği ile öncelikli olarak 18 nokta üzerinden darbe çekiç gezdirme metodu uygulanmıştır. Daha sonrasında plaka üzerinde belirlenen 55 nokta üzerinden de çekiç testi gerçekleştirilerek iki sonuç arasında bir fark olmadığı saptanmıştır. Yapılan bu doğrulama sonrası nokta sayısının artması plaka üzerinde herhangi bir mod şeklinin belirgin olmasını sağlamamıştır. Bu farkın anlaşılması üzerine ivmeölçer gezdirme test yöntemi ile devam edilmiştir. İvmeölçer gezdirme test

metodunun Al test plakasındaki etkisi ilk iki mod için sağlıklı bir sonuca ulaşmıştı. Yapılacak bu çalışmada ise ivmeölçer gezdirme testinin hafif ve ince yapılarda sergilediği etkiyi görmek amaçlanmıştır. Elde edilen ilk ivmeölçer değerlerinden sonra ivmeölçer gezdirme testinin sonuçlarına yönelik kütle dengesini sağlaması ve ağırlık merkezini korumak amaçlı plaka üzerinde her noktaya kauçuk montajlayarak test tekrar edilmiştir. FR4 test plakası üzerinden yapılan ivmeölçer gezdirme testinin FRF verileri Şekil 4.31, Şekil 4.32 ve Şekil 4.33'de gösterilmiştir. Test ve analiz sonuçlarından elde edilen frekans değerleri Çizelge 4.6, Çizelge 4.7ve Çizelge 4.8'te gösterilmiştir.



Şekil 4.31. FR4 plaka FRF sonuçları (Çekiç gezdirme metodu)



Şekil 4.32. FR4 plaka FRF sonuçları (İvmeölçer gezdirme metodu)

Çizelge 4.6. FR4 plaka analiz ve çekiç gezdirme test sonuçlarının karşılaştırılması

	FR4 PCB Plaka Deneysel Modal Analiz Frekansı (18 Nokta)	FR4 PCB Plaka Deneysel Modal Analiz Frekansı (55 Nokta)	FR4 PCB Plaka Sonlu Elemanlar Modal Analiz Frekansı	Yüzdesel Fark %
1. Mod	35,5	35,5	34.5	2,81
2. Mod	98,3	98,4	96.4	2,03
3. Mod	192	192	188	2,08
4. Mod	223	222	235	5,53

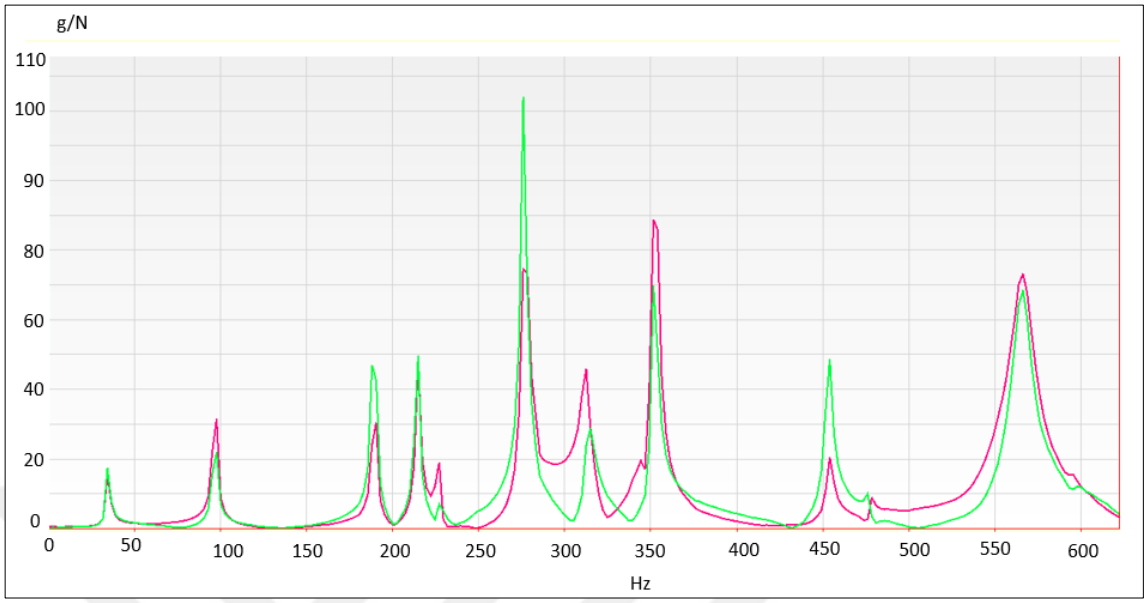
Çizelge 4.7. FR4 plaka analiz ve ivmeölçer gezdirme test sonuçlarının karşılaştırılması

	FR4 PCB Plaka Deneysel Modal Analiz Frekansı	FR4 PCB Plaka Sonlu Elemanlar Modal Analiz Frekansı	Yüzdesel Fark %
1. Mod	35,4	34.5	2,54
2. Mod	97.6	96.4	1,22
3. Mod	190	188	1,05
4. Mod	220	235	6,81

Çizelge 4.6 incelediğinde yapı üzerinde gerçekleştirilen çekiç testi için 18 nokta ve 55 noktalı plaka arasında bir fark olmadığı saptanmış ve zaman kaybedilmemesi adına 18 noktalı FR4 plakası üzerinde testler gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.7 incelendiğinde gerçekleştirilen testler arasında büyük bir fark olmadığı gözlemlenmiştir. Çekiç gezdirme ve İvmeölçer gezdirme test metodlar sayısal modal analizler karşılaştırıldığında yüksek frekanslarda yüzdesel sapmanın arttığı ve bazı modlarda ivmeölçer gezdirme testindeki sapmanın daha az olduğu anlaşılmıştır fakat ivmeölçer gezdirmenin yapı üzerinde ağırlık merkezini etkilemesinden kaynaklı her ne kadar frekanslar yakın olsada istenilen mod şekillerini yakalayamadığı anlaşılmıştır. Sonuçlara yönelik test her noktaya kauçuk montajlayarak tekrar edilmiştir. Böylece her nokta üzerinde ivmeölçer ağırlığına eşit olan kauçuklar test esnasında yapı üzerindeki kütle dengesini korumuştur. Elde edilen FRF verileri Şekil 4.33'de gösterilmiştir. Verilerin sonuçları incelendiğinde test metodunun sonuçları geliştirdiği gözlemlenmiş ve elde edilen verilere sonuçlar kısmında değinilmiştir.

Çizelge 4.8. FR4 plaka analiz ve ivmeölçer gezdirme test (kauçuk ile birlikte) sonuçlarının karşılaştırılması

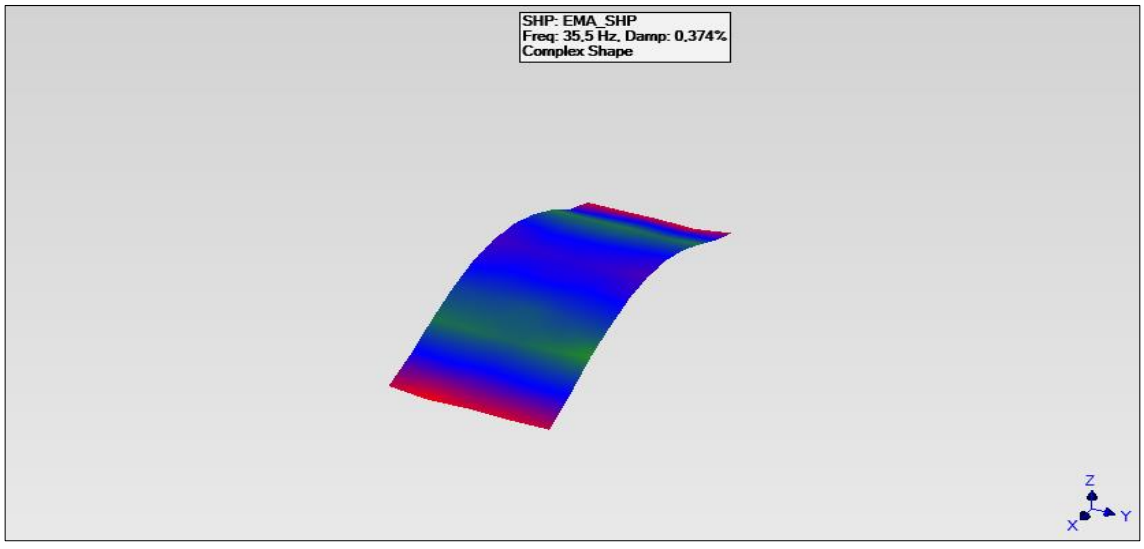
	FR4 PCB Plaka Deneysel Modal Analiz Frekansı	FR4 PCB Plaka Sonlu Elemanlar Modal Analiz Frekansı	Yüzdesel Fark %
1. Mod	34,7	34.5	0,57
2. Mod	96,1	96.4	0,31
3. Mod	188	188	-
4. Mod	213	235	9,36



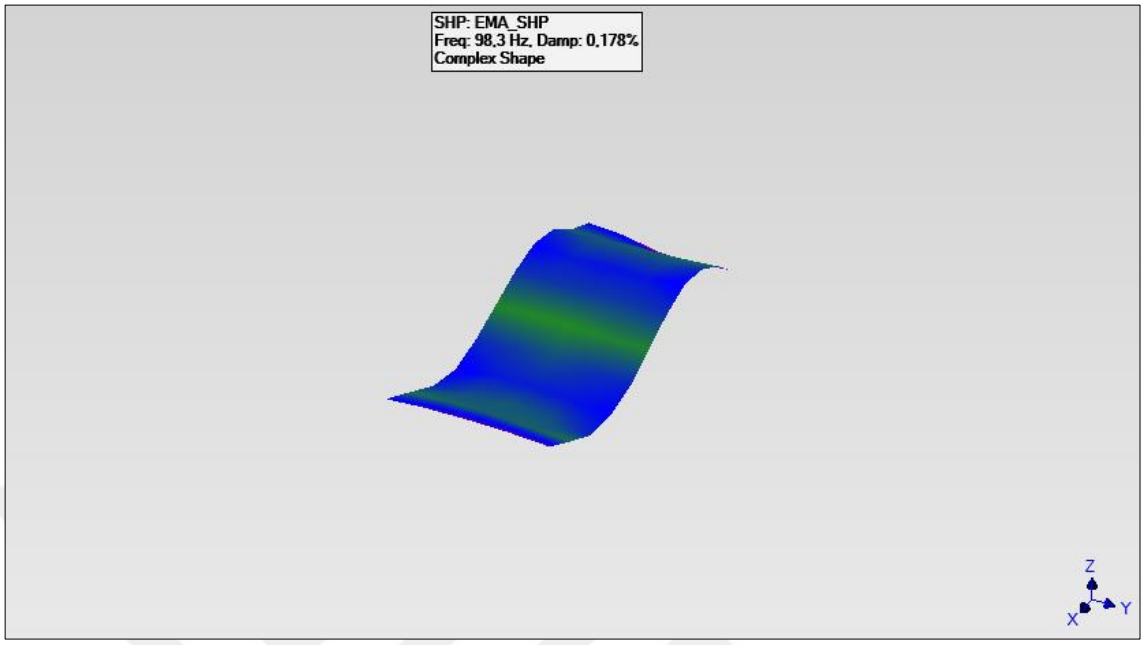
Şekil 4.33. FR4 plaka FRF sonuçları (İvmeölçer gezdirme metodu, kauçuk ile birlikte)

FR4 PCB Plaka Deneysel Modal Analiz Gösterimleri

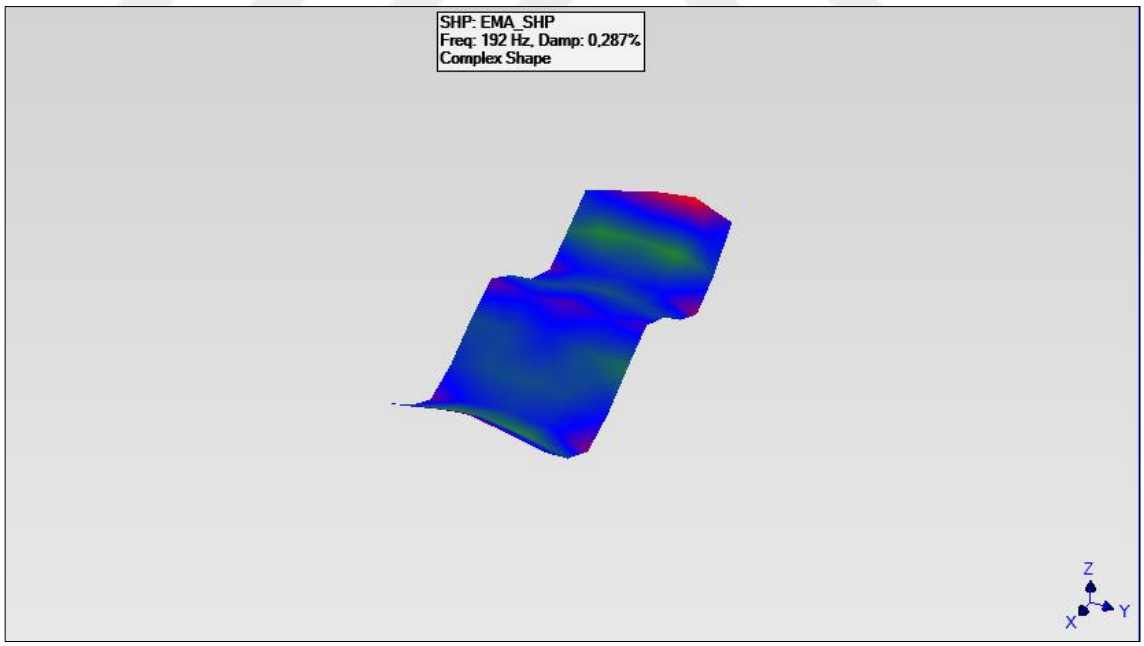
FR4 PCB plaka üzerinde gerçekleştirilen deneysel modal analiz testlerinde sonlu elemanlar modal analiz sonuçları ile birlikte kıyaslandığında en sağlıklı yöntem olan darbe çekiç gezdirme test metoduna ait analiz gösterimleri Şekil 4.34'den Şekil 4.37'ye kadar gösterilmiştir.



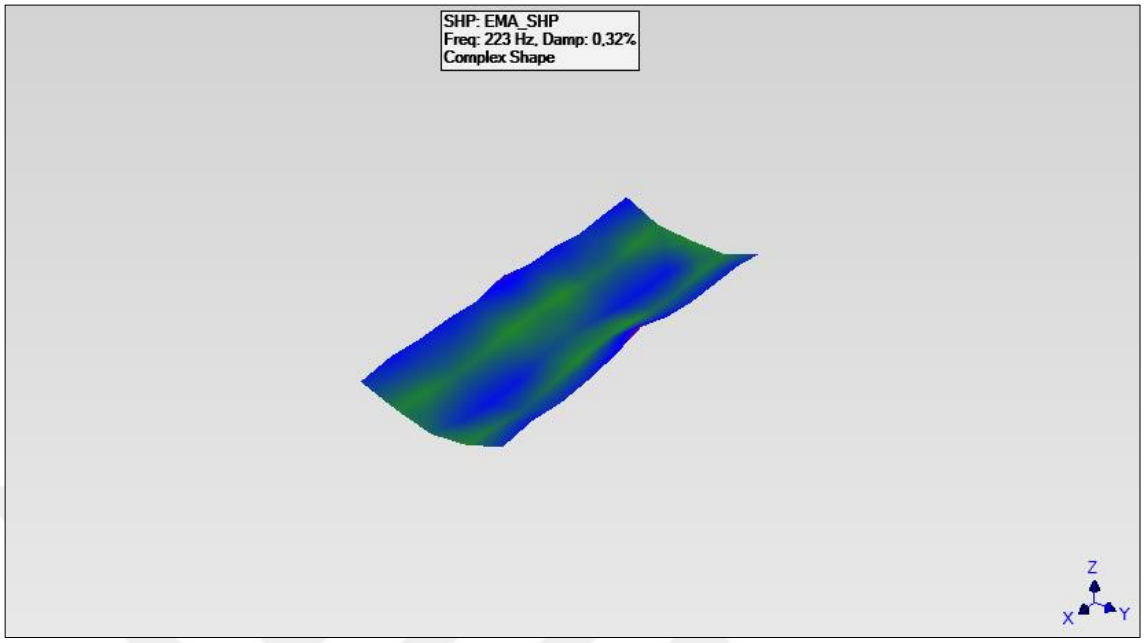
Şekil 4.34. FR4 plaka 1. mod



Şekil 4.35. FR4 plaka 2. Mod



Şekil 4.36. FR4 plaka 3. mod



Şekil 4.37. FR4 plaka 4. mod

4.3. MGM Matrisinin MEScope® yazılımı kullanılarak hesaplanması

MGM hesabı için MEScope® yazılımndan yardım alınmıştır. Al test plakası ve FR4 plakası için gerçekleştirilen matris hesaplarında genel olarak yapılan test plakasının noktalarını içeren ağ yağısı ve test esnasında alınan FRF sonuçları entegre edilmiştir. Daha sonra noktalar FRF grafikleri ile eşleştirilerek eğriler elde edilmiş ve mod şekilleri hesaplamalar sonucunda çıkarılmıştır. Deneysel test işleminin MEScope® yazılımına aktarımı bittikten sonra sonlu elemanlar modelinde kullanılan ağ yapısı ve mod şekilleri de bu yazılıma aktarılarak, mod şekilleri yazılım içinde sonlu elemanlar modelinde oluşturulan noktalar ile eşleştirilmiştir.

Her iki yapı için de işlem bittikten sonra deneysel modal analiz ve sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen mod şekilleri animasyon haline getirilerek incelenmiş ve karşılaştırılmıştır.

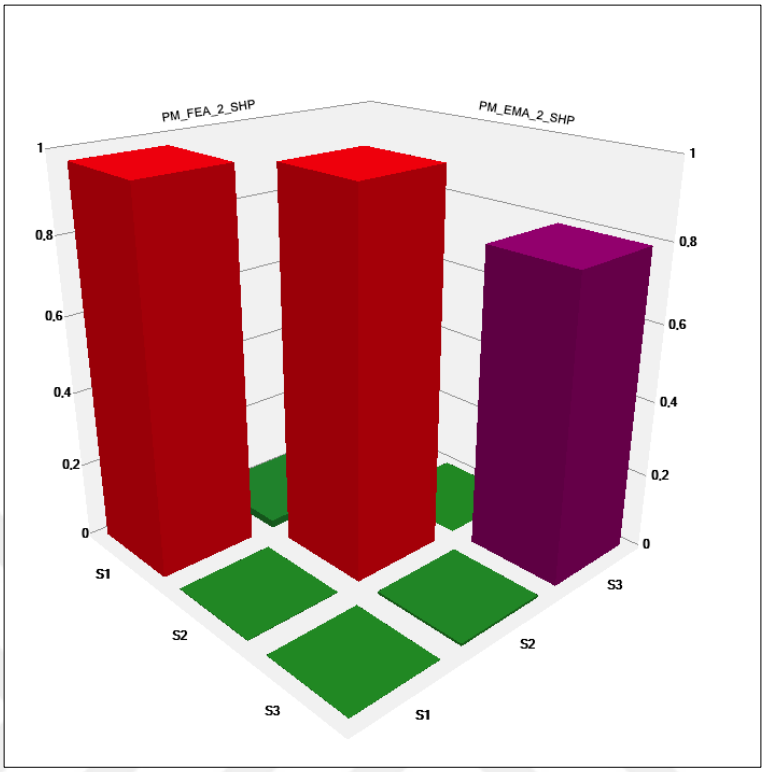
MGM matrisinin hesabı için ise her iki test içinde oluşturulan ağ yapıları yazılım içinde en yakın noktalardan birbirine eşleştirilmiştir (İng. Point Matching).

Birbirine en yakın noktalar eşlendikten sonra mod şekilleri frekansalar ile birlikte karşılaştırılmış ve MGM hesaplanmıştır.

Karşılaştırma ile birlikte her iki test analizi için doğrulamalar yapılmıştır.

4.3.1. Al Plaka İçin MGM Matrisinin Hesaplanması

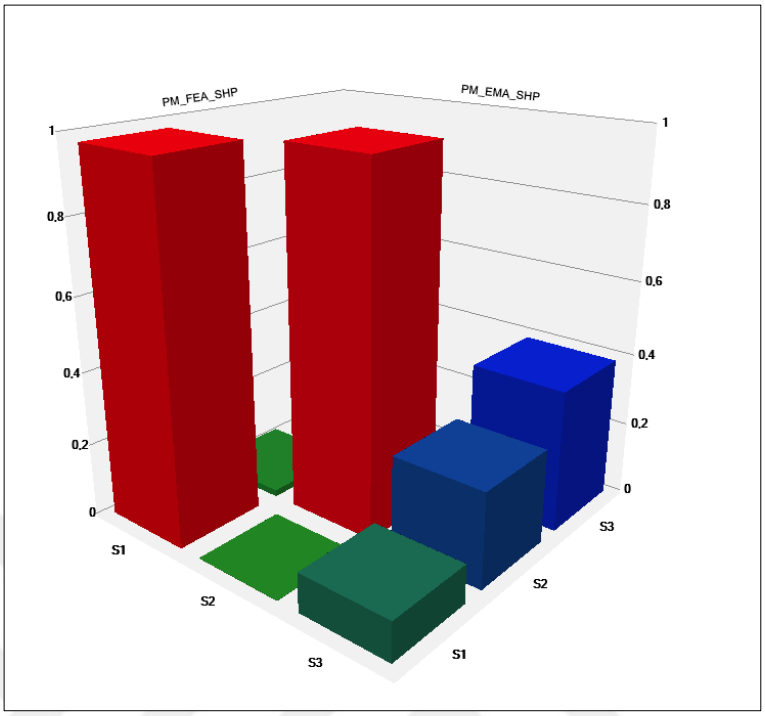
Yukarıda yapılan açıklamalar Al plaka üzerinde hem deneysel hemde sayısal metodlar sonucu ortaya çıkan veriler için birer birer hesaplanmış ve MGM matrisi oluşturularak doğrulama yapılmıştır. Al plaka üzerinde yapılan çekiç gezdirme, ivmeölçer gezdirme ve modal sarsısı test metodları sırasıyla Şekil 4.38 , Şekil 4.40 ve Şekil 4.42'de sonlu elemanlar modal analizleriyle kıyaslanmıştır. Şekil 4.39, Şekil 4.41 ve Şekil 4.42'de test ve analiz sonuçlarının sayısal verileri benzerlik oranları belirtilmiştir.



Şekil 4.38. Al test plakası MGM matrisi (Çekiç gezdirme metodu)

					Shape 1	Shape 2	Shape 3
	Label	PM_FEA_2_SHP					
	PM_EMA_2_SHP	Frequency(or Time)			258	815	1,08E+03
			Damping		0	0	0
				Damping (%)	0	0	0
Shape 1	Global-Poly	250	13,5	5,38	0,974	0,0208	5,68E-05
Shape 2	Global-Poly	724	7,99	1,1	0,00189	0,976	0,000237
Shape 3	Global-Poly	890	7,84	0,881	0,000815	0,00623	0,791

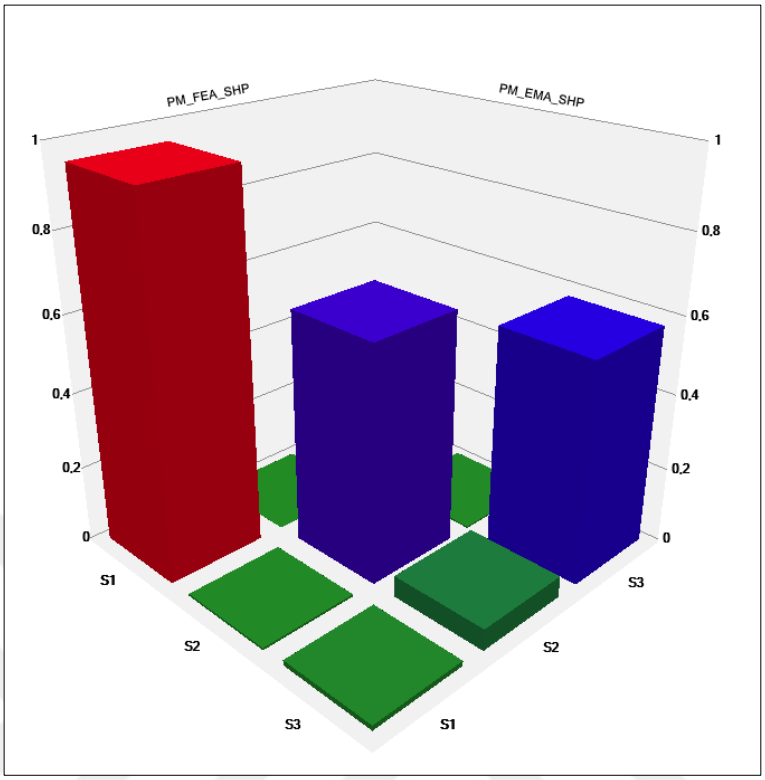
Şekil 4.39. Al test plakası MGM tablosu (Çekiç gezdirme metodu)



Şekil 4.40. Al test plakası MGM matrisi (İvmeölçer gezdirme metodu)

					Shape 1	Shape 2	Shape 3
	Label	PM_FEA_SHP					
	PM_EMA_SHP	Frequency(or Time)			258	815	1,08E+03
			Damping		0	0	0
				Damping (%)	0	0	0
Shape 1	Global-Poly	248	13	5,21	0,975	0,0181	7,58E-05
Shape 2	Global-Poly	722	7,9	1,09	0,00157	0,972	0,00086
Shape 3	Global-Poly	877	7,87	0,897	0,106	0,258	0,386

Şekil 4.41. Al test plakası MGM tablosu (İvmeölçer gezdirme metodu)



Şekil 4.42. Al test plakası MGM matrisi (Modal sarsıcı test metodu)

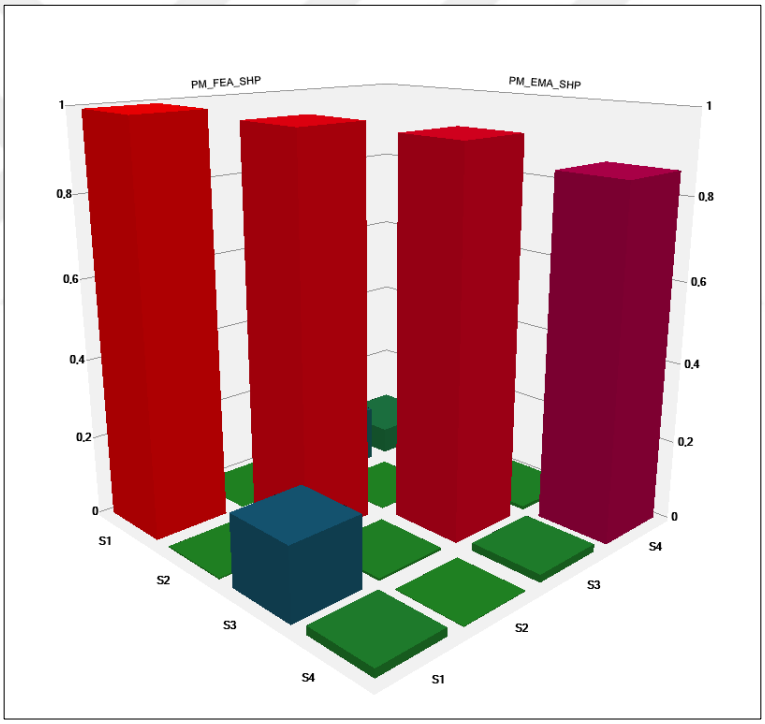
					Shape 1	Shape 2	Shape 3
	Label	PM_FEA_SHP					
	PM_EMA_SHP	Frequency(or Time)			258	606	815
			Damping		0	0	0
				Damping (%)	0	0	0
Shape 1	Global-Poly	237	1,2	0,507	0,954	0,000172	0,0346
Shape 2	Global-Poly	550	0,389	0,0708	0,00573	0,616	0,00441
Shape 3	Global-Poly	714	0,969	0,136	0,0134	0,0569	0,577

Şekil 4.43. Al test plakası MGM tablosu (Modal sarsıcı test metodu)

4.3.2. FR4 Plakası İçin MGM Matrisinin Hesaplanması

Deneysel modal test sonrası alınan veriler incelenmiş ve matris hesabı için MEScope® yazılımına test geometrisi ve verileri aktarılmıştır. FR4 plakanın eğri uydurma adımları

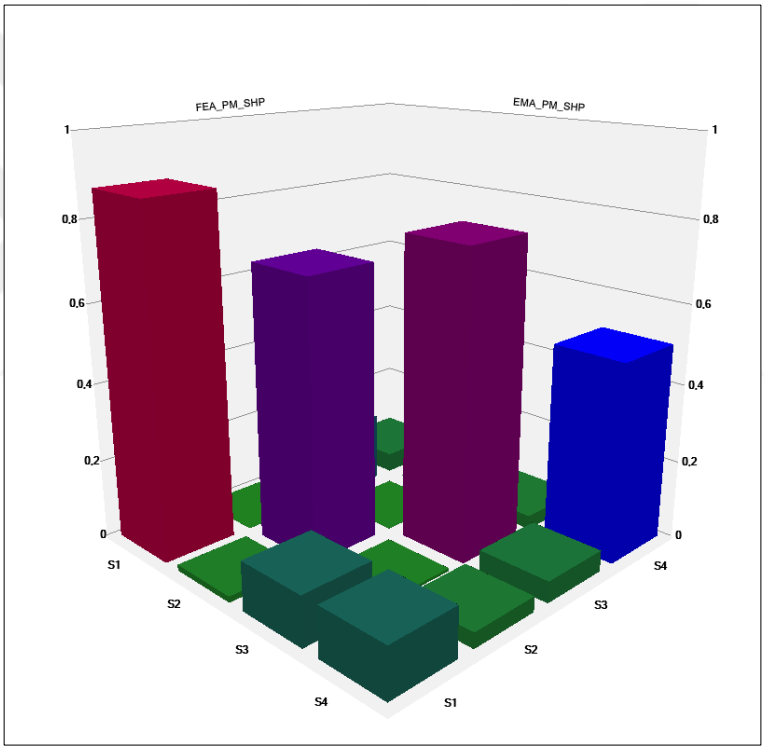
yapılmış ve mod şekilleri oluşturulmuştur. Deneysel modal testin mod şekilleri oluşturulduktan ve veriler geometri ile eşleştirildikten sonra sonlu elemanlar modal analiz geometrisi verileri aktarılarak deneysel modal test ile sırasıyla birbirine en yakın noktalar eşlenerek MGM matrisi hesaplanmıştır. Yapılan testin sonlu elemanlar modal analizi ile karşılaştırılması öncelikle mod şekilleri ve sonrasında frekans değerleri baz alınarak yapılmıştır. Elde edilen benzerlik oranları Şekil 4.44, Şekil 4.46 ve
Şekil 4.48'de gösterilmiştir. Test sonrası elde edilen değerlerin analiz sonuçları ile birlikte karşılaştırılması sonucu sayısal verileri ve benzerlik oranları Şekil 4.45, Şekil 4.46 ve Şekil 4.49'da gösterilmiştir.



Şekil 4.44. FR4 plaka MGM matrisi (Çekiç gezdirme metodu)

					Shape 1	Shape 2	Shape 3	Shape 4
	Label	PM_FEA_SHP						
	PM_EMA_SHP	Frequency(or Time)			34,5	96,4	188	235
			Damping		0	0	0	0
				Damping (%)	0	0	0	0
Shape 1	Global-Poly	35,5	0,14	0,395	0,994	3,68E-05	0,143	0,0669
Shape 2	Global-Poly	98,4	0,179	0,182	0,00332	0,969	0,00167	2,4E-05
Shape 3	Global-Poly	192	0,543	0,282	0,181	0,00614	0,942	0,00858
Shape 4	Global-Poly	223	0,989	0,443	0,0219	0,00171	0,0195	0,86

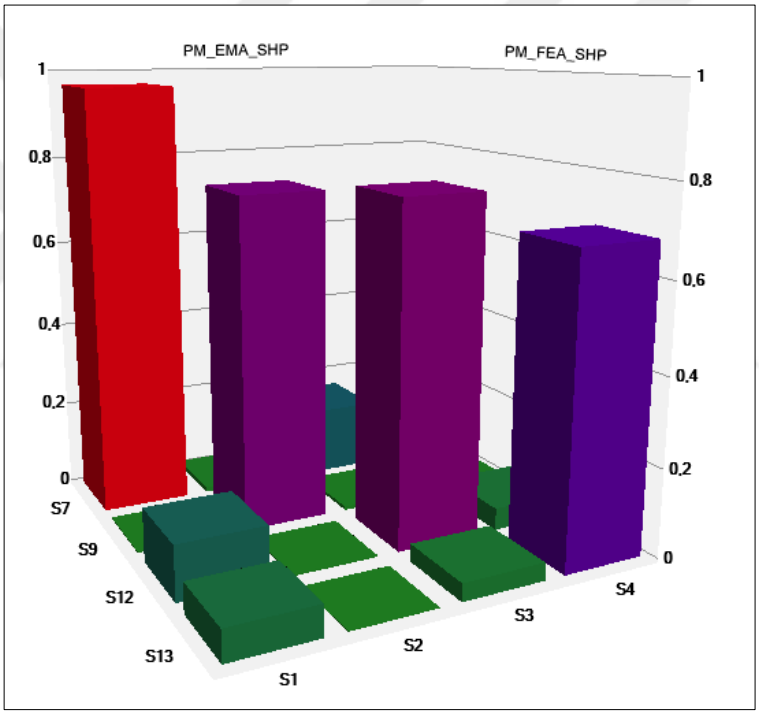
Şekil 4.45. FR4 plaka MGM tablosu (Çekiç gezdirme metodu)



Şekil 4.46. FR4 plaka MGM matrisi (İvmeölçer gezdirme metodu)

					Shape 1	Shape 2	Shape 3	Shape 4
	Label	FEA_PM_SHP						
	EMA_PM_SHP	Frequency(or Time)			34,5	96,4	188	235
			Damping		0	0	0	0
				Damping (%)	0	0	0	0
Shape 1	Global-Poly	35,4	0,545	1,54	0,872	0,000901	0,179	0,0506
Shape 2	Global-Poly	97,6	0,249	0,255	0,0155	0,702	0,00124	0,00214
Shape 3	Global-Poly	190	0,504	0,266	0,125	0,00743	0,77	0,0351
Shape 4	Global-Poly	220	0,728	0,33	0,126	0,0395	0,0546	0,503

Şekil 4.47. FR4 plaka MGM tablosu (İvmeölçer gezdirme metodu)



Şekil 4.48. FR4 plaka MGM matrisi (İvmeölçer gezdirme metodu, kauçuk ile birlikte)

					Shape 1	Shape 2	Shape 3	Shape 4
	Label	PM_EMA_SHP			Global-Poly	Global-Poly	Global-Poly	Global-Poly
	PM_FEA_SHP	Frequency(or Time)			34,7	96,1	188	213
			Damping		0,167	0,0151	0,461	0,641
				Damping (%)	0,481	0,0157	0,245	0,3
Shape 7		34,5	0	0	0,968	0,0102	0,158	0,0482
Shape 9		96,4	0	0	0,00243	0,752	0,00738	0,00599
Shape 12		188	0	0	0,122	0,00281	0,765	0,0502
Shape 13		235	0	0	0,0693	0,00144	0,0402	0,684

Şekil 4.49. FR4 plaka MGM tablosu (İvmeölçer gezdirme metodu kauçuk ile birlikte)

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada hemen hemen her sektörde kullanılan FR4 ve Alüminyum malzemelerine sahip plakalar üzerinde farklı parametrelere başvurularak deneysel modal test çalışmaları yapılmıştır. Teorik çalışmalar sonrası ihtiyaç duyulan fiziksel çalışmalar yani modal testler sonlu elemanlar modal analiz sonuçlarıyla kıyaslanmış ve incelenmiştir.

Testlere öncelikle Al plakası üzerinden başlanarak geometriler oluşturulmuş ve test düzenekleri ve programları hazır hale getirilmiştir. Al plaka üzerinde sonlu elemanlar modal analizi gerçekleştirildikten sonra yapının tahrik olduğu bölgeler incelenerek yapı üzerinde 25 ölçüm noktası belirlenmiştir. Testlere öncelikle serbest sınır koşullarını sağlamak adına elastik ipler ile yapı asılarak çekiç gezdirme metodu ile başlanmıştır. Fakat plaka hem Al olmasından kaynaklı hem de elastik iplerle asılarak yapılan plakalara göre ağır olmasından dolayı test esnasında bir sönümlenememe sorunu ve FRF grafiklerinde sızdırmazlık sorunu ile karşılaşılmıştır. Bu sorunu önlemek adına test sönümleyici sünger ile desteklenerek gerçekleştirilmiş ve plakanın sönümlenmesi sağlanmıştır. Al plaka sönümlenmesinden sonra FRF grafikleri incelenerek sızdırmazlık sorunun da ortadan kalktığı öngörülmüştür. Böylece ivmeölçer gezdirme testi de sönümleyici ortamda gerçekleştirilmiştir. Yapı üzerinde her 2 test metodu da gerçekleştirildikten sonra modal sarsıcıların bu tarz yapılar üzerinde etkisini görmek amacı ile plaka, sarsıcı test düzeneği ile tekrar teste tabi tutulmuştur. Gerçekleştirilen testler arasında sayısal modal analize en yakın sonuç veren test metodunun çekiç gezdirme test metodu olduğu anlaşılmıştır. Çekiz gezdirme test metodunun teorikteki bilgileri okunduğunda bu bilgiler fiziksel ortamda da doğrulanmıştır. İvmeölçer gezdirme test metodu ise yapı üzerinde bir kütle dengesizliğine sebebiyet vererek yüksek frekanslarda mod şekillerinin gerçeğe yakınlığını kaybettiği anlaşılmıştır. Modal sarsıcı test metodunda ise karmaşık ve daha ağır yapılar özelinde bu test metodunun daha uygun olduğu anlaşılmıştır. Al plaka üzerinde gerçekleştirilen modal sarsıcı testi diğer test metodlarından daha belirgin bükülmeye yakın bir mod şekli ortaya çıkarmış fakat numerik sonuçlar ile kıyaslandığında açık bir fark olduğu anlaşılmıştır dolayısıyla yapılan MAC hesaplarında mod şekilleri birbiri ile örtüşmemiştir. Al plakası düz bir yapı ve

sarsıcının kuvvet aralığına göre hafif bir yapıda kaldığından dolayı modal sarsıcı testinin sonuçları, çekiç gezdirme testi kadar etkili olmadığı düşünülmektedir. Modal sarsıcı testi esnasında kuvvet sensörü ucu plakaya montajlandığında plakanın düz ve sarsıcı test metodlarında kullanılan plakalara göre hafif olmasından kaynaklı sarsıcının plakayı kendi parçası olarak algılamasına sebep olmuştur. Çekiç gezdirme test metodunun bu parçalar üzerinde rahatlıkla uygulanabileceği anlaşılmıştır.

İlk test çalışmaları bittikten sonra FR4 plakasının test çalışmalarına geçilmiştir. Plaka 18 ölçüm noktalı olarak öncelikle çekiç gezdirme testine tabi tutulmuştur daha sonrasında plaka üzerinde nokta sayısının etkisini görmek için 55 nokta üzerinden de bir çekiç testi gerçekleştirilmiştir ve herhangi bir farklılık gözlemlenmemiştir. Bu kıyaslamadan sonra FR4 plakası üzerinde ivmeölçer gezdirme test çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bir önceki test çalışması bizlere FR4 plakası için modal sarsıcı test metodunun çok etkili olmayacağını göstermiş ve dolayısıyla yapı üzerinde ivmeölçer gezdirme test metodunun davranışları incelenmiştir. Test sonrası anlaşıldığı üzere her ölçüm noktasi için değiştirilen ivmeölçer özellikle hafif ve ince yapılarda, yapıyı ve ağırlık merkezini etkilemektedir. Elde edilen sonuçlara göre ivmeölçer ağırlığında kauçuklar plaka üzerindeki her noktaya konumlandırılarak ivmeölçergezdirme testi tekrar edilmiş ve analiz sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Son yapılan ivmeölçer gezdirme testinin bir önceki sonuçlarla kıyaslandığında elde edilen benzerlik oranlarında gözle görülür bir artış gerçekleşmiştir. Fakat tüm test metodları kıyaslandığında ie Al plakasında olduğu gibi hafif ve ince bir yapı olan FR4 plakasında da çekiç gezdirme test yönteminin işlevsel ve zamansal olarak büyük oranda avantaj sağladığı gözlemlenmiştir. Bunun sonucunda da bu tarz yapılar için en iyi yöntemin çekiç gezdirme metodu olduğuı anlaşılmıştır.

- Alüminyum plakası üzerinde gerçekleştirilen 3 farklı test metodunda frekanslar arasındaki maksimum fark ivmeölçer gezdirme testinde %23,6 yüzdesel fark saptanmış ve çekiç testinde minimum % 2,8 yüzdesel fark saptanmıştır.
- FR4 PCB plakası üzerinde gerçekleştirilen test metodlarında frekanslar arasındaki maksimum ve minimum farklar her noktaya kauçuk konumlandırılarak yapılan ivmeölçer gezdirme testinde minimum olarak 3. Modda frekanslar eşleşmiş ve

4. modda %9,36 fark saptanmıştır. Her ne kadar maksimum fark kauçuk ile birlikte yapılan ivmeölçer gezdirme testinde gözlemlense de kütle dengesinin sağlanmasından dolayı benzerlik oranları ilk yapılan ivmeölçer gezdirme testine göre daha fazla gelmiştir.

- FR4 PCB plakası üzerinde kauçuk konumlandırılarak yapılan ivmeölçer gezdirme test sonuçlarının bir önceki test sonuçlarına göre yaklaşık %10 iyileşme sağladığı gözlemlenmiştir.
- MAC sonuçlarında FEA ve EMA arasındaki maksimum benzerlik 0.994 olarak hesaplanmıştır.

Deneysel modal testler ile birlikte bundan sonraki yapılacak olan optimize ve iyileştirme çalışmalarında gerek tasarım mühendislerine gerek analiz mühendislerine parçalar özelinde yapılacak test metodlarına göre büyük oranda katkı sağlayabileceği anlaşılmıştır.

İleride Uygulanabilecek Çalışmalar

Gerçekleştirilen bu çalışmalarda deneysel modal analiz sonuçlarından elde edilen doğal frekanslar, sönüm oranları ve mod şekilleri yapılacak olan teori çalışmalarında bir fikir verebileceği ve kullanılabileceği anlaşılmıştır. Yapılacak olan çalışmalar da elde edilen veriler sonlu elemanlar analizinde rahatlıkla kullanılabilir. Bu çalışmada yapılan testleri de doğrulamak adına özellikle ivmeölçer gezdirme testlerinde yapı üzerinde diğer ölçüm noktalarına da bir ivmeölçer ağırlığı konularak parçanın yapısının bozulması engellenebilir ve testin doğruluğu bu sayede sağlanabilir. Bu duruma ek olarak ivmeölçer ağırlığında kauçuk konumlandırılarak testler gerçekleştirilmiş ve sonuçların iyileştiği gözlemlenmiştir buna ek olarak tam olarak gerçeği yansıtmak adına her noktaya kabloları ile birlikte özdeş ivmeölçerlerin montajlanması sonuçları daha da iyileştirecektir. Diğer bir test metodu olan modal sarsıcı testide daha karmaşık ve daha ağır yapılara uygulanarak sarsıcı testinin uyumlu olduğu parçalar hakkındaki tezi doğrulayabilir veya daha düz veya biraz daha hafif parçalar özelinde kuvvet aralığı az olan modal sarsıcılar seçilerek teste tabi tutulabilir. Böylece sarsıcı ve yapı geometrisi hakkındaki çalışmalar doğrulanmış olabilir.

KAYNAKLAR

Allemang, R. J., 1999 Vibrations: Analytical and Experimental ModalAnalysis,UCSDRL-CN-20-263-662, University of Cincinnati

Altunel, F. 2009. Modal updating of a helicopter structure using a newly developed correlation improvement techniques. Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ, Makine Mühendisliği Anabili Dalı, Ankara

Altunışık, A.C. 2010. Karayolu köprülerinin yapısal davranışlarının analitik ve deneysel yöntemlerle belirlenmesi. Doktora Tezi, KTÜ, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Trabzon.

Amalu, E. H., & Ekere, N. N. (2012). High temperature reliability of lead-free solder joints in a flip chip assembly. Journal of Materials Processing Technology, 212(2), 471-483.

Anonim, 1997. ISO 2631-1 Mechanical Vibration and Shock-Evaluation of Human Exposure to Whole-body Vibration. International Organization for Standardization, 31 p, Genève-Switzerland.

Anonim, 2000. https://training.dewesoft.com/online/course/modal-testing-frf#triggered-roving-acceleration-sensor

Anonim, 2017. DJB impact hammer IH-01, DJB Instruments, http://www.djbinstruments.com/products/instrumentation/impact-hammers/view/ih-01

Anonim, 2019a. What modal impact hammer tip should i use?. https://community.plm.automation.siemens.com/t5/Testing-Knowledge-Base/What-modal-impact-hammer-tip-should-I-use/ta-p/355026

Anonim, 2019b. https://community.sw.siemens.com/s/article/modal-assurance-criterion-mac

Anonim, 2020. https://community.sw.siemens.com/s/article/what-is-a-frequency-response-function-frf

Anonim, 2021a. https://www.mbdynamics.com/products/modal-exciters-amplifiers/modal-50a/

Anonim, 2021b. https://www.elektrikport.com/makale-detay/baski-devre-karti-(pcb)-nedir/23040#ad-image-0

Anonim, 2022a. https://rmc.com.tr/modal-analiz-nedir/

Anonim, 2022b. https://rmc.com.tr/fft-analiz-nedir/

Anonim, 2022c. https://www.assemcorp.com/tr/sik-sorulan-sorular/baskili-devre-pcb/item/89-fr-4-nedir.html

Anuar, M.A., Mat Isa, A.A., Zamri, A.R., Said, M.F.M., 2013. Ambient Response Modal Analysis on a CEM-1 Single-Layer Printed Circuit Board. AMM. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.393.683

Anonim, 2022d. https://www.mokotechnology.com/tr/fr4-pcb

Anonim, 2023a. https://www.dytran.com/Model-1053V1-IEPE-Force-Sensor-P1716/

Anonim, 2023b. https://www.dytran.com/Model-3055D1-General-Purpose-Accelerometer-P3230/

Anonim, 2023c. https://www.pcb.com/products?m=356a03

Anonim, 2023d. https://dewesoft.com/products/sirius

Anonim, 2023e. https://www.alldatasheet.com/datasheet pdf/pdf/395100/NI/NIUSB-4065.html

Arkun, E. 1983. Yapı bilgisi. Makine mühendisliği el kitabı. Cilt 4, Ankara, 135 s.

Ay, E. , Ediz, B. , Sönmezay, B. & Telli Çetin, S. (2019). Modal Analysis of Lenses Used in Automotive Lighting Industry and Obtaining MAC Matrix . International Journal of Engineering and Applied Sciences , 11 (2) , 401-413 . DOI: 10.24107/ijeas.571192

Aytekin, B. (2008). Vibration analysis of pcbs and electronic components, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitei Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Azam Sa, Fragosa A. (2020). Experimental and numerical simulation study of the vibration properties of thin copper films bonded to FR4 composite

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.

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.

Brughmans, M., Lembregts, F., ve Furini, F. (1995). Modal Test on the Pininfarina Concept Car Body, Ethos 1, MSC 1995 World User's Conference Proc, 5.

Çay, C. İ. 2006. Tarım traktörleri sürücü koltukları titreşim sönümleme elemanları üzerine bir araştırma. Doktora Tezi, AÜ, Tarım Makinaları Anabili Dalı, Ankara.

ÇELİK M, AYKAN M. Tank Namlusunun Operasyonel Modal ve Deplasman Analizi. MATİM. 2004;6(1):50-7.

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

Dahil, L. (2017). Alüminyum Köpük Malzemenin Dinamik Davranışlarının İncelenmesi . Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi , 17 (1) , 352-356 . Retrieved from https://dergipark.org.tr/en/pub/akufemubid/issue/43198/517045

Dal,2019.https://mustafaeroglu.sakarya.edu.tr/sites/mustafaeroglu.sakarya.edu.tr/file/sonumlu_serbest_titresimler_deney_FOY_2019.pdf

Ediz, B. & Telli Çetin, S. (2017). BİNEK ARAÇ GÜNDÜZ FARININ MODAL PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ VE SONLU ELEMANLAR MODELİNİN GÜNCELLENMESİ . Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi , 22 (3) , 1-10 . DOI: 10.17482/uumfd.338843

E. Kahraman, "Investigation of the dynamic properties of plate-like structures," M.S. - Master of Science, Middle East Technical University, 2011.

Erdoğan, G. 2016. Cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin modal analizi. Y. Lisans Tezi, İÜ, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
Ewins D.J., 2000, Modal Testing: Theory, Practice and Application, Research Studies Press Ltd., 2nd Edition, ISBN 0-86380-218-4

Gibson, R. F., 2000. Modal vibration response measurements for characterization of composite materials and structures, Composites Science And Technology, 60, 2769–2780.

Hannah, J., Stephens, R. C. 1956. Examples in mechanical vibrations. Edward Arnold Ltd, London, 152 pp.
Hunt, D. L., Peterson, E. L. (1983). Multishaker broadband excitation for experimental modal analysis. Society of Automotive Engineers Transactions, 92, 92–105.

Karuppaiah, N., Sujatha, C., Ramamurti, V. 1999. Modal and vibration/stress analysis of a passenger vehicle by FEM. SAE Technical Paper Series, doi: 10.4271/990003

Kaya D. F. , Nalbant M. Titreşim Fikstürlerinde Vibrasyon Ölçümleriyle Sonlu Elemanlar Model Sonuçlarının Karşılaştırılması. Muş Alparslan Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi. 2021; 2(1): 1-17.

Maia, N.M.M., Silva, J.M.M. (1997). Theoretical and Experimental Modal Analysis. John Wiley and Sons, Inc. New York.

Schwarz, B. J., Richardson, M. H. 1999. Experimental modal analysis. Vibrant Technology Inc., Jamestown, California, 12 pp.

Şekerci, H. U. 2013. Bir hava aracı komponentinin dinamik karakteristiklerinin teorik ve deneysel modal analiz metoduyla belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Uçak ve Uzay Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.

Şimşek, A. 2010. Bir iş makinası kabininin modal analizi. Yüksek Lisans Tezi, SAÜ, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya.

Thor, S. W., Chippa, S. 2015. Dynamics analysis of outside rear view mirror. SAE Technical Paper Series, doi: 10.4271/2015-26-0220

Thompson, W. T., Theory of Vibrations, Nelson Thornes Ltd, 1996, ISBN 0-412-78390-8

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.

Yao, S., Wright, J.R., Pavic, A., ve Reynolds, P. (2002). Forces Generated When Bouncing or Jumping on a Flexible Structure, International Conference on Noise and Vibration (ISMA2002), Leuven, Belgium, 563-572.

Yıldız, 2021. https://avesis.gazi.edu.tr/yonetilen-tez/f7fbdb3b-63ae-461d-9cc9-ab873b1761b2/bir-fuzenin-dinamik-karakterizasyonunda-cok-eksenli-tahrik-durumu-icin-modal-davranisin-sayisal-ve-deneysel-incelenmesi

Yılmaz, Murat , Uysal, Murat. "Trapez Sacların Titreşim Davranışlarının Sonlu Elemanlar ve Deneysel Modal Analizleriyle İncelenmesi". Technological Applied Sciences 16 / 2 (April 2021): 7-19.

Q. J. Yang, G. H. Lim, R. M. Lin, F. F. Yap, H. L. J. Pang and Z. P. Wang, "Experimental modal analysis of PBGA printed circuit board assemblies," Proceedings of the 1997 1st Electronic Packaging Technology Conference (Cat. No.97TH8307), Singapore, 1997, pp. 290-296, doi: 10.1109/EPTC.1997.723924.