

170932

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ÇELİK ÇERÇEVE SİSTEMLERİN DİNAMİK KARAKTERİSTİKLERİNİN  
DENEYSEL MODAL ANALİZ YÖNTEMİYLE BELİRLENMESİ

İnş. Müh. Temel TÜRKER

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde  
"İnşaat Yüksek Mühendisi"  
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 08.08.2005

Tezin Savunma Tarihi : 24.08.2005

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Alemdar BAYRAKTAR

*Bayraktar*

Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Mehmet AKKÖSE

*Mehmet Akköse*

Jüri Üyesi : Doç. Dr. Levent GÜMÜŞEL

*Levent Gümüsel*

Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Emin Zeki BAŞKENT

*Emin Zeki Başkent*

Trabzon 2005

## ÖNSÖZ

“Çelik Çerçeve Sistemlerin Dinamik Karakteristiklerinin Deneysel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi” adlı bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır.

Son yıllarda dünyanın her bölgesinde üzerine çalışmalar yapılan bu denli güncel ve önemli bir konuda çalışmamı sağlayan, çalışmamın her aşamasında benimle yakından ilgilenen, engin bilgi ve tecrübelerinden daima yararlandığım hocam Sayın Prof. Dr. Alemdar BAYRAKTAR’a minnet ve şükranlarımı sunmayı her zaman için bir borç bilirim.

Tez çalışmamı inceleyerek bilgi ve tavsiyelerini benimle paylaşan hocalarım Sayın Yrd. Doç. Dr. Mehmet AKKÖSE’ye ve Doç. Dr. Levent GÜMÜŞEL’e bana ayırdıkları zaman ve gösterdikleri ilgiden dolayı ayrı ayrı teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında bilgi ve yardımlarını esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Levent GÜMÜŞEL, Araş. Gör. Dr. Süleyman ADANUR’a, Araş. Gör. Dr. Şevket ATEŞ’e, Araş. Gör. Hasan GEDİKLİ’ye ve Araş. Gör. Hasan Basri BAŞAĞA’ya teşekkür ederim. Ayrıca, öğrenim hayatım süresince bana bilgi ve emeği geçen, değişik aşamalarda beni yönlendiren tüm hocalarımı saygıyla anar, kendilerine minnettar olduğumu belirtmek isterim.

Ölçüm modellerin oluşturulmasında imkanlarından yararlandığım TÜRKER Kaynak Atölyesi sahibi ve çalışanlarına ayrıca teşekkür ederim.

Bu günlere kadar gelmemde ellerinden gelen bütün imkanları kullanan, özellikle hayatımın bu önemli aşamasında maddi ve manevi desteklerini eksik etmeyen, haklarını hiçbir zaman ödeyemeyeceğim başta babam Selamet TÜRKER’e, annem Fatma TÜRKER’e ve ablam Dilek TÜRKER’e minnet ve şükranlarımı sunmayı hayatımın sonuna kadar bir borç bilirim.

Bu çalışmanın, ülkemizin bilimsel alanda ilerlemesine katkıda bulunmasını temenni ederim.

Temel TÜRKER

Trabzon 2005

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET.....	VII
SUMMARY .....	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ .....	XI
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Deneysel Modal Analiz.....	2
1.3. Deneysel Modal Analiz Yönteminin Uygulama Alanları .....	3
1.4. Literatür Araştırması .....	4
1.4.1. Teori Geliştirme Çalışmaları .....	4
1.4.2. Hasar Tespiti İle İlgili Çalışmalar .....	8
1.4.3. Genel Mühendislik Alanlarıyla İlgili Çalışmalar .....	9
1.4.4. Teorik Modelleri Geliştirmeye Yönelik Çalışmalar.....	11
1.4.5. Çevresel Yükleri Dikkate Alarak Yapılan Çalışmalar .....	12
1.5. Tezin İçeriği .....	15
1.6. Deneysel Modal Analiz Formülasyonu.....	16
1.6.1. Tek Serbestlik Dereceli Sistemler .....	16
1.6.1.1. Sönümsüz Tek Serbestlik Dereceli Sistemler .....	17
1.6.1.2. Viskoz Sönümlü Tek Serbestlik Dereceli Sistemler .....	18
1.6.2. Çok Serbestlik Dereceli Sistemler.....	21
1.6.2.1. Sönümsüz Çok Serbestlik Dereceli Sistemler .....	21
1.6.3. Frekans Davranış Fonksiyonlarının Özellikleri .....	26
1.6.3.1. Değişik Formdaki Frekans Davranış Fonksiyonları.....	26
1.6.3.2. Frekans Davranış Fonksiyonlarının Grafikselleştirilmesi .....	28
1.6.3.2.1. Genlik ve Faz Değerlerinin Çizilmesi (Bode Diyagramları).....	28

1.6.3.2.2.	Reel ve Sanal Kısımların Çizilmesi.....	30
1.6.3.2.3.	Reel ve Sanal Kısımların Nyquist Grafiklerinin Çizilmesi .....	30
1.7.	Deneysel Modal Analiz Ölçümleri.....	31
1.7.1.	Temel Ölçüm Sistemi.....	32
1.7.2.	Yapının Hazırlanması.....	34
1.7.2.1.	Serbest Ölçüm Durumu .....	34
1.7.2.2.	Ankastre Ölçüm Durumu .....	35
1.7.3.	Yapının Titreştirilmesi .....	36
1.7.3.1.	Sarsıcılar Kullanılarak Yapının Titreştirilmesi .....	36
1.7.3.2.	Çekiç veya Darbe Titreştirici Kullanılarak Yapının Titreştirilmesi .....	36
1.7.4.	Etki ve Tepkinin Ölçülmesi.....	39
1.7.4.1.	Kuvvet Ölçerler .....	39
1.7.4.2.	İvme Ölçerler.....	40
1.7.5.	Analiz Ediciler.....	43
1.7.5.1.	Tracking Filter.....	48
1.7.5.2.	Frekans Tepki Analiz Edici .....	48
1.7.5.3.	Spektrum Analiz Edici .....	49
1.7.6.	Dijital Sinyal İşleme.....	50
1.7.6.1.	Ayrık Fourier Dönüşümü .....	51
1.7.6.2.	Örtüşme (Aliasing).....	52
1.7.6.3.	Sızma (Leakage).....	53
1.7.6.4.	Pencereleme (Windowing) .....	54
1.7.6.5.	Yakınlaştırma (Zooming).....	56
1.7.6.6.	Ortalama (Averaging).....	56
1.7.7.	Titreşim Türleri .....	56
1.7.7.1.	Kademeli Sinüzoidal (Stepped-Sinusoidal) Titreşimler.....	57
1.7.7.2.	Yavaş Sinüs Taraması (Slow Sine Sweep) Titreşimler.....	57
1.7.7.3.	Periyodik Titreşimler.....	57
1.7.7.4.	Rasgele Titreşimler.....	58
1.7.7.5.	Geçici (Transient) Titreşimler .....	58
1.8.	Modal Parametrelerin Elde Edilmesi .....	61
1.8.1.	Ölçüm Sonuçlarının Kontrolü .....	61
1.8.2.	Doğal Frekanslar ve Sönüm Oranlarının Elde Edilmesi .....	62

1.8.2.1.	Tek Serbestlik Dereceli Sistemler İçin Kullanılan Yöntemler .....	62
1.8.2.1.1.	En Yüksek Genlik Yöntemi (Peak Amplitude ve Peak Picking) .....	63
1.8.2.1.2.	Daire Uydurma Yöntemi (Circle-Fit Method) .....	64
1.8.2.2.	Çok Serbestlik Dereceli Sistemler İçin Kullanılan Yöntemler .....	65
1.8.3.	Mod Şekillerinin Elde Edilmesi .....	65
1.8.4.	Modal Parametrelerin Doğruluğu.....	66
1.8.4.1.	Modal Emniyet Kriteri (Modal Assurance Criteria-MAC).....	67
1.8.4.2.	Modal Ölçek Faktörü (Modal Scale Factor-MSF) .....	68
2.	<b>YAPILAN ÇALIŞMALAR</b> .....	69
2.1.	Giriş .....	69
2.2.	Deneysel Modal Analiz Ölçümleri.....	69
2.3.	Teorik Modal Analizler .....	70
2.4.	Konsol Kiriş Modeli .....	71
2.4.1.	Yapısal Model .....	71
2.4.2.	Sonlu Elemanlar Modeli.....	72
2.4.3.	Malzeme Özellikleri .....	72
2.5.	Düzlem Çerçeve Modeli .....	73
2.5.1.	Yapısal Model .....	73
2.5.2.	Sonlu Elemanlar Modeli.....	74
2.5.3.	Malzeme Özellikleri .....	74
2.6.	Üç Boyutlu Çerçeve Modeli .....	75
2.6.1.	Yapısal Model .....	75
2.6.2.	Sonlu Elemanlar Modeli.....	76
2.6.3.	Malzeme Özellikleri .....	76
3.	<b>BULGULAR ve İRDELEMELER</b> .....	78
3.1.	Giriş .....	78
3.2.	Konsol Kiriş Model Sonuçları.....	78
3.2.1.	Deneysel Modal Analiz Ölçüm Sonuçları.....	78
3.2.2.	Teorik Modal Analiz Sonuçları .....	82
3.2.3.	Deneysel ve Teorik Modal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	83
3.3.	Düzlem Çerçeve Model Sonuçları .....	85
3.3.1.	Deneysel Modal Analiz Ölçüm Sonuçları.....	85
3.3.2.	Teorik Modal Analiz Sonuçları.....	87

3.3.3.	Deneysel ve Teorik Modal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	87
3.4.	Üç Boyutlu Çerçeve Model Sonuçları.....	88
3.4.1.	Deneysel Modal Analiz Ölçüm Sonuçları.....	88
3.4.2.	Teorik Modal Analiz Sonuçları.....	90
3.4.3.	Deneysel ve Teorik Modal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	91
4.	SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	93
5.	KAYNAKLAR .....	96
	ÖZGEÇMİŞ .....	101



## ÖZET

Bu tez çalışmasında, çelik çerçeve sistemlerin dinamik karakteristikleri olarak adlandırılan doğal frekansları, mod şekilleri ve sönüm oranlarının deneysel modal analiz (modal testing) yöntemiyle belirlenmesi amaçlanmaktadır. Deneysel modal analiz yönteminde yapıya uygulanan etki ve yapının bu etkiye göstermiş olduğu tepki ölçülerek, etki ve tepki fonksiyonları arasında frekans davranış fonksiyonu olarak adlandırılan bir transfer fonksiyonu tanımlanmakta ve bu transfer fonksiyonu kullanılarak yapıya ait dinamik karakteristikler belirlenmektedir.

Bu tez çalışması beş bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, deneysel modal analiz yöntemi hakkında genel bilgi verildikten sonra yöntemin uygulama alanlarından ve bu konuda daha önce yapılan bazı çalışmalardan bahsedilmektedir. Daha sonra deneysel modal analiz yönteminin formülasyonu ve frekans davranış fonksiyonlarının özellikleri anlatılmaktadır. Bu bölümde, son olarak yöntemin uygulamasına yönelik kullanılan ölçüm düzenekleri ve ölçümler sonucunda modal parametrelerin elde edilme yöntemleri ayrıntılı olarak anlatılmaktadır. İkinci bölümde, deneysel ve teorik modal analiz yöntemlerinin uygulamaları hakkında kısaca bilgi verildikten sonra, oluşturulan modeller tanıtılmakta, modellere ait malzeme özellikleri ve sınır şartları verilmektedir. Üçüncü bölümde, oluşturulan modellerin deneysel modal analizleri sonucunda elde edilen frekans davranış fonksiyonları, uygunluk fonksiyonları ve modal parametreleri verilmektedir. Ayrıca, modellerin teorik analizleri sonucunda hesaplanan dinamik karakteristikleri ile deneysel ve teorik analiz sonuçlarının karşılaştırılması verilmektedir. Dördüncü bölümde, ölçümler sırasında dikkat edilmesi gereken hususlar ile deneysel ve teorik analizler sonucunda elde edilen verilerin değerlendirilmesiyle ortaya çıkan sonuçlar ve öneriler sunulmaktadır. Beşinci bölümde ise, çalışmanın hazırlanmasında yararlanılan kaynaklar verilmektedir.

Çalışma sonucunda; oluşturulan modeller üzerinde deneysel modal analiz yöntemiyle gerçekleştirilen ölçümlerden ve aynı modellerin teorik modal analizlerinden, yapılara ait dinamik karakteristiklerin birbirine oldukça yakın olarak elde edildiği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Deneysel Modal Analiz, Frekans Davranış Fonksiyonu, Dinamik Karakteristikler, Çelik Çerçeveler

## SUMMARY

### **Determination of Dynamic Characteristics of Steel Frames by Experimental Modal Analysis Method**

In this thesis, natural frequencies, mode shapes and damping ratios called dynamic characteristics of structures are determined by using experimental modal analysis (modal testing) method. In the experimental modal analysis method, the impact applied to the structure and the response from the structure are measured simultaneously and then transfer function called frequency response function between the impact and response functions is calculated. After that modal parameters belong to the structure are determined by using this transfer function.

This thesis consists of five chapters. In the first chapter, firstly general information about experimental modal analysis, the application areas of this method and literature survey are presented. After that, formulations of experimental and numerical modal analysis methods and properties of frequency response function are given. Finally, test equipments used in the experimental modal analysis measurements and modal parameter estimation methods are introduced in detail. In the second chapter, general information about application of experimental and numerical modal analysis methods are presented. After that, selected models and material properties and boundary conditions of models are described. In the third chapter, frequency response functions, coherence functions and modal parameter of each model determined by experimental modal analysis of the models and dynamic characteristics of the models determined by theoretical modal analysis are given. In addition, comparisons of experimental and theoretical modal analysis results are done. In the fourth chapter, conclusions and recommendations obtained from the experimental and theoretical modal analyses are given. In the fifth chapter, the references used in this thesis are presented.

In conclusion of this study, it is seen that dynamic characteristics obtained from experimental and theoretical modal analyses are close to each other.

**Keywords:** Experimental Modal Analysis, Frequency Response Function, Dynamic Characteristics, Steel Frames



## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa No

Şekil 1.1. Teorik ve deneysel modal analizde oluşturulan modeller ve işlem sırası.....	3
Şekil 1.2. Tek serbestlik dereceli sistemlerin analitik modeli.....	16
Şekil 1.3. Sönümlü tek serbestlik dereceli sistemler için serbest titreşim grafiği.....	20
Şekil 1.4. İki serbestlik dereceli bir sistemin analitik modeli .....	21
Şekil 1.5. Sönümsüz tek serbestlik dereceli bir sistem için tipik frekans davranış fonksiyonu ve faz grafiği. ....	29
Şekil 1.6. Frekans davranış fonksiyonunun logaritmik olarak çizilmesi. ....	29
Şekil 1.7. Sönüm oranı %1'den düşük olan bir sistem için tipik bir frekans davranış fonksiyonunun reel ve sanal kısımları. ....	30
Şekil 1.8. Frekans davranış fonksiyonunun reel ve sanal kısımlarının Nyquist grafiği..	31
Şekil 1.9. Deneysel modal analiz yönteminde genel bir ölçüm düzeneği.....	32
Şekil 1.10. Serbest ölçüm durumu .....	35
Şekil 1.11. Yaygın olarak kullanılan çekiç türü.....	37
Şekil 1.12. Çekiç testinde darbe sinyali ve frekans spektrumu.....	38
Şekil 1.13. B&K 8202 tip çekiç ve ilave parçaları.....	39
Şekil 1.14. Yaygın olarak kullanılan kuvvetölçer türü .....	40
Şekil 1.15. İvme ölçerlerin genel yapısı.....	41
Şekil 1.16. İvme ölçeri yapıya bağlama yöntemleri.....	42
Şekil 1.17. B&K 4382 tip ivme ölçer ve ilave parçaları .....	42
Şekil 1.18. İvme ölçerlerin yerleştirilme biçimleri .....	43
Şekil 1.19. Fourier dönüşümü .....	44
Şekil 1.20. Deneysel modal analiz yönteminde analiz edicilerde takip edilen işlem sırası .....	45
Şekil 1.21. B&K 3550 tip çift kanallı spektrum analiz edici .....	49
Şekil 1.22. Örtüşme (Aliasing) problemi .....	52
Şekil 1.23. Anti-Aliasing filtreleme işlemi .....	53
Şekil 1.24. Sızma problemi .....	54
Şekil 1.25. Yaygın olarak kullanılan ağırlık fonksiyonları .....	55
Şekil 1.26. Chirp sinyali.....	59

Şekil 1.27. Çekiç veya darbe sinyalleri.....	60
Şekil 1.28. Tipik bir frekans davranış fonksiyonu ve uygunluk fonksiyonu .....	62
Şekil 1.29. Frekans davranış fonksiyonundan modal sönüm oranının elde edilmesi .....	63
Şekil 1.30. Nyquist grafiğinden sönüm oranının elde edilmesi .....	65
Şekil 1.31. Tipik bir konsol giriş eleman için mod şekillerinin elde edilişi.....	66
Şekil 2.1. Konsol giriş modeli.....	71
Şekil 2.2. Konsol girişin sonlu elemanlar modeli .....	72
Şekil 2.3. Düzlem çerçeve modeli.....	73
Şekil 2.4. Düzlem çerçevenin sonlu elemanlar modeli .....	74
Şekil 2.5. Üç boyutlu çerçeve modeli .....	75
Şekil 2.6. Üç boyutlu çerçevenin sonlu elemanlar modeli.....	76
Şekil 3.1. Konsol giriş modele ait frekans davranış fonksiyonu ve uygunluk fonksiyonu.....	79
Şekil 3.2. Konsol giriş modele ait deneysel modal analiz sonucunda elde edilen mod şekilleri.....	81
Şekil 3.3. Konsol giriş modele ait teorik analiz sonucunda elde edilen mod şekilleri....	83
Şekil 3.4. Konsol giriş modelin deneysel ve teorik modal analizleri sonucunda elde edilen mod şekillerinin karşılaştırılması .....	84
Şekil 3.5. Düzlem çerçeve modele ait frekans davranış fonksiyonu ve uygunluk fonksiyonu.....	86
Şekil 3.6. Üç boyutlu çerçeve modele ait frekans davranış ve uygunluk fonksiyonu ....	89

## TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Frekans davranış fonksiyonu formları.....	28
Tablo 2.1. Konsol giriş model için kullanılan malzeme özellikleri.....	72
Tablo 2.2. Üç boyutlu çerçeve model için kullanılan malzeme özellikleri .....	77
Tablo 3.1. Konsol giriş modele ait deneysel modal analiz sonucunda elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları .....	80
Tablo 3.2. Konsol giriş modele ait frekans davranış fonksiyonunun sanal kısmının değerleri.....	80
Tablo 3.3. Konsol giriş modele ait normalleştirilmiş mod değerleri.....	81
Tablo 3.4. Konsol giriş modele ait teorik analiz sonucunda elde edilen doğal frekanslar .....	82
Tablo 3.5. Konsol giriş modelin deneysel ve teorik modal analizi sonucunda elde edilen doğal frekansların karşılaştırılması.....	84
Tablo 3.6. Düzlem çerçeve modele ait deneysel modal analiz sonucunda elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları .....	86
Tablo 3.7. Düzlem çerçeve modele ait teorik analiz sonucunda elde edilen doğal frekanslar .....	87
Tablo 3.8. Düzlem çerçeve modelin deneysel ve teorik modal analizi sonucunda elde edilen doğal frekansların karşılaştırılması.....	88
Tablo 3.9. Üç boyutlu çerçeve modele ait deneysel modal analiz sonucunda elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları .....	90
Tablo 3.10. Üç boyutlu çerçeve modele ait teorik analiz sonucunda elde edilen doğal frekanslar .....	91
Tablo 3.11. Üç boyutlu çerçeve modelin deneysel ve teorik modal analizi sonucunda elde edilen doğal frekansların karşılaştırılması .....	91

## SEMBOLLER DİZİNİ

$A$	: İvme
$a_0$	: Fourier dönüşümü katsayı fonksiyonları
$a_n$	: Fourier dönüşümü katsayı fonksiyonları
$A(\omega)$	: İnertance formundaki frekans davranış fonksiyonu
$b_n$	: Fourier dönüşümü katsayı fonksiyonları
$c$	: Sönüm
$[C]$	: Sönüm matrisi
$c_{cr}$	: Kritik sönüm
$C_n$	: $a_n$ ve $b_n$ değerlerinin büyüklüğü
$F$	: Kuvvet genliği
$f$	: Frekans
$f(t)$	: Zaman bağımlı kuvvet
$\{f(t)\}$	: Zaman bağımlı kuvvet vektörü
$F(f)$	: Frekans ortamındaki etki fonksiyonu
$f$	: Fourier dönüşümü
$G_{FF}$	: Etki sinyaline ait oto spektrum
$G_{FX}$	: Etki ve tepki sinyalleri arasındaki cross spektrum
$G_{XX}$	: Tepki sinyaline ait oto spektrum
$H(\omega)$	: Receptance formundaki frekans davranış fonksiyonu
$H_1(f)$	: Tepki sinyalinde gürültü olması durumunda frekans davranış fonksiyonu
$H_2(f)$	: Etki sinyalinde gürültü olması durumunda frekans davranış fonksiyonu
$H_3(f)$	: Hem etki hem de tepki sinyalinde gürültü olması durumunda frekans davranış fonksiyonu
$k$	: Rijitlik
$[K]$	: Rijitlik matrisi
$[k_r]$	: Genelleştirilmiş rijitlik matrisi
$m$	: Kütle
$[M]$	: Kütle matrisi
$[m_r]$	: Genelleştirilmiş kütle matrisi

$N$	: Ayrık değer sayısı
$s$	: Karmaşık sayı
$T_s$	: Sinyal uzunluğu
$v$	: Hız
$\omega$	: Sönümsüz doğal açısai frekans
$\omega_d$	: Sönümlü doğal açısai frekans
$\omega_{max}$	: Frekans spektrum alanı
$\omega_s$	: Sayısallaştırma oranı
$w_t$	: Ağırlık fonksiyonu
$[\omega_r^2]$	: Doğal açısai frekansın karesi
$X$	: Yerdeğiştirme genliği
$x(t)$	: Zaman bağımlı yerdeğiştirme
$\dot{x}(t)$	: Zaman bağımlı hız
$\ddot{x}(t)$	: Zaman bağımlı ivme
$\{X\}$	: Yerdeğiştirme genlik vektörü
$X(f)$	: Frekans ortamındaki tepki fonksiyonu
$\{x(t)\}$	: Zaman bağımlı yerdeğiştirme vektörü
$\{\dot{x}(t)\}$	: Zaman bağımlı hız vektörü
$\{\ddot{x}(t)\}$	: Zaman bağımlı ivme vektörü
$x'(t)$	: Ağırlık fonksiyonu ile çarpılmış sinyal
$Y(\omega)$	: Mobility formundaki frekans davranış fonksiyonu
$\Delta f$	: Frekans bant genişliği
$\Delta \omega$	: Spektrum çözünürlüğü
$\xi$	: Sönüm oranı
$\angle$	: Açı değeri (derece)
$[\psi]$	: Modal matris
$[\phi]$	: Normalleştirilmiş öz vektörler
$\phi_n$	: $a_n$ ve $b_n$ değerlerinin faz değeri
$\gamma^2(f)$	: Uygunluk fonksiyonu
$ \beta $	: Frekans davranış fonksiyonunda tepe noktaların genlik değeri

- $\{\phi_A\}$  : Deneysel olarak ölçülen mod şekil vektörü
- $\{\phi_X\}$  : Teorik olarak hesaplanan mod şekil vektörü
- $\theta_\alpha$  : Receptance formundaki frekans davranış fonksiyonu faz değeri
- $\theta_y$  : Mobility formundaki frekans davranış fonksiyonu faz değeri



# 1. GENEL BİLGİLER

## 1.1. Giriş

Makinelerdeki titreşimlerden dolayı mekanik parçalarda hasarlar oluşmakta, hatta kırılmalar meydana gelmektedir. Bunun en önemli sebebi, makinenin çalışma frekansı ile mekanik parçaların doğal frekansının çakışması yani rezonans durumunun oluşmasıdır. Makinelerin çalışmalarından oluşan titreşimler engellenemeyeceğinden, mekanik parçaların bu titreşimlere karşı davranışlarının belirlenmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bu amaçla 1940'lı yıllarda uçak parçalarının dinamik karakteristikler olarak adlandırılan doğal frekanslarının, sönüm oranlarının ve mod şekillerinin deneysel olarak belirlenmesi üzerine çalışmalar yapılmış ve deneysel modal analiz yöntemi geliştirilmiştir (Ewins,1995).

Makine parçalarına benzer şekilde inşaat mühendisliği yapıları da deprem, rüzgar, trafik ve patlama titreşimleri gibi engellenemez titreşimlere maruz kalmaktadırlar. Bu titreşimler sırasında yapının frekansı ile titreşimin hakim frekansının çakışması halinde rezonans durumu oluşmakta ve yapıların hasar görmesi ya da yıkılması engellenememektedir.

Yapıların teorik analizleri yapılırken malzeme özelliklerinden sınır şartlarına kadar birçok kabuller yapılmaktadır. Bunun yanı sıra, yapının inşası sırasında da bazı hatalar yapılabilmektedir. Bunların sonucunda, teorik analizi yapılan yapı ile inşa edilen yapının aynı dinamik karakteristiklere sahip olup olmadığının belirlenmesi gerekmektedir (Reynolds vd., 2002). Özellikle de kompleks yapılar dikkate alındığında, teorik analizde sonlu elemanlar modelin oluşturulmasında bazen yetersiz kalılabilmekte ve yapılar yeterince temsil edilememektedir (Miglietta, 1995; Telaghani and Pappa, 1996). Tarihi yapıların dinamik karakteristiklerinin belirlenmesine de gerek duyulmaktadır. Fakat tarihi yapıların malzeme özelliklerinin yeterince doğru olarak belirlenmesindeki sıkıntılar nedeniyle dinamik karakteristiklerinin teorik olarak belirlenmesi zordur (Armstrong vd., 1995). Geçmişte inşa edilmiş ve halen kullanılmakta olan demiryolu köprüleri gibi yapıların hasar durumlarının ve kullanım ömürlerinin belirlenmesi gerekmektedir (Aksel, 1993). Ayrıca, mevcut çelik ve betonarme yapıların deprem güvenlikleri için dinamik karakteristiklerinin doğru olarak belirlenmesi gerekmektedir.

Yapılarda titreşimlerden oluşan etkilerin belirlenebilmesi ve en aza indirilebilmesi için yukarıda bahsedilen durumları da dikkate alan deneysel bir yöntemin gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bunun için, yapının mevcut haliyle ölçülmesi, dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi ve gerekli önlemlerin alınması gerekmektedir.

## 1.2. Deneysel Modal Analiz

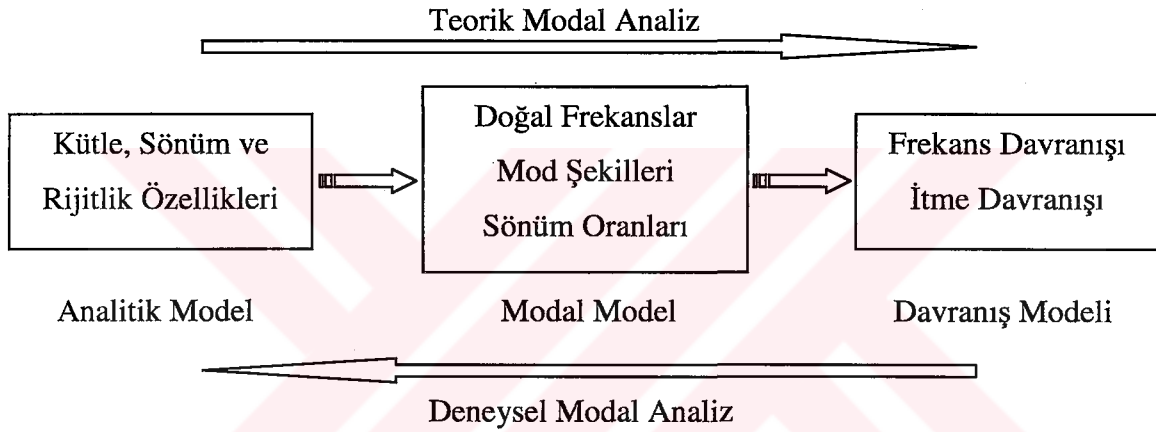
Deneysel modal analiz, yapılardaki titreşimleri dikkate alarak yapıların dinamik karakteristiklerinin deneysel olarak belirlenmesinde kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemin yeterince anlaşılabilmesi için temel titreşim biçimlerinin bilinmesi gerekmektedir. Titreşim, yapıların uygulanan başlangıç şartları veya uygulanan dış yükler altında göstermiş oldukları tepkidir. Temel olarak, serbest titreşim ve zorlanmış titreşim olmak üzere iki farklı titreşim türü söz konusudur. Serbest titreşimde yapı, uygulanan başlangıç şartları altında titreşir. Bu tür titreşimde, en küçük doğal frekans (temel frekans) yapıda en etkili olan frekanstır. Bu tür titreşim, belirli bir süre sonra yapıdaki sönümün etkisiyle sona erer. Zorlanmış titreşim ise, yapının uygulanan bir dış yük altındaki titreşimidir. Bu tür titreşim, yük yapıya etki ettiği sürece devam eder (Ewins, 1995).

Bir yapı dış yükten dolayı titreştirildiğinde, yapının doğal frekansı ile dış yükün frekansının aynı olduğu bir duruma gelinebilir. Bu durumda yapı oldukça büyük genlikte titreşim yapar. Bu durum, rezonans durumu olarak adlandırılır.

Yapıların modal analizlerinin teorik ve deneysel olmak üzere iki şekilde yapılması mümkündür. Teorik modal analizde, öncelikle yapının kütle, sönüm ve rijitlik özellikleri kullanılarak fiziksel bir tanımlama yapılır. Bu fiziksel özellikler kullanılarak yapının analitik modeli elde edilir. Analitik model üzerinden geleneksel modal analiz yöntemi kullanılarak yapının doğal frekansları, mod şekilleri ve modal sönüm oranları elde edilir. Bu değerler kullanılarak yapının modal modeli oluşturulur. Modal analiz yapılırken yapıya dış yük uygulanmadığı düşünüldüğü için elde edilen değerler doğal değerler olarak adlandırılmaktadır. Son olarak ise oluşturulan modal model üzerinden yapının verilen sınır şartları ve yüklemeler altında vereceği tepkiler hesaplanır. Frekans ve itme davranışı olarak adlandırılan bu tepkiler kullanılarak yapının davranış modeli oluşturulur. Yapıların deneysel modal analizi, yapıya uygulanan kuvvetin, yani etkinin, ve yapıdan elde edilen ivmenin, yani tepkinin, ölçülmesini ve analiz edilmesini içermektedir. Etki ve tepki değerleri ölçüldükten sonra tepkinin etkiye oranlanmasından yapıya ait dinamik



karakteristiklerin elde edilmesinde kullanılacak olan frekans davranış fonksiyonu elde edilir. Deneysel modal analiz, başlıca beş aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşama, modal testi yapılacak yapının mesnetlenmesi, yapıya ölçerlerin bağlanması ve sistem ayarlarının yapılmasını içermektedir. İkinci aşamada, belirlenen noktalardan yapı titreştirilir ve frekans davranış fonksiyonu elde edilir. Üçüncü aşamada, frekans davranış fonksiyonundan yapıya ait modal parametreler elde edilir. Dördüncü aşamada, sonuçların geçerliliği belirlenir. Beşinci aşamada, ise elde edilen bilgiler yardımıyla değerlendirmeler yapılır. Şekil 1.1’de teorik ve deneysel modal analizde oluşturulan modeller ve işlem sırası verilmektedir.



Şekil 1.1. Teorik ve deneysel modal analizde oluşturulan modeller ve işlem sırası

### 1.3. Deneysel Modal Analiz Yönteminin Uygulama Alanları

Günümüzde deneysel modal analiz konusundaki teorik bilginin artması ve elektronik cihazlardaki hızlı gelişme sayesinde, deneysel modal analiz birçok mühendislik alanında kullanılabilir hale gelmiştir. Makine parçalarının titreşim analizinden çevresel yüklerden dolayı yapılarda oluşan titreşimlerin analizine kadar birçok alanda modal analiz ölçümleri yapılabilmektedir.

Genel olarak deneysel modal analizin uygulama alanlarını,

- Yapılar projelendirilirken teorik analizde yapılan kabullerin gerçekte sağlanıp sağlanmadığının belirlenmesi,

- Teorik analiz sonucu elde edilen dinamik karakteristiklerin deneysel olarak elde edilenlerle karşılaştırılmasının yapılması ve sonlu elemanlar modelin geliştirilmesi,
- Teorik analizin yapılmasında zorluk olan yapıların dinamik karakteristiklerinin deneysel olarak belirlenmesi,
- Hasar görmüş veya kullanılmış yapıların kullanılabilirlik durumlarının belirlenmesi şeklinde sıralamak mümkündür.

## **1.4. Literatür Araştırması**

### **1.4.1. Teori Geliştirme Çalışmaları**

Schwarz ve Richardson (1999), deneysel modal analiz yönteminin, ölçümlerde kullanılan cihazlardan modal parametrelerin elde edilmesine kadar bütün aşamalarını özetleyen bir çalışma hazırlamışlardır. Bu çalışmada, frekans davranış fonksiyonlarının elde edilmesi, alternatif formdaki frekans davranış fonksiyonları, çekiç testi, sarsıcı (shaker) testi, sinyal türleri ve modal parametrelerin elde edilme yöntemleri hakkında bilgiler verilmiştir.

Pavic vd. (1998), çalışmalarında öncelikle inşaat mühendisliği alanındaki deneysel modal analiz uygulamalarını mekanik, otomotiv ve havacılık alanındaki uygulamalarla karşılaştırmış ve aralarındaki temel farklılıkları belirlemişlerdir. Çekiç testi zaman ve maliyet açısından avantajlı görülse de, inşaat mühendisliği yapılarının genellikle düşük frekanslı, birbirine yakın modlara sahip olmaları ve yüksek sönüm oranlı olmaları nedeniyle özel bir dikkat gerektirdiği belirtilmiştir.

Ewins (2001), deneysel modal analiz yönteminin mevcut durumunu, mekanik yapıların optimum tasarımını sağlayacak şekilde özel deneysel modal analiz uygulamalarını da örnek göstererek açıklamıştır. Bu amaçla halen kullanılmakta olan ve geliştirilmekte olan yeni yöntemlerden bahsetmiştir. Ayrıca deneysel modal analiz uygulamalarında karşılaşılan bazı problemleri ve yöntemin uygulanmasındaki sınırlandırmaları da belirtmiştir.

Farrar ve Doebling (1997), büyük mühendislik yapıları üzerinde hasar tespiti amaçlı gerçekleştirdikleri ölçümler sonucunda elde ettikleri deneyimlerini bu çalışmalarında sunmuşlardır. Büyük yapılarda test yapmanın, hem test yapılacak yapıların azlığı hem de test için gerekli parasal kaynağın fazlalığı nedeniyle oldukça zor olduğu belirtilmiştir. Bu

çalışmada, Amerika'nın Albuquerque şehrindeki Rio Grande köprüsünde gerçekleştirilen deneysel modal analiz ölçümleri ve elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

Wang (1998), değişik formlardaki titreştirici ve tepki ölçerler kullanılması durumunda genel frekans davranış fonksiyonuna ait teorik formülasyonları sunmuştur. Yaygın olarak kullanılan titreştirici ve tepki ölçerler fiziksel olarak belirlenmekte ve frekans davranış fonksiyonu da geleneksel formda ifade edilmektedir. Farklı tipte ölçerler kullanılması durumunda oluşan etkiler bir boyutlu giriş eleman üzerinde yapılan deneylerle gösterilmiştir.

Çekiç testinde sonuçların doğruluğunu arttırmak ve yöntemin uygulama alanını genişletmek amacıyla elektronik çekiçler kullanılmaktadır. Tawfiq vd. (1997), bu amaçla bir elektronik güç dolaşımı ve elektronik program sunmuşlardır. Ayrıca çekiç başlığının geometrisi ve çekiç başlığı ile yapı arasındaki etkileşim süresini de incelemişlerdir. Elektromanyetik pistonlu çekiçlerin, normal çekiçlerde oluşan sorunları ortadan kaldırdığı görülmüştür. Ayrıca normal çekiçlerde oluşan geri tepmeler olmamış, kuvvetin yönü ve seviyesi rahatlıkla belirlenebilmiştir. Elektronik kontrol sayesinde etkileşim süresi de en aza indirilebilmiştir.

İvme ölçerlerin ölçülecek yapı üzerindeki yerleştirilme yerleri sonuçların elde edilebilmesi açısından önemlidir. Bu nedenle yapıların ön analizleri yapılarak ivme ölçer bağlantı noktaları belirlenir. Kammer (2004), üç eksenli ivme ölçerler için ilgili moda ait matrisin determinantının en az olmasını sağlayan yeni bir yöntem geliştirmiştir.

Deneysel modal analizde sızma etkilerini en aza indirmek ve sinyal/gürültü oranını arttırmak amacıyla exponansiyel ağırlık fonksiyonları yaygın olarak kullanılmaktadır. Exponansiyel ağırlık fonksiyonlarında zaman sabiti kullanıcı tarafından belirlenmektedir. Fladung ve Rost (1997), iki tip tepki sinyali üzerine exponansiyel ağırlık fonksiyonlarının nasıl uygulanacağını ve uygulamanın sonuçlarını göstermişlerdir. Exponansiyel ağırlık fonksiyonlarının uygulanması sonucunda ölçülen sistemin görünen sönümünün arttığı görülmüştür.

Exponansiyel ağırlık fonksiyonları, sinyal/gürültü oranını yükseltmek ve sızma hatalarını azaltmak amacıyla çekiç testlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Exponansiyel azalma oranı ne kadar büyük olursa, sızma oranı o kadar daha az olur. Buna karşın exponansiyel azalma oranı çok büyük olursa, frekans davranış fonksiyonunda bozulmalar olmaktadır. Bu durumda da modal parametreler düzgün olarak belirlenememektedir. Ahn vd. (2004), exponansiyel ağırlık fonksiyonlarının kullanılması

sonucunda frekans davranış fonksiyonlarında oluşan bozulmaların etkisinden kurtulmak amacıyla yeni bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Bu yaklaşımla, exponansiyel ağırlık fonksiyonları ile bozulmuş olan itme davranış fonksiyonundan modal parametrelerin direkt olarak elde edilmesi sağlanmıştır.

Doebbling vd. (1998), titreşim testlerinin sayısal simülasyonu, modal verilerin analizi, sonlu elemanlar model korelasyonu ile lineer ve lineer olmayan hasar tespiti tekniklerinin karşılaştırılmasını sağlayacak bir grafiksel arabirim programı sunmuşlardır. Bu programın önemli bir özelliği, titreşim analizine bağlı olarak birkaç farklı hasar tespiti algoritması içermesidir. Bu algoritmalar, tepkinin ölçülmesi ve ivme ölçer bağlantı noktaları bilgilerini içerenler ve sonlu elemanlar korelasyonunu içerenler olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Ayrıca, bu program uygunluk fonksiyonu ve istatistiksel belirsizlik analizi için Monte Carlo analizi de yapabilmektedir. MATLAB programı kullanılarak oluşturulan bu programa DIAMOND (Damage Identification And Modal aalysis of Data) adı verilmiştir.

Deneysel modal analiz yönteminde ölçümler genellikle laboratuvar şartlarında yapılmaktadır. Buna karşın çoğu durumda, gerçek çalışma şartlarında elde edilen sonuçlar laboratuvarda elde edilenlerden farklıdır. Bu nedenle, yapıların çalışma koşullarında test edilmelerinin gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bu amaçla, bir önceki değerleri kullanan değişken ortalama modeli (autoregressive moving averaging model), doğal titreşim tekniği (NEXT) ve stokastik alt birim metotları (stochastic subspace methods) geliştirilmiştir. Hermans ve Auweraer (1999), doğal titreşim tekniği ile dengeli anlama (balanced realization) ve standart değişken analizi olarak adlandırılan iki alt birim tekniği kullanmışlardır. Örnekler üzerinde yöntemlerin uygulanabilirliği gösterilmiştir.

Yapılardaki değişiklikleri belirlemek amacıyla yapılan çalışmalarda değişiklik yapılmış yapıya ait spektrumlarda yassılma (truncation) hatası olduğu gözlemlenmiştir. Braun ve Ram (2001), modellerin tam olarak temsil edilememesinden dolayı değiştirilmiş yapıya ait spektrumlarda oluşan hataları belirlemeye çalışmışlardır. En uygun çözüm Rayleigh-Ritz yöntemi kullanılarak elde edilmiş ve yassılma hatası sınırlandırılmıştır.

Verbouven vd. (2003), frekans ortamında en küçük kareler yönteminin değişik formülasyonlardaki uygulamasını karşılaştırmışlardır. Bu amaçla, modal parametrelerin elde edilmesinde en küçük kareler yöntemiyle optimizasyon yapılmıştır. Çalışmada, ölçüm durumlarına bağlı olarak hangi tip transfer ve ağırlık fonksiyonunun seçileceği belirlenmiştir.

Deneysel modal analiz ölçümleri, ölçüm ortamındaki istenilmeyen gürültülerden dolayı sürekli olarak olumsuz yönde etkilenmektedir. Şanlıtürk ve Çakar (2004), tekil değerler azalması (Singular Value Decomposition, SVD) yöntemini kullanarak frekans davranış fonksiyonlarından gürültünün etkisini azaltmışlardır.

Ashory (1999), deneysel modal analiz ölçümleriyle ilgili oluşan mekanik hataları dikkate alarak bu hatalara çözüm aramayı ve böylece deneysel modal analiz ölçümlerini geliştirmeyi amaçlamıştır. Bu amaçla, ivme ölçer kütle etkisinin, çekiç yapı etkileşiminin, askı yayı etkilerinin ve lineer olmayan etkilerin deneysel modal analiz ölçümleri üzerindeki etkileri ortaya konulmuştur.

Levent vd. (2003), endüstride kullanılmakta olan çeşitli panellerin titreşim davranışlarının optimize edilmesine yönelik olarak ön araştırma niteliğinde bir çalışma hazırlamışlardır. Bu çalışmada, düz panel yüzeyinde plastik şekil verme yöntemi ile oluşturulan kabartmaların düz panelin dinamik karakteristiklerinde meydana getirdiği farklılıkların belirlenmesi amaçlanmıştır. Kabartmaların düz panellerin dinamik özelliklerinde meydana getirdiği değişikliklerin belirlenmesinin yanında, bu tür çok esnek ve geniş yüzeyli panellerin teorik modellenmesinde ve deneysel modal analizi sırasında pratikte karşılaşılan zorluklar ortaya konulmuş ve hata kaynakları irdelenmiştir. Benzer yapıların modellenmesinde kullanılan düz panel varsayımının gerçek hayatta önemini büyük ölçüde yitirdiğini ve düz panel varsayımı ile oluşturulan teorik modellerden elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlar arasında önemli farklılıklar ortaya çıkabileceği belirlenmiştir.

Göge vd. (2005), yerden titreşim testi (Ground Vibration Test, GVT) yöntemiyle uçak modeli üzerinde lineer olmayan etkileri belirlemek amacıyla deneysel ölçümler gerçekleştirmişlerdir. Yapının lineer olduğu kabulüyle gerçekleştirilen ölçümler sonucunda, yapının tamamıyla lineer olmadığı görülmüştür. Yapıdaki lineer olmama, rezonans frekanslarının lineer olarak çizilmesiyle belirlenmiştir.

Yolcu ve yük trenlerinde oluşan titreşimlerin yanı sıra hızlı metrolardan kaynaklanan titreşimler de çevre açısından oldukça önemlidir. Maeck ve Roeck (2000), çalışmalarında trafik etkilerinde oluşan titreşimleri belirlemek amacıyla modeller geliştirmiştir. Yüksek hızlı trenlerin geçtiği bir köprü üzerinde yapılan ölçümlerde köprüye ve raylara ölçerler bağlanarak trenlerden oluşan titreşimler belirlenmiştir.

İnsan vücudunun rezonans davranışını anlayabilmek için vücudun titreşim frekanslarının ve sırt ağırlarıyla ilgili duruş pozisyonlarının belirlenmesi gerekmektedir.

Kitazaki ve Griffin (1998), bütün gövdeye titreşim uygulayarak vücudun rezonans frekanslarını belirlemeye çalışmışlardır. Ölçümler sonucunda ilk frekansın 5 Hz ve ikinci frekansın 8 Hz değerlerinde olduğu gözlemlenmiştir. Karmaşık vücut hareketlerinden dolayı vücutta yaralanmaya sebep olacak bir titreşim kuvvetini tahmin etmenin zor olduğu görülmüştür. Ayrıca sırt problemlerinde en önemli riskin omurgadaki eğilme deformasyonlarından oluşacağı düşünülmüştür.

#### 1.4.2. Hasar Tespiti İle İlgili Çalışmalar

Hwang ve Kim (2004), yapılardaki hasar bölgelerini ve hasarın derecesini belirlemek amacıyla daha kısa süre ve daha az maliyet gerektiren bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu çalışmada, deneysel ölçümler sonucu elde edilen birkaç frekans davranış fonksiyonu üzerinde rijitlik matrisinin fiziksel anlamına dayalı bir hasar tespit yöntemi uygulanmıştır. Yani, hasar oluşması durumunda rijitlikte azalma olacağı kabul edilmiştir. Yöntemin uygulanabilirliğini göstermek amacıyla basit bir konsol kiriş ve helikopter pervane kanadı üzerinde ölçümler yapılmıştır.

Sampaio vd. (1999), yapılarda hasar olup olmadığını ve eğer varsa hasarın yerini ve miktarını belirlemeyi amaçlamışlardır. Bu çalışmada, yapılarda hasar oluşması sonucunda yapının dinamik karakteristikleri olarak adlandırılan doğal frekanslar, mod şekilleri ve sönüm oranlarında değişimler olacağı kabul edilmiştir. Yapıda hasar olarak çatlak dikkate alınması durumunda ise, dinamik karakteristiklerden rijitliğin önemli derecede değiştiği, kütlelerin değişmediği ve sönümdeki değişimin ihmal edilebileceği kabul edilmiştir. Amerika'nın Albuquerque şehrindeki Rio Grande köprüsü üzerinde gerçekleştirilen ölçümlerde yöntemin doğru sonuçlar verdiği gösterilmiştir.

Luş vd. (2000), geliştirdikleri yöntemle lineer yapıların hasar durumlarını belirlemeye çalışmışlardır. Sunulan yöntem iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada, OKID (Observer Kalman Identification Algorithm) algoritması kullanılarak birinci sıra model (first order model) oluşturulmuştur. İkinci aşamada ise, ERA (Eigensystem Realization Algorithm with Data Correlations) algoritması kullanılarak kütle, sönüm ve rijitlik matrislerinin elde edileceği ikinci sıra model (second order model) oluşturulmuştur. Hasarsız duruma ait rijitlik matrisiyle hasarlı duruma ait rijitlik matrisi karşılaştırılarak hasar bölgesi ve miktarı belirlenmiştir.

Dyke ve Jonhson (2000), yapısal kontrolde karşılaştırmalı değerlendirme (benchmark) probleminden bahsetmişlerdir. Benchmark problemi ASCE yapısal kontrol araştırma grubu tarafından ortaya konulan bir problemdir. Benchmark çalışmaları, yapısal görüntüleme kullanılan farklı yöntemlerin karşılaştırılmasını kolaylaştırmak amacıyla yapılmıştır. Bu çalışma, dört katlı mevcut bir yapı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Yapının tepkilerine ait cross spektral yoğunluk fonksiyonları hesaplanmış ve cross korelasyon fonksiyonu elde edilmiştir. Eigensystem Realization Algorithm (ERA) kullanılarak modal parametreler elde edilmiştir. Elde edilen modal parametreler optimum rijitlik çarpanının belirlenmesi amacıyla kullanılmıştır. Rijitlik çarpanındaki değişmeye bakılarak hasar bölgesi tespit edilmiştir.

Katafygiotis ve Lam (2000), IASC ve ASCE yapısal kontrol gruplarının ortaya koyduğu benchmark hasar tespiti problemi üzerinde istatistiksel bir yaklaşım ortaya koymuşlardır. Bu çalışmada, ölçüm sırasındaki gürültü ve modelleme hataları dikkate alınmıştır. Ayrıca, bu istatistiksel yaklaşımın zorlukları, sınırlamaları ve uygulanabilirliği tartışılmıştır. Bu yaklaşımın uygulanması durumunda hasar bölgesi rahatlıkla belirlenebildiği, buna karşın hasar miktarı konusunda tam bir bilgi edinilemediği görülmüştür.

Hasar tespiti konusunda yapılan çalışmalardan, hasar tespiti amacıyla kullanılan modal verilerin hasarın belirlenmesinde büyük öneme sahip olduğu görülmüştür. Xia ve Hao (2000), hasar tespiti ölçümlerinde alt ölçüm noktaları kullanarak yeni bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Bu yöntemde hasar artık (residual) vektör hassasiyeti ve ölçümlerdeki gürültü hassasiyeti olarak tanımlanan iki faktöre bağlı olarak belirlenmiştir.

### **1.4.3. Genel Mühendislik Alanlarıyla İlgili Çalışmalar**

Haapaniemi vd. (2003), mevcut boru hatlarının kullanım ömürleri ve durumlarının belirlenmesi amacıyla pratik bir metot geliştirmeyi amaçlamışlardır. Bu tip bir çalışma, sistemin sonlu elemanlar modelinin oluşturulması, ön analizinin yapılması, deneysel modal analizinin yapılması, modal korelasyon analizinin yapılması ve modelin geliştirilmesi aşamalarını içermektedir. Bu çalışmada, bir boru sisteminin farklı sınır koşullarındaki ölçümlerinin sonuçları ile çekiç veya sarsıcı kullanılması durumunda elde edilen sonuçlar arasındaki bağlantı araştırılmıştır. Çekiç testi ve sarsıcı testi sonuçlarının düşük frekanslarda birbirine yakın olduğu görülmüştür. Korelasyon analizinden, özellikle 20 Hz

üzerindeki frekanslarda boruların dinamik davranışlarının izolasyondan oldukça etkilendiği görülmüştür. Bunun sebebinin sistemin sönümünün artması ve izolasyonlu boruların diğer yapılarla etkileşimi olduğu düşünülmüştür.

Miglietta (1995), büyük teleskopların yüksek modal performans ve minimum görsel engel oluşturacak şekilde tasarımı için bir çalışma yapmışlardır. Oluşturulan model üzerinde gerçekleştirilen deneysel modal ölçüm sonuçlarıyla sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan modal analizden elde edilen sonuçların geçerliliğinin kontrol edilmiştir.

İçerisine kauçuk tabakalar yerleştirilmiş grafit epoksi bileşimler kullanılarak oluşturulan malzemeler, roket motor tüplerinde titreşimin azaltılması amacıyla kullanılmaktadır. Telaghani ve Pappa (1996), kauçuk tabakaların modal parametreler üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla grafit epoksi tüpler üzerinde deneysel modal analiz ölçümleri gerçekleştirmişlerdir. Çekiç testi kullanılarak gerçekleştirilen deneysel modal analiz ölçümlerinden elde edilen sonuçlar NASTRAN sonlu elemanlar analiz programıyla elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar neticesinde, bu tip malzemelerin analitik modellerinin geliştirilmesine çalışılmıştır. Deneysel modal analiz ölçüm sonuçlarında kauçuk tabakaların yapısal sönümü arttırdığı ve doğal frekansları ise azalttığı gözlemlenmiştir.

Çolakoğlu ve Köksal (2000), elektronik savunma sistemlerinde, özellikle hareketli platforma monte edilmiş cihazlarda oluşan titreşimleri incelemişlerdir. Doğal frekans analizi için hava harp sistemlerinde kullanılan bir el-kontrol ünitesi seçilmiştir. Bilgisayar ortamında üç boyutlu katı model olarak tasarlanan ünitenin, ANSYS sonlu elemanlar analiz programı yardımıyla doğal frekanslarının ve mod şekillerinin bulunmasında izlenen yol ve elde edilen sonuçlar tartışılmıştır. Sonlu elemanlar analizi ile elde edilen değerler deneysel titreşim yöntemi ile doğrulanmıştır.

Nükleer güç reaktörlerinde yapısal parçaların dinamik güvenilirliği parçanın dinamik karakteristikleri olarak adlandırılan doğal frekansların, sönüm oranlarının ve mod şekillerinin doğru olarak belirlenmesine bağlıdır. Çoğu zaman deneysel veya teorik olarak bu karakteristiklerin belirlenmesi oldukça zordur. Sinha vd. (2003), çalışmalarında deneysel verilerin yorumlanmasında analitik modellemenin önemi üzerinde durmuşlardır.

Stadyumlarda insan kalabalıklarından oluşan titreşim problemlerine olan ilgi günden güne artmaktadır. Fakat bu olay yeterince anlaşılammamaktadır. Reynolds vd. (2004), bu tip yapıların titreşimlerinden daha iyi veri elde edebilmek amacıyla uzaktan kontrol sistemi geliştirmişlerdir. Böylelikle stadyumun seyirciler olması durumundaki davranışının



gözlenebileceği ve bazı istatistiksel güvenilirlik sonuçlarına varılabileceği düşünülmüştür. Çalışmadan elde edilen sonuçlar ışığında, uzaktan kontrol sistemlerinin stadyumların titreşimlerinin gözlenmesinde oldukça başarılı olduğu görülmüştür. Ayrıca insan kalabalıklarının durumlarına bağlı olarak stadyumun modal parametrelerinin değişme gösterdiği de gözlemlenmiştir.

Yao vd. (2002), esnek bir yapı üzerinde insanların hareketinden dolayı oluşan davranışı belirlemek amacıyla bir test düzeneği hazırlamışlardır. Bu düzenek, konsol kirişlerle desteklenmiş tek serbestlik dereceli bir platformdur. Bu düzenekle yapıya uygulanan kuvvet ve yapının ivme olarak tepkileri ölçülebilmektedir.

Yayaların kullanımı amacıyla yapılan köprülerin hem sürekli kullanımda olmaları hem de açık bir ortamda bulunmalarından dolayı, modal testlerin kısa sürede yapılması ve yüksek doğruluk derecesine sahip veriler elde edilmesi istenilmektedir. Bu gibi durumlarda deneysel modal analiz yöntemlerinin fazla olmasından faydalanarak istenilen şartlar sağlanabilir. Pavic ve Reynolds (2002), arazide daha az süre çalışmayla iyi sonuçlar alınabilen bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu yöntem 1 ile 39 Hz aralığında enerjiye sahip geçici bir sinyalin (transient chirp) yapıya elektromanyetik sarsıcı ile uygulanmasını içermektedir.

Bayraktar ve Türker (2005-a, 2005-b), konsol kiriş, düzlem çerçeve ve üç boyutlu çerçeve modellerinin deneysel ve teorik modal analizlerini yapmışlardır. Deneysel modal analiz ölçümleri sonucunda, elde edilen dinamik karakteristikler teorik analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Çalışmadan, deneysel modal analiz yönteminin mevcut yapıların dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde güvenle kullanılabileceği ve deprem güvenliklerinin daha doğru olarak belirlenebileceği sonucuna varılmıştır.

#### **1.4.4. Teorik Modelleri Geliştirmeye Yönelik Çalışmalar**

Brughmans vd. (1995), iki yolcu kapasiteli bir araba karoseri üzerinde deneysel ve teorik modal analiz gerçekleştirmişlerdir. Deneysel modal analiz sonucunda elde edilen sonuçlar, MSC/NASTRAN sonlu elemanlar programıyla elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmış ve araba karoserinin analitik modeli geliştirilmeye çalışılmıştır.

Reynolds vd. (2002), İngiltere'deki York Üniversitesi'nde yeni yapılmış olan yüksek kaliteli döşeme üzerinde deneysel modal analiz ölçümleri gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada, döşemenin yüksek rijitlik ve kütle özellikleri nedeniyle belli sınırlar içerisinde

titreştirilmesi gerektiği belirtilmiştir. Deneysel ve teorik sonuçları karşılaştırmak amacıyla döşemenin sonlu elemanlar yöntemiyle teorik analizi yapılmış ve deneysel sonuçlar kullanılarak sonlu elemanlar modelinde düzeltmeler yapılmıştır.

Ceballos vd. (1998), Arjantin'deki Atucha II NPP reaktör binasının dinamik karakteristiklerini, tesisin sismik özellikleri hakkında bilgi almak ve dört katmanlı bir toprak tabakası üzerine inşa edilen nükleer tesislerin deneysel ve teorik analizleri için yöntemler geliştirmek amacıyla elde etmeye çalışmışlardır. Kararlı durum ve darbe testlerine tabi tutulan yapıda özellikle doğal frekanslar ve modal sönüm oranlarını belirlemek amacıyla darbe testi üzerinde durulmuştur. Teorik analizler, başka bir çalışmada kararlı durum davranışından elde edilen temel rijitlik katsayısı kullanılarak oluşturulan üç boyutlu model üzerinde gerçekleştirilmiştir. Hesaplanan temel rijitlik katsayısı, ölçüm sonuçlarıyla ve eksenel simetrik analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Çalışmadan sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan analizler neticesinde elde edilen temel rijitlik katsayılarının kararlı durum davranışından elde edilenden oldukça düşük olduğu gözlenmiştir.

Wu (2004), laboratuarda 1/10 ölçekli oluşturduğu vinç modelinin sonlu elemanlar modelini geliştirmeyi amaçlamıştır. Bu amaçla, vinç modelinin sonlu elemanlar modeli hazırlanarak teorik analizi ve model üzerinde deneysel modal analiz ölçümleri yapılmıştır. Deneysel sonuçlar kullanılarak sonlu elemanlar modelinde geliştirmeler yapılmıştır. Geliştirilen model kullanılarak yapılan analiz sonuçlarının deneysel sonuçlara oldukça yakın olduğu gözlemlenmiştir.

#### **1.4.5. Çevresel Yükleri Dikkate Alarak Yapılan Çalışmalar**

Hartley vd. (1999), 35m açıklıklı kablolu bir köprü üzerinde deneysel modal analiz ölçümleri gerçekleştirmişlerdir. Deneysel modal analizde yayaların yürüyüşlerinden oluşan titreşimler dikkate alınmıştır. Çalışmadan deneysel ve teorik sonuçlar arasında uyum olduğu görülmüştür.

Çevresel etkilerle titreştirilen bir yapının iki tepki fonksiyonu arasındaki cross korelasyon fonksiyonu, sistemin itme davranış fonksiyonu ile aynı formdadır. Bu nedenle, zaman ortamındaki eğri uydurma işlemleri itme davranış fonksiyonuna uygulanarak yapının doğal frekansları ve modal sönümleri belirlenebilir. Bu yaklaşımda çevresel titreşim kaynağının beyaz gürültü (white noise random process) olduğu kabul edilmektedir.

Farrar ve James III (1997), çevresel titreşim kaynağı olarak trafik yüklerinden oluşan etkileri alarak otoyol köprülerinin rezonans frekanslarını belirlemişler ve elde edilen sonuçları geleneksel deneysel modal analiz sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır. Çalışmadan, yapılarda oluşan çevresel titreşimler kullanılarak yapıların dinamik karakteristiklerinin belirlenebileceği sonucuna varılmıştır.

Yüksek binalar ve köprüler gibi yapıların titreştirilmesi oldukça zor ve maliyetli olduğundan dolayı dinamik özelliklerinin belirlenmesinde rüzgar vb çevresel titreşimlerin kullanılması gerekli görülmektedir. Bonato vd. (1998), yapıların kullanım durumlarında test edilmesinde kullanılan yöntemleri karşılaştırmayı amaçlamışlardır. Bu amaçla, belirsizlik fonksiyonu filtresi yöntemini önermişlerdir. Böylece, yapının kullanım durumundaki modal parametreleri ve lineer olmayan davranışı belirlenebilmiştir.

Yapay titreşimler kullanıldığında, inşaat mühendisliği yapılarını test etmek oldukça pahalı olmakta ve pratik olmamaktadır. Buna karşın, çevresel titreşimler kullanıldığında ise titreşim uygulamak bakımından bir maliyet ortaya çıkmasa da bazı belirsizlikler oluşmaktadır. Çevresel titreşimlerin kullanılması durumunda yapının bütün modları elde edilememektedir. Bu nedenle, referans ölçerlerin kullanılması gerekli olmaktadır. Peeters ve Roeck (1999), stokastik subspace yöntemi ile ilgili referans ölçerler kullanımını içeren yeni bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Bu yaklaşım, rüzgar yükü ile titreştirilen bir radyo verici kulesi üzerinde yapılan ölçümlerde kullanılmış ve sonuçlarla geçerliliği gösterilmiştir.

Mekanik sistemlerin lineer dinamik davranışı, sisteme uygulanan titreşim ve sistemden ölçülen tepkiler kullanılarak belirlenmektedir. Fakat, endüstriyel mekanik sistemler için, sistemin mevcut çalışma durumunda ölçümlerin geleneksel deneysel modal analiz yöntemiyle yapılması zor, hatta imkansızdır. Bu nedenle, bu tip sistemlerin çalışma durumlarından ölçülen sinyallerin kullanılması gerekmektedir. Parloo vd. (2003), traktör üzerine monte edilen püskürtücü seren (sprayer boom) üzerinde geleneksel deneysel modal analiz ve sadece tepkilerin ölçülmesine dayalı deneysel modal analiz yöntemiyle (output-only modal testing) elde edilen sonuçları karşılaştırmışlardır. Bu tip sistemler için sadece tepkilerin ölçülmesine dayalı deneysel modal analiz yöntemiyle elde edilen sonuçların geçerliliği ortaya konulmuştur.

Lord vd. (2003), 48 katlı kayma merkezli betonarme bir binanın dinamik davranışını daha iyi belirleyebilmek amacıyla model geliştirme çalışmaları yapmışlardır. Bu amaçla, çevresel titreşimler kullanılarak sadece tepkilerin ölçülmesine dayalı deneysel modal analiz

yöntemiyle yapılan ölçümler sonucunda elde edilen sonuçlar yapının sonlu elemanlar modelini geliştirmek amacıyla kullanılmıştır. Binanın başlangıç modeli mevcut proje kullanılarak oluşturulmuştur. Modelle ilgili birkaç farklı parametre, deneysel ve teorik sonuçların korelasyonunu arttıracak şekilde değiştirilmiştir. Bu parametrelerin seçilmesine özellikle dikkat edilmiştir. Çalışmadan, sonlu elemanlar modelinin daha esnek olması gerekliliği ile teorik ve deneysel sonuçların denkliği açısından elastisite modülünün azaltılması gerekliliği ortaya çıkmıştır.

Cauberghe vd. (2004), arazideki deneysel modal analiz ölçümlerinden elde edilen kısa ve gürültü içeren sinyallerden modal parametrelerin elde edilmesi amacıyla, gelişmiş en küçük kareler kompleks frekans belirleyici ve gelişmiş en büyük olasılık belirleyici olarak adlandırılan frekans ortamındaki iki belirleyici yöntem sunmuşlardır. Önerilen yöntemler frekans davranış fonksiyonundan başlamakta ve sızma ve geçici etkileri de dikkate almaktadırlar. Teorik ve deneysel sonuçların karşılaştırılmasından, önerilen yöntemlerin modellere ait parametrelerin doğruluk derecesini attırdığı gözlemlenmiştir.

Brincker vd. (2003), sadece tepkilerin ölçülmesine dayalı deneysel modal analiz yönteminin uygulanabilirliğini geleneksel deneysel modal analiz yöntemiyle karşılaştırmalı olarak sunmuşlardır. Sadece tepkilerin ölçülmesine dayalı deneysel modal analiz yöntemiyle çoğu yapı üzerinde kolaylıkla ölçüm yapılabilmesine dikkat çekilmiştir. Ayrıca sadece tepkilerin ölçülmesine dayalı deneysel modal analiz yöntemiyle, geleneksel deneysel modal analiz yöntemine ilave olarak yük tahmini, titreşim seviyesinin belirlenmesi ve yorulma analizleri yapılabildiği belirtilmiştir.

Kharrazi vd. (2002), tarafından ASCE Structural Health Monitoring Task Group'ta çevresel titreşimler dikkate alınarak yapılan deneysel modal analiz ölçüm sonuçlarından hasar tespitini belirlemeye yönelik bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada, 1/3 ölçekte dört katlı çelik çerçeve model üzerinde farklı hasar durumları için çevresel etkileri kullanarak deneysel modal analiz ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Her bir hasar durumu için doğal frekanslar ve mod şekilleri hem zaman hem de frekans ortamında belirlenmiştir. Ayrıca deneysel sonuçlar kullanılarak teorik model üzerinde model geliştirme çalışmaları yapılmıştır.

### 1.5. Tezin İçeriği

Bu alışma, deneysel modal analiz yönteminin inşaat mühendisliği alanındaki gerekliliğini ve uygulanabilirliğini göstermek amacıyla yapılmıştır. lmler için mevcut deneysel modal analiz ölüm cihazı ve ilave ekipmanlarla ölüm yapılabilecek şekilde modeller oluşturulmaya çalışılmıştır. Bu düşünceyle, elik malzeme kullanılarak konsol kiriş, düzlem ereve ve üç boyutlu ereve yapıları temsil edecek şekilde oluşturulan modeller üzerinde deneysel modal analiz ölümleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, deneysel ve teorik analiz sonuçlarının karşılaştırmasını yapabilmek amacıyla llen modellerin sonlu elemanlar yöntemiyle teorik analizleri de yapılmıştır.

Deneysel modal analiz ölümlerinde yapıları titreştirmek amacıyla Brüel&Kjaer Type 8202 eki ve yapıların tepkilerini ölçmek amacıyla B&K Type 4382 ivme ölçer kullanılmıştır. Yapılar üzerinde belirlenen noktalara çekiçle vurularak titreştirme işlemi gerçekleştirilmiş ve çekicinin ucundaki kuvvet ölçerle yapıya uygulanan kuvvet ölçülmüştür. Uygulanan kuvvetten dolayı yapıda oluşan titreşim, yine belirlenen noktalara yerleştirilen ivme ölçerle ölçülmüştür. llen sinyaller B&K 3550 Dual Channel spektrum analiz edicide işlenerek yapılara ait frekans davranış fonksiyonları elde edilmiştir. Deneysel modal analiz ölümleri sonucunda her bir yapı için, llen frekans davranış fonksiyonları ve uygunluk fonksiyonları verilmiştir. Frekans davranış fonksiyonlarının n kontrolleri yapıldıktan sonra, eğri uydurma yöntemleri kullanılarak yapılara ait modal parametreler olan doğal frekanslar, mod şekilleri ve sönüm oranları belirlenmiştir.

Oluşturulan modellerin teorik analizleri sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak SAP2000 programında gerçekleştirilmiştir (SAP2000, 1997). Teorik analizlerde, kiriş elemanlar kullanılarak modellenen yapıların sadece modal analizleri yapılmıştır. Teorik analizde malzemenin lineer elastik ve izotropik bir malzeme olduğu kabul edilmiştir. Teorik analizler neticesinde, yapılara ait doğal frekanslar ve mod şekilleri hesaplanmıştır.

Deneysel ve teorik analizler ile elde edilen doğal frekanslar ve mod şekilleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Daha sonra, deneylerin yapılması sırasında elde edilen deneyimler ile deneysel ve teorik sonuçlarının karşılaştırılmasında varılan sonuçlar ve öneriler sunulmuştur.

## 1.6. Deneysel Modal Analiz Formülasyonu

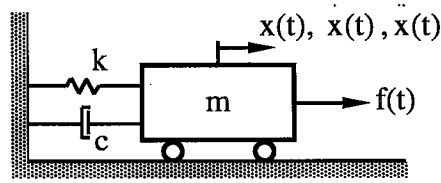
Deneysel modal analiz yöntemi, yapıya uygulanan kuvvetin ve yapının bu etkiye göstermiş olduğu tepkinin ölçülmesi ve etki-tepki fonksiyonları arasında transfer fonksiyonu olarak adlandırılan frekans davranış fonksiyonunun tanımlanması temeline dayanır. Bu nedenle, geleneksel teorik modal analiz formülasyonundan tepki/etki oranı elde edilecek şekilde düzenleme yapılarak deneysel modal analiz formülasyonu elde edilir.

Bu bölümde, tek ve çok serbestlik dereceli sistemlerde frekans davranış fonksiyonlarının elde edilişi verilecektir.

### 1.6.1. Tek Serbestlik Dereceli Sistemler

Çoğu yapı pratikte tek serbestlik derecesine sahip olmamasına rağmen, çok serbestlik dereceli sistemler tek serbestlik dereceli sistemlerin süperpozisyonu olarak hesap edilebilmektedir. Bu nedenle, öncelikle tek serbestlik dereceli sistemlerde frekans davranış fonksiyonlarının elde edilmesi faydalı olacaktır. Tek serbestlik dereceli sistemleri incelerken sönümsüz ve viskoz sönümlü olmaları durumları dikkate alınmıştır.

Tek serbestlik dereceli sistemlerin analitik modeli genel olarak Şekil 1.2'de verilmiştir.



Şekil 1.2. Tek serbestlik dereceli sistemlerin analitik modeli

Tek serbestlik dereceli sistemler için genel hareket denklemi,

$$m \ddot{x}(t) + c \dot{x}(t) + k x(t) = f(t) \quad (1.1)$$

ifadesi ile verilebilir. Burada;  $m$  yapının kütesini,  $c$  yapının sönümünü,  $k$  yapının rijitliğini,  $\ddot{x}(t)$  yapının ivmesini,  $\dot{x}(t)$  yapının hızını,  $x(t)$  yapının yerdeğiştirmesini ve  $f(t)$  ise yapıya uygulanan kuvveti göstermektedir.

### 1.6.1.1. Sönümsüz Tek Serbestlik Dereceli Sistemler

Yapıda sönüm olmaması durumunda analitik model, kütle ve rijitlik elemanlarından oluşur. Bu durumda yapının hareket denklemi,

$$m \ddot{x}(t) + k x(t) = f(t) \quad (1.2)$$

ifadesi ile verilir. Yapının serbest titreşim yaptığı düşünülürse (1.2) hareket denklemi,

$$m \ddot{x}(t) + k x(t) = 0 \quad (1.3)$$

ifadesine döner. Bu denklem çözülürse,

$$k - \omega^2 m = 0 \quad (1.4)$$

ve

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1.5)$$

olarak sönümsüz doğal açısal frekans elde edilir.

Yapının zorlanmış titreşim yaptığı düşünüldüğünde hareket denklemi, (1.2) denkleminde verildiği şekildedir. Bu denklemin çözümü için,

$$f(t) = F e^{i\omega t} \quad (1.6)$$

ve

$$x(t) = X e^{i\omega t} \quad (1.7)$$

olarak kabul edilir ve bu ifadeler (1.2)'deki hareket denkleminde yerine yazılıp düzenlenirse,

$$(k - \omega^2 m) X e^{i\omega t} = F e^{i\omega t} \quad (1.8)$$

ifadesi elde edilir. Bu denklem kullanılarak, zorlanmış titreşim yapan sönümsüz bir yapının frekans davranış fonksiyonu,

$$H(\omega) = \frac{X}{F} = \frac{1}{k - \omega^2 m} \quad (1.9)$$

şeklinde elde edilir.

### 1.6.1.2. Viskoz Sönümlü Tek Serbestlik Dereceli Sistemler

Yapının viskoz sönümlü olması durumunda analitik model kütle, sönüm ve rijitlik elemanlarından oluşur. Bu durumdaki hareket denklemi,

$$m \ddot{x}(t) + c \dot{x}(t) + k x(t) = f(t) \quad (1.10)$$

ifadesiyle verilir. Serbest titreşim durumunda hareket denklemi,

$$m \ddot{x}(t) + c \dot{x}(t) + k x(t) = 0 \quad (1.11)$$

ifadesine dönüşür. Bu denklemin çözümü için,

$$x(t) = X e^{st} \quad (1.12)$$

olduğu kabul edilirse (burada  $s$  karmaşık sayı olmak üzere) ve hareket denklemi düzenlenirse,

$$m s^2 + c s + k = 0 \quad (1.13)$$

denklemini elde edilir. Bu denklem çözülürse,



$$\begin{aligned}
s_{1,2} &= -\frac{c}{2m} \mp \frac{\sqrt{c^2 - 4km}}{2m} \\
&= -\omega\xi \mp i\omega\sqrt{1-\xi^2} \\
&= -\omega\xi \mp i\omega_d
\end{aligned} \tag{1.14}$$

olarak elde edilir. Burada;  $\omega$  sönümsüz doğal açısal frekansı,  $\omega_d$  sönümlü doğal açısal frekansı ve  $\xi$  ise sönüm oranını göstermektedir. Bu ifadede geçen sönümlü doğal açısal frekans ve sönüm oranı,

$$\omega_d = \omega\sqrt{1-\xi^2} \tag{1.15}$$

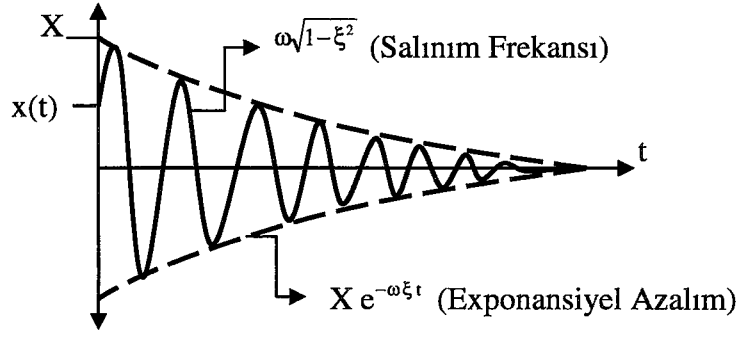
ve

$$\xi = \frac{c}{c_{cr}} = \frac{c}{2\sqrt{km}} \tag{1.16}$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Burada;  $c_{cr}$  kritik sönümü göstermektedir. Bu şekilde elde edilen s değerleri (1.12) denklemindeki yerdeğiştirme ifadesinde yerine yazılırsa,

$$\begin{aligned}
x(t) &= X e^{(-\omega\xi \mp i\omega\sqrt{1-\xi^2})t} \\
&= X e^{-\omega\xi t} e^{i(\omega\sqrt{1-\xi^2})t}
\end{aligned} \tag{1.17}$$

elde edilir. Bu denklemde;  $\omega\xi$  olarak yazılan ifade gerçek kısmı,  $\omega\sqrt{1-\xi^2}$  olarak yazılan ifade ise sanal kısmı gösterir. Sönümlü tek serbestlik dereceli sistemler için serbest titreşim grafiği Şekil 1.3'te verilmiştir.



Şekil 1.3. Sönümlü tek serbestlik dereceli sistemler için serbest titreşim grafiği

Yapının zorlanmış titreşim yaptığı düşünüldüğünde, hareket denklemi (1.10) denkleminde verildiği şekildedir. Bu denklemin çözümü için,

$$f(t) = F e^{i\omega t} \quad (1.18)$$

ve

$$x(t) = X e^{i\omega t} \quad (1.19)$$

olarak kabul edilirse ve bu ifadeler (1.10) hareket denkleminde yerine yazılıp düzenlenirse,

$$(-\omega^2 m + i \omega c + k) X e^{i\omega t} = F e^{i\omega t} \quad (1.20)$$

denklemini elde edilir. Bu denklemden, zorlanmış titreşim yapan viskoz sönümlü bir yapının frekans davranış fonksiyonu,

$$H(\omega) = \alpha(\omega) = \frac{1}{(k - \omega^2 m) + i(\omega c)} \quad (1.21)$$

şeklinde elde edilir. Frekans davranış fonksiyonunun genlik ve faz açısı,

$$|\alpha(\omega)| = \frac{|X|}{|F|} = \frac{1}{\sqrt{(k - \omega^2 m)^2 + (\omega c)^2}} \quad (1.22)$$

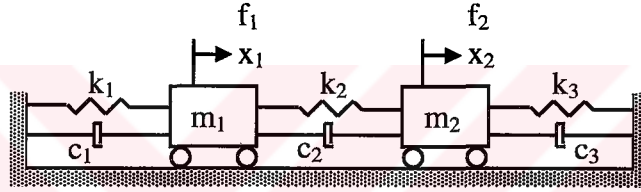
ve

$$\angle\alpha(\omega) = \angle X - \angle F = \text{tg}^{-1}(-\omega c / (k - \omega^2 m)) = -\theta_\alpha \quad (1.23)$$

ifadesiyle elde edilir. Burada;  $|\alpha(\omega)|$  ve  $\theta_\alpha$  sırasıyla receptance formundaki frekans davranış fonksiyonuna ait genlik ve faz değerini göstermektedir.

### 1.6.2. Çok Serbestlik Dereceli Sistemler

Çok serbestlik dereceli sistemleri temsil etmek amacıyla iki serbestlik dereceli bir sistemin analitik modeli Şekil 1.4'te verilmiştir.



Şekil 1.4. İki serbestlik dereceli bir sistemin analitik modeli

N serbestlik derecesine sahip bir sisteme ait genel hareket denklemi,

$$[M] \{\ddot{x}(t)\} + [C] \{\dot{x}(t)\} + [K] \{x(t)\} = \{f(t)\} \quad (1.24)$$

bağıntısıyla verilebilir. Burada,  $[M]$ ,  $[C]$  ve  $[K]$  sırasıyla çok serbestlik dereceli sistemin kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini ve  $\{\ddot{x}(t)\}$ ,  $\{\dot{x}(t)\}$ ,  $\{x(t)\}$  ve  $\{f(t)\}$  ise sırasıyla çok serbestlik dereceli sistemin zamana bağlı ivme, hız, yerdeğiştirme ve kuvvet vektörlerini göstermektedirler.

#### 1.6.2.1. Sönümsüz Çok Serbestlik Dereceli Sistemler

Yapıda sönüm olmaması durumunda, analitik model kütle ve rijitlik terimleriyle ifade edilir. Bu durumda hareket denklemi,

$$[M] \{\ddot{x}(t)\} + [K] \{x(t)\} = \{f(t)\} \quad (1.25)$$

bağıntısıyla verilir. Yapının doğal frekanslarını veya modal özelliklerini bulmak için yapının serbest titreşim yaptığı düşünülürse, bu durumda hareket denklemi,

$$[M] \{\ddot{x}(t)\} + [K] \{x(t)\} = \{0\} \quad (1.26)$$

olarak verilir. Bu denklemin çözümü için,

$$\{x(t)\} = \{X\} e^{i\omega t} \quad (1.27)$$

olduğu varsayılır. Burada;  $\{X\}$   $N \times 1$  boyutunda zamandan bağımsız genliği göstermektedir.

Düzenleme yapılarak (1.26) denklemi çözülürse,

$$([K] - \omega^2 [M]) \{X\} e^{i\omega t} = \{0\} \quad (1.28)$$

denklemi elde edilir. Bu denklemin sıfırdan farklı çözümü için,

$$\det|[K] - \omega^2 [M]| = 0 \quad (1.29)$$

olmalıdır. Bu denklemin çözümünden  $N$  serbestlik derecesi kadar sönümsüz doğal açılal frekans (öz vektör)  $(\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_N)$  elde edilir. Her bir doğal frekansa karşılık yapının almış olduğu şekil, mod şekli olarak tanımlanır. Doğal frekansların küçükten büyüğe doğru sıralanması sonucunda elde edilen en küçük frekans temel frekans ve bu frekansa karşılık gelen mod şekli temel mod şekli olarak adlandırılır (Petyt, 1990).

Analitik modelin analizi ile modal modele ait ifadeler elde edilmiş olur. Modal model ortogonalite şartlarını taşımaktadır. Bu şartlar,

$$[\Psi]^T [M] [\Psi] = [m_r] \quad (1.30)$$

$$[\Psi]^T [K] [\Psi] = [k_r] \quad (1.31)$$

$$[\omega_r^2] = [m_r]^{-1} [k_r] \quad (1.32)$$

olarak elde edilir. Burada;  $[\Psi]$  modal mod şekil matrisini,  $[m_r]$  modal (veya genelleştirilmiş) kütle matrisi,  $[k_r]$  modal (veya genelleştirilmiş) rijitlik matrisini ve  $[\omega_r^2]$  doğal açısal frekansın karesini göstermektedir.

Normalleştirme işlemi için birkaç yöntem olmasına rağmen, burada deneysel modal analiz ile ilgili olduğundan dolayı kütle normalleştirilmesi yapılacaktır. Böylece kütleyle normalleştirilmiş öz vektörler  $[\phi]$  olarak elde edilir. Bu öz vektörlere ortogonalite şartları uygulanırsa,

$$[\phi]^T [M] [\phi] = [I] \quad (1.33)$$

ve

$$[\phi]^T [K] [\phi] = [\omega_r^2] \quad (1.34)$$

olarak elde edilir. Normalleştirilmiş mod şekilleri ile modal mod şekli arasındaki bağıntı,

$$\{\phi\} = \frac{1}{\sqrt{m_r}} \{\Psi\}_r \quad (1.35)$$

veya

$$[\phi] = [\Psi] [m_r]^{-1/2} \quad (1.36)$$

olarak elde edilir. Ortogonalite özelliği ispatlamak mümkündür. Bunun için, r. moda ait hareket denklemi,

$$([K] - \omega_r^2 [M]) \{\Psi\}_r = \{0\} \quad (1.37)$$

şeklinde yazılır ve bu ifade başka bir modal mod vektörünün transpozesi ile önden çarpılırsa,

$$\{\Psi\}_s^T ([K] - \omega_r^2 [M]) \{\Psi\}_r = \{0\} \quad (1.38)$$

ifadesi elde edilir. Aynı şekilde s. moda ait hareket denklemi yazılırsa,

$$([K] - \omega_s^2 [M]) \{\Psi\}_s = \{0\} \quad (1.39)$$

ve bu ifadenin transpozu sondan r. modal mod vektörü ile çarpılırsa,

$$\{\Psi\}_s^T ([K]^T - \omega_s^2 [M]^T) \{\Psi\}_r = \{0\} \quad (1.40)$$

olarak elde edilir. Burada  $[M]$  ve  $[K]$  matrisleri simetrik olduğundan dolayı transpozeleri aynıdır. (1.38) ve (1.40) denklemleri birlikte değerlendirildiğinde,

$$(\omega_r^2 - \omega_s^2) \{\Psi\}_s^T [M] \{\Psi\}_r = \{0\} \quad (1.41)$$

ifadesi elde edilir.  $\omega_r \neq \omega_s$  olabilmesi için,

$$\{\Psi\}_s^T [M] \{\Psi\}_r = \{0\}, \quad r \neq s \quad (1.42)$$

şartının sağlanması gerekmektedir. Aynı şekilde,

$$\{\Psi\}_s^T [K] \{\Psi\}_r = \{0\}, \quad r \neq s \quad (1.43)$$

şartının da sağlanması gerekmektedir.  $r = s$  olduğu durumda (1.42) ve (1.43) bağıntıları gerçekleşemez. Fakat (1.38) bağıntısından,

$$\left( \{\Psi\}_r^T [K] \{\Psi\}_r \right) = \omega_r^2 \left( \{\Psi\}_r^T [M] \{\Psi\}_r \right) \quad (1.44)$$

elde edilir. Burada,

$$\{\Psi\}_r^T [\mathbf{M}] \{\Psi\}_r = m_r \quad (1.45)$$

ve

$$\{\Psi\}_r^T [\mathbf{K}] \{\Psi\}_r = k_r \quad (1.46)$$

olduğundan,

$$\omega_r^2 = \frac{k_r}{m_r} \quad (1.47)$$

olarak elde edilir.

Yapının tepki modelini oluşturmak için yapının aynı frekansta fakat değişen genlik ve fazda sinüzoidal bir kuvvetle titreştirildiği düşünülürse, bu durumda kuvvet ve yerdeğiştirme vektörleri sırasıyla,

$$\{f(t)\} = \{F\} e^{i\omega t} \quad (1.48)$$

ve

$$\{x(t)\} = \{X\} e^{i\omega t} \quad (1.49)$$

olarak kabul edilir. Burada  $\{F\}$  ve  $\{X\}$   $N \times 1$  boyutunda zamandan bağımsız kompleks genlikli vektörlerdir. (1.48) ve (1.49) ifadeleri (1.25) hareket denkleminde yerine yazılır ve düzenleme yapılırsa,

$$([\mathbf{K}] - \omega^2 [\mathbf{M}]) \{X\} e^{i\omega t} = \{F\} e^{i\omega t} \quad (1.50)$$

elde edilir. Bilinmeyen tepkinin çözümü için bu ifade tekrar düzenlenirse,

$$\{X\} = ([\mathbf{K}] - \omega^2 [\mathbf{M}])^{-1} \{F\} \quad (1.51)$$

ve

$$\{X\} = [\alpha(\omega)] \{F\} \quad (1.52)$$

elde edilir. Burada  $[\alpha(\omega)]$   $N*N$  boyutunda receptance formunda frekans davranış fonksiyonudur.

### 1.6.3. Frekans Davranış Fonksiyonlarının Özellikleri

#### 1.6.3.1. Değişik Formdaki Frekans Davranış Fonksiyonları

(1.9), (1.21) ve (1.52) ifadelerinde tanımlanan frekans davranış fonksiyonları yerdeğiştirmeye bağımlı olarak hesaplanmıştır ve receptance formundaki frekans davranış fonksiyonları olarak adlandırılmaktadırlar.

Yapının tepkileri yerdeğiştirme olarak ölçülebileceği gibi hız ve ivme olarak ta ölçülebilir. Yapının tepkilerinin hız olarak ölçülmesi durumunda frekans davranış fonksiyonu,

$$Y(\omega) = \frac{V e^{i\omega t}}{F e^{i\omega t}} = \frac{V}{F} \quad (1.53)$$

olarak tanımlanır ve mobility formundaki frekans davranış fonksiyonu olarak adlandırılır. Yerdeğiştirme ifadesi kullanılarak hız ifadesi,

$$x(t) = X e^{i\omega t} \quad (1.54)$$

$$v(t) = \dot{x}(t) = i \omega X e^{i\omega t} \quad (1.55)$$

olarak elde edilir. Buradan, mobility formundaki frekans davranış fonksiyonu,

$$Y(\omega) = \frac{V}{F} = i \omega \frac{X}{F} = i \omega \alpha(\omega) \quad (1.56)$$



şeklinde receptance formundaki frekans davranış fonksiyonuna bağımlı olarak elde edilir. Benzer şekilde genlik ve faz değerleri de,

$$|Y(\omega)| = \omega |\alpha(\omega)| \quad (1.57)$$

ve

$$\theta_y = \theta_\alpha - 90^\circ \quad (1.58)$$

olarak belirlenir. Burada;  $|Y(\omega)|$  ve  $\theta_y$  sırasıyla mobility formundaki frekans davranış fonksiyonuna ait genlik ve faz değerini göstermektedir.

Yapının tepkilerinin ivme olarak ölçülmesi durumunda ise frekans davranış fonksiyonu receptance formundaki frekans davranış fonksiyonuna bağılı olarak,

$$A(\omega) = \frac{A}{F} = -\omega^2 \alpha(\omega) \quad (1.59)$$

olarak tanımlanır ve accelerance (inertance) formundaki frekans davranış fonksiyonu olarak adlandırılır. İvmeye bağımlı olarak elde edilen bu frekans davranış fonksiyonu formu en çok kullanılan formdur.

Receptance, mobility ve accelerance olarak adlandırılan bu üç frekans davranış fonksiyonu temel frekans davranış fonksiyonu formlarıdır. Bu frekans davranış fonksiyonlarının tersleri de tanımlanır. Bunlar,

$$\frac{\text{Kuvvet}}{\text{Yerdeğiştirme}} = \text{Dinamik Rijitlik}$$

$$\frac{\text{Kuvvet}}{\text{Hız}} = \text{Mekanik İmpedance}$$

$$\frac{\text{Kuvvet}}{\text{İvme}} = \text{Görünen Kütle}$$

olarak tanımlanır. Tüm frekans davranış fonksiyonu formları Tablo 1.1'de sunulmaktadır.

Tablo 1.1. Frekans davranış fonksiyonu formları

Davranış Parametresi	Tepki / Etki	Etki / Tepki
Yerdeğiştirme	Receptance	Dinamik Rijitlik
Hız	Mobility	Mekanik İmpedance
İvme	Accelerance	Görünen Kütle

### 1.6.3.2. Frekans Davranış Fonksiyonlarının Grafiksel Görüntülenmesi

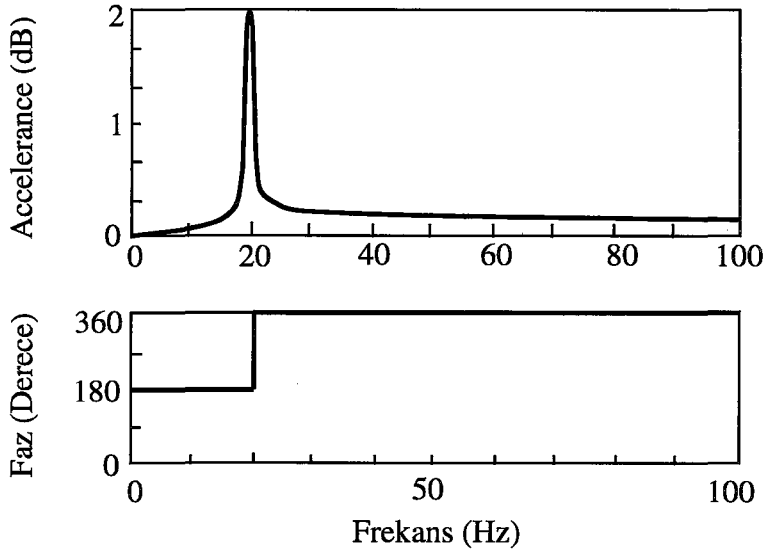
Frekans davranış fonksiyonları kompleks sayısal ifadeler olduğundan dolayı sadece bir formatta grafik olarak çizilemez. Frekans davranış fonksiyonlarının grafik olarak gösterimi üç farklı şekilde yapılabilmektedir. Bunlar,

- Frekans davranış fonksiyonunun genlik ve faz değerlerinin çizilmesi (Bode diyagramları),
- Frekans davranış fonksiyonunun reel ve sanal kısımlarının çizilmesi,
- Frekans davranış fonksiyonunun reel ve sanal kısımlarının Nyquist grafiklerinin çizilmesi

olarak sıralanabilir.

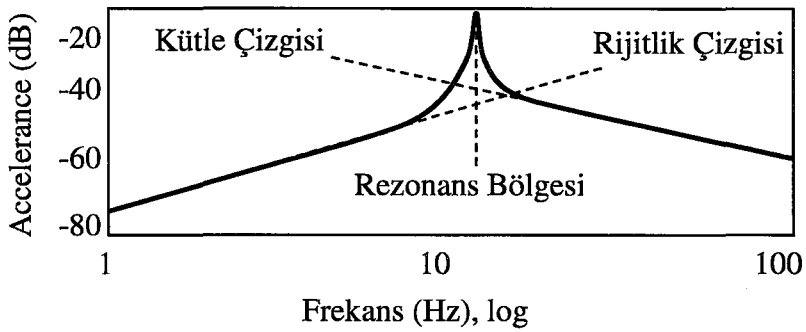
#### 1.6.3.2.1. Genlik ve Faz Değerlerinin Çizilmesi (Bode Diyagramları)

Sönümsüz tek serbestlik dereceli bir sistem için tipik bir accelerance formundaki frekans davranış fonksiyonu ve faz grafiği Şekil 1.5'te gösterilmektedir. Şekil 1.5'teki grafiklerden yapının doğal frekanslarına karşılık gelen kısımlarda frekans davranış fonksiyonunun tepe oluşturduğu ve tepe noktasında faz değerinde değişme olduğu görülmektedir. Frekans davranış fonksiyonundaki tepeler yapının sönümü azaldıkça daha sivri olurken, yapının sönümü arttıkça daha yuvarlak hale gelmektedir.



Şekil 1.5. Sönümsüz tek serbestlik dereceli bir sistem için tipik frekans davranış fonksiyonu ve faz grafiği

Verilerin uzun olması durumunda frekans davranış fonksiyonlarının logaritmik olarak çizilmesi daha uygun olmaktadır. Bu durumda frekans davranış fonksiyonu üç bölüme ayrılabilir. Birinci bölüm düşük frekanslı rijitlik çizgisi bölümü, ikinci bölüm rezonans bölümü ve üçüncü bölüm yüksek frekanslı kütle çizgisi bölümüdür. Şekil 1.6'da tipik bir frekans davranış fonksiyonunun logaritmik olarak çizilmesi gösterilmektedir.

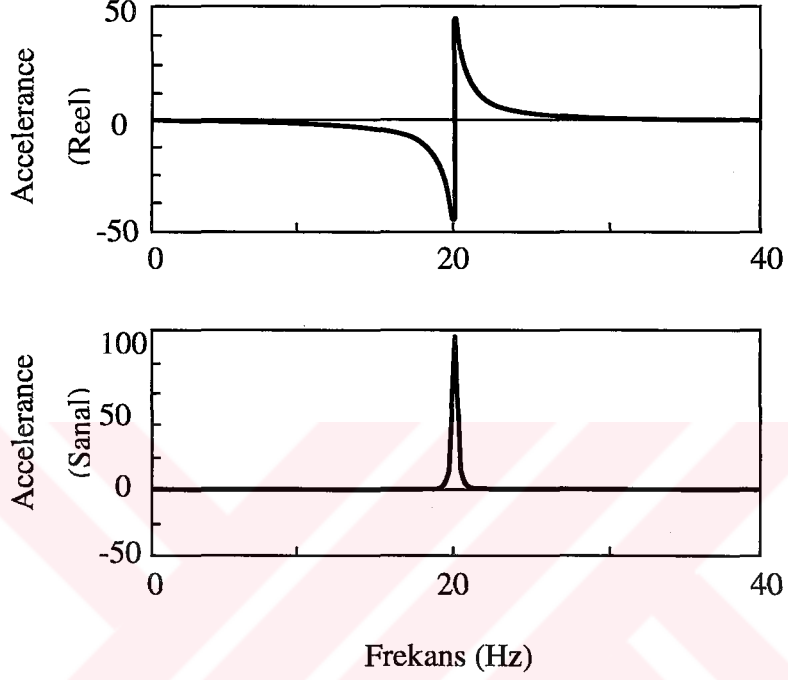


Şekil 1.6. Frekans davranış fonksiyonunun logaritmik olarak çizilmesi

Frekans davranış fonksiyonlarının genlik ve faz değerlerinin grafik olarak çizilmesi en yaygın kullanılan yöntemdir. Çünkü bu yöntem sönümlü ve sönümsüz bütün sistemlere uygulanabilirken, diğer yöntemler sadece sönümlü sistemlere uygulanabilmektedir.

### 1.6.3.2.2. Reel ve Sanal Kısımların Çizilmesi

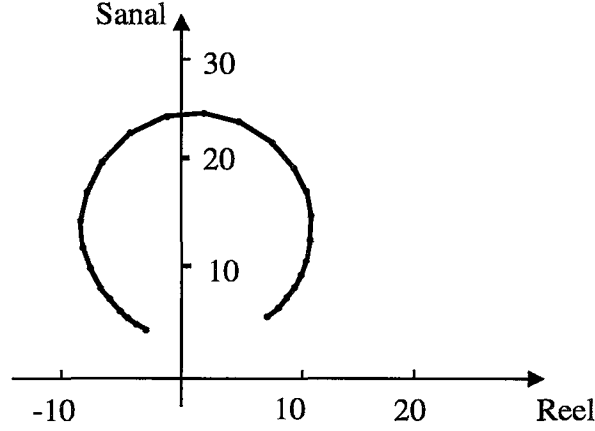
Sönüm oranı %1'den düşük olan bir sistem için tipik bir frekans davranış fonksiyonuna ait reel ve sanal kısımlar Şekil 1.7'de gösterilmiştir.



Şekil 1.7. Sönüm oranı %1'den düşük olan bir sistem için tipik bir frekans davranış fonksiyonunun reel ve sanal kısımları

### 1.6.3.2.3. Reel ve Sanal Kısımların Nyquist Grafiklerinin Çizilmesi

Nyquist grafikleri, frekans davranış fonksiyonlarının rezonans bölgelerinin görüntülenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tip çizimde genellikle daireye benzer bir grafik oluşur. Yapının rezonans frekansı, eğri üzerine belirli artımlarla özel noktalar ilave edilerek belirlenir. Şekil 1.8'de tipik bir frekans davranış fonksiyonuna ait Nyquist grafiği görülmektedir.



Şekil 1.8. Frekans davranış fonksiyonunun reel ve sanal kısımlarının Nyquist grafiği

Şekil 1.8'deki grafikten sadece rezonansa yakın frekansların açıkça belirlenebileceği görülmektedir. Çünkü bu alandan uzaktaki noktalar birbirine çok yakındır ve değerleri tam olarak belirlenemez. Bu özellik Nyquist grafiklerinin en önemli özelliğidir.

### 1.7. Deneysel Modal Analiz Ölçümleri

Bu bölümde deneysel modal analizde kullanılan ölçüm yöntemlerinden bahsedilmiştir. Bunun için öncelikle titreşim ölçüm yöntemleri hakkında genel bir bilgi sahibi olmak faydalı olacaktır. Başlıca iki tip titreşim ölçüm yöntemi mevcuttur. Bunlar,

- Sadece bir parametrenin belirlendiği ölçümler (genellikle tepki seviyesi),
- Hem etki (input) hem de tepki (output) seviyesinin belirlendiği ölçümler,

olarak iki kısma ayrılır.

Deneysel modal analiz ile ilgili temel bağıntı,

$$\boxed{\text{Tepki}} = \boxed{\text{Yapı Özelliği}} \times \boxed{\text{Etki}}$$

şeklinde temsil edilmektedir. Bu ifadeden de görüldüğü gibi etki ve tepki fonksiyonları tam olarak ölçüldüğünde yapı tamamen tanımlanabilir. Eğer sadece yapının tepkisini ölçülürse, bu durumda özellikle büyük tepki seviyelerinin yapıda güçlü bir titreşimden oluşan bir tepki mi yoksa yapının bir rezonansı mı olduğunu söylemek zordur.

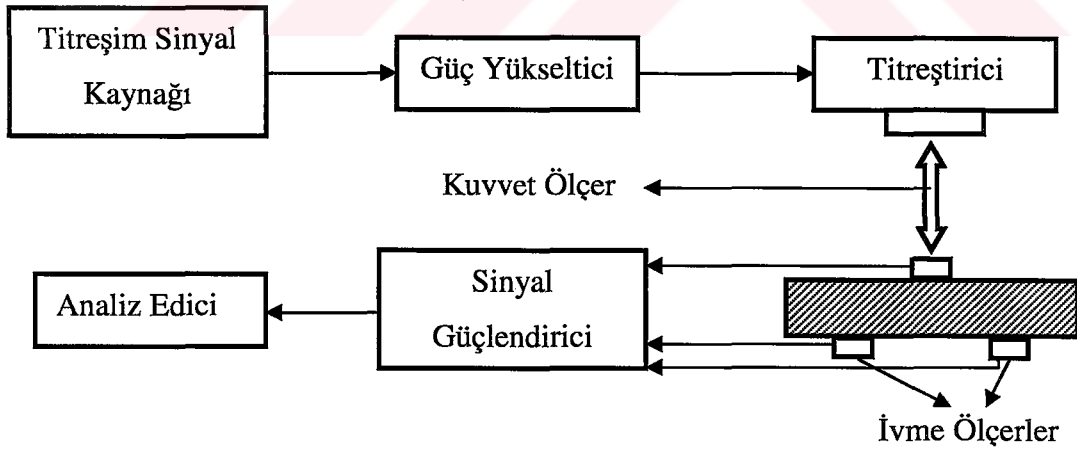
Bu bölümde, ikinci tip ölçüm yöntemi üzerinde durulacaktır. Bu yöntemde yapıya uygulanan titreşim ve yapının tepkileri eşzamanlı olarak ölçülmekte ve yapı özellikleri yukarıda verilen temel bağıntı ile hesaplanabilmektedir. Bu ölçüm yöntemi de tek ve çok noktadan titreşim olmak üzere iki farklı şekilde uygulanabilmektedir. Bu bölümde, tek noktadan titreşim (single-point excitation) yöntemi üzerinde durulacaktır. Tek noktadan titreşimde yapıya sadece belirlenen bir noktadan titreşim uygulanmaktadır.

### 1.7.1. Temel Ölçüm Sistemi

Deneyisel modal analiz ölçümlerinde kullanılan ölçüm düzeneği temelde oldukça basittir. Ölçüm düzeneği, kullanılan cihazlar değişse de, başlıca üç elemandan oluşmaktadır. Bunlar,

- Titreştirici
- Ölçüm Sistemi
- Analiz Edici

şeklinde sıralanabilir. Şekil 1.9'da deneyisel modal analizde kullanılan genel bir ölçüm düzeneği gösterilmiştir.



Şekil 1.9. Deneyisel modal analiz yönteminde genel bir ölçüm düzeneği

Bu ölçüm düzeneğine gelişen teknoloji sayesinde ilave elemanlar bağlamak mümkündür. Ölçümlerde çoğu olay birbirini tekrarladığından dolayı, ölçümler bilgisayar yardımıyla çok daha rahat ve güvenilir yapılabilmektedir.

Ölçüm düzeneğinin temel elemanlarını daha detaylı incelemek gerekirse;

- a) Titreşim Sinyal (Güç) Kaynağı: Yapıyı titreştirmek için kullanılacak sinyalin üretilmesini sağlar. Titreşim sinyali, ölçülecek yapı türüne bağlı olarak belirlenmektedir. Olası titreşim kaynakları aşağıda verilmiştir.
  - Sinüzoidal Titreşim (Titreştirici kullanılarak üretilir)
  - Rasgele (random) Titreşim (Gürültü üretici kullanılarak üretilir)
  - Geçici (transient) Titreşim (Çekiç gibi darbe üreticiler kullanılarak üretilir)
  - Periyodik Titreşim (İstenilen frekansta titreşim üretebilen sarsıcı cihazlar kullanılarak üretilir)
- b) Güç Yükseltici: Titreşim sinyalini güçlendirmek amacıyla kullanılırlar. Kullanılan titreşim sinyal kaynağı türüne bağlı olarak seçilir ve kullanılır.
- c) Titreştirici: Üretilen titreşim sinyalini yapıya uygulamak amacıyla kullanılan cihazlardır. Birçok titreştirici mevcut olmasına rağmen yaygın olarak ve başarılı bir şekilde kullanılan iki tip titreştirici vardır. Bunlar yapıyı sarsıcı (shaker) bağlayarak titreştirmek veya çekiç ile darbe uygulayarak titreştirmektir. Diğer titreşim türleri ise başlangıç şartları uygulayarak titreştirmek ve rüzgâr, dalga ve taşıt etkilerini kullanarak titreştirmek şeklinde sayılabilir. Bu yöntemler geleneksel yöntemlerin mümkün olmadığı durumlarda kullanılan özel yöntemlerdir.
- d) Kuvvet ve İvme Ölçerler: Yapıya uygulanan kuvveti ve yapının bu kuvvete gösterdiği tepkiyi ölçmek için kullanılırlar. Çeşitli kuvvet ölçer ve ivme ölçer mevcut olmasına rağmen çoğunlukla piezoelektrik ölçerler yaygın olarak kullanılmaktadır.
- e) Sinyal Güçlendirici: Sinyal güçlendiricinin görevi ölçerlerden gelen sinyalleri analiz edicinin kullanabileceği değerlere kadar güçlendirmektir. Sinyal güçlendirici kullanılan ölçer tipine bağlı olarak seçilir.
- f) Analiz Edici: Analiz edicinin görevi, titreşim kuvvetinin ve tepkinin şiddetini belirlemek için ölçerlerden gelen sinyallerin değerini belirlemektir. Aslında çok özel bir voltmetredir. Farklı birçok tür analiz edici mevcuttur. Analiz ediciler kullanılan titreşim sinyali türüne bağlı olarak belirlenir. Genellikle Spektrum

Analiz Edici ve Frekans Tepki Analiz Edici olmak üzere iki tip cihaz yaygın olarak kullanılmaktadır.

### **1.7.2. Yapının Hazırlanması**

Yapıların ölçümleri birkaç farklı şekilde yapılabilmektedir. Bu bölümde bu ölçüm yöntemleri incelenmiştir.

Deneysel modal analiz yöntemiyle ölçüm işleminin ilk adımı yapının ölçüm işlemi için hazırlanmasıdır. Bu ilk adıma genellikle yeterince önem verilmemekte ve bunun sonucunda bazı hatalar oluşabilmektedir. Ölçüm işlemi için verilmesi gereken ilk karar, yapının hangi durumda test edileceğidir. Yapılar serbest ve ankastre ölçüm durumları olmak üzere iki farklı durumda test edilebilirler.

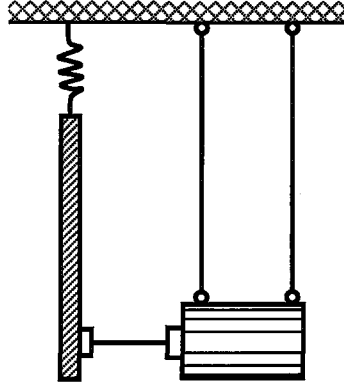
#### **1.7.2.1. Serbest Ölçüm Durumu**

Serbest ölçüm durumu ile anlatılmak istenen yapının herhangi bir noktadan zemine bağlanmadığı, yani havada asılı durumda olduğudur. Teorik olarak her yapı sıfır doğal frekans değerine sahip olan altı tane rijit atalet moduna sahiptir. Serbest ölçüm durumunda yapı, kütle ve rijitlik matrisleri kullanılarak hesaplanan rijit atalet modlarını gösterir. Bu modların içerisinde eğilme modları yoktur. Serbest durumda yapıyı test ederek yapının rijit atalet modları elde edilebilir.

Pratikte serbest ölçüm durumunun sağlanması mümkün değildir; fakat genellikle askı elemanları veya yay elemanlar kullanılarak bu şart sağlanmaya çalışılır (Levent vd., 2003). Bu amaçla ölçümü yapılacak yapı çok yumuşak yaylarla desteklenir. Bu durumda rijit atalet modlarının frekans değerleri sıfır değildir; fakat eğilme modlarının frekans değerlerinden çok düşüktür. Eğer bu tip askıda bir sistem oluşturulursa, ölçümü yapılan yapının eğilme modları üzerine önemli bir etki yapılmaksızın yapının düşük frekanslı davranışından rijit atalet özellikleri elde edilebilir. Askıda ölçümün yapının eğilme modlarına etkisini en aza indirmek amacıyla alınması gereken en önemli önlem, askıların ilgili moda ait düğüm noktalarına mümkün olduğunca yakın bağlanmasıdır. Ayrıca ölçümlerde askıdan dolayı ilave sönüm oluşmamasına önem gösterilmelidir.



Bu tip ölçüm için belirtilmesi gereken son husus, askı tellerinin titreşim doğrultusuna dik olması gerektiğidir. Şekil 1.10'da serbest ölçüm durumuna ait genel bir ölçüm düzeneği görülmektedir.



Şekil 1.10 Serbest ölçüm durumu

### 1.7.2.2. Ankastre Ölçüm Durumu

Ankastre ölçüm durumunda yapı belirlenen noktalardan zemine veya sabit bir yüzeye bağlanmaktadır. Teorik olarak ankastre durumda yapının analizi kolay olmasına rağmen ölçüm işlemi için gerekli ankastre şartlarının gerçekte sağlanmasında bazı zorluklar mevcuttur. Bütün yapılar tamamıyla ankastre mesnet şartlarına sahip olmadığından, ilave önlemler almaksızın ankastre durumu sağlamak zordur. Bu durumda yapılması gereken, yapının ölçüleceği frekans aralığında yapının mesnetleneceği yüzeyin ölçülmesidir. Eğer bu ölçümden elde edilen sonuçlar yapının frekanslarından çok küçükse yüzeyin sabit bir yüzey olduğu ve bu yüzeye yapılacak bağlantının ankastre şartları sağladığı kabul edilir. Ayrıca ölçümü yapılan noktalarda dönmeler de oluşabilmekte ve ölçüm sonuçları olumsuz etkilenmektedir. Bu durumda, yapıların serbest durumda ölçülmesinin daha uygun olduğu düşünülebilir. Fakat, gerçekte büyük test parçaları ve inşaat mühendisliği yapıları dikkate alındığında, bu yapıların serbest durumda ölçüm yapılması imkânsızdır. Burada dikkate alınması gereken bir husus ta, ölçümün yapıldığı ortamdır. Yani, ölçülecek yapının ve/veya parçanın çalışma durumundaki frekanslarının belirlenmesine çalışıldığına göre yapının bu durumunu en iyi temsil edecek ölçüm durumunun seçilmesi gerekmektedir. Örneğin, bir türbin bıçağı dikkate alındığında ilgili titreşim modları, serbest duruma göre ankastre durumda gerçeğe daha yakın olarak elde edilmektedir.

Yapıların ankastre durumdaki özellikleri serbest durumdaki ölçümden elde edilebilir, ancak serbest durumdaki özellikleri ankastre durumdaki ölçümden elde edilemez. Bunun nedeni ise serbest durumun daha fazla serbestlik içermesidir.

### **1.7.3. Yapının Titreştirilmesi**

Yapıları titreştirmek için çok değişik cihazlar vardır ve bunların bazıları yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu titreşim cihazları, ölçüm boyunca yapıya temas eden ve etmeyenler olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Birinci tip cihazlar bütün ölçüm boyunca yapıyla temas halindedir. İkinci tip cihazlar ise, ölçüm boyunca ya yapıyla hiçbir teması olmayan ya da yapıyla kısa süreli teması olan cihazlardır. Yapıyla sürekli temas halinde olan cihazlara mekanik titreştiriciler (shaker), yapıyla kısa süreli temas halinde olan cihazlara çekiçler ve yapıyla hiçbir teması olmayan cihazlara elektromanyetik titreştiriciler örnek olarak verilebilir.

#### **1.7.3.1. Sarsıcılar Kullanılarak Yapının Titreştirilmesi**

Yaygın olarak kullanılmakta olan titreştiricileri,

- Mekanik Titreştiriciler
- Elektro Hidrolik Titreştiriciler

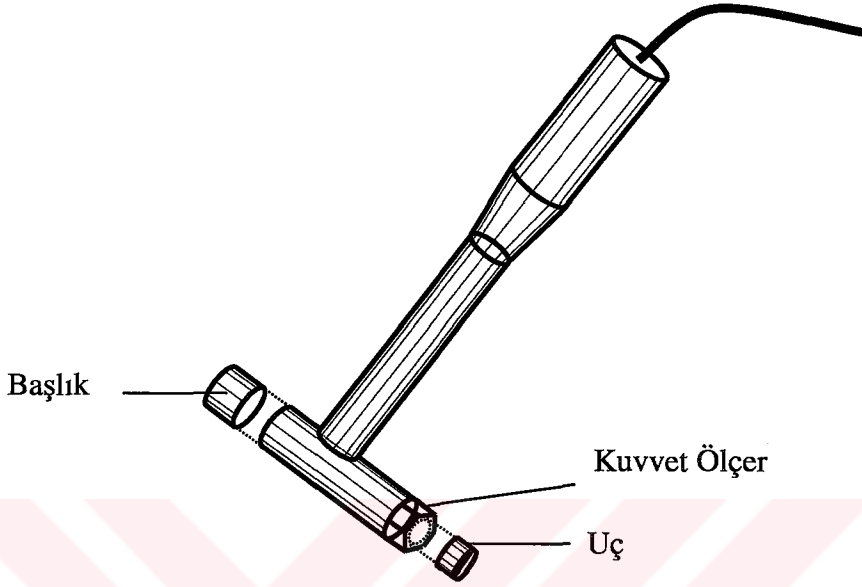
şeklinde gruplandırmak mümkündür. Bunların her birinin avantaj ve dezavantajları olmasına rağmen, özel kullanım alanlarına sahiptirler.

#### **1.7.3.2. Çekiç veya Darbe Titreştirici Kullanılarak Yapının Titreştirilmesi**

Yapıların ve/veya parçaların titreştirilmesinde yaygın olarak kullanılan diğer bir yöntem, çekiç kullanarak yapılara darbe uygulamaktır. Bu yöntem ölçüm aşamasında daha fazla özen gerektirmesine rağmen, çekiç kullanılarak yapıların titreştirilmesi oldukça kolaydır.

Bu yöntemde yapıyı titreştirmek için kullanılan cihaz sadece bir çekiçten ibarettir. Çekicinin başlığı ve ucu değiştirilerek farklı frekans seviyelerinde titreşimler üretilir. Şekil 1.11'de kullanılmakta olan çekiçlere bir örnek verilmektedir. Ayrıca farklı boyutlardaki

çekiçler kullanılarak çekiç titreşiminin kullanım alanı genişletilebilir. Çekiçle yapıya uygulanan kuvvet, çekicinin ucuna yerleştirilen kuvvet ölçerle ölçülür ve ölçülen bu kuvvetin yapıya uygulanan kuvvete eşit olduğu kabul edilir.

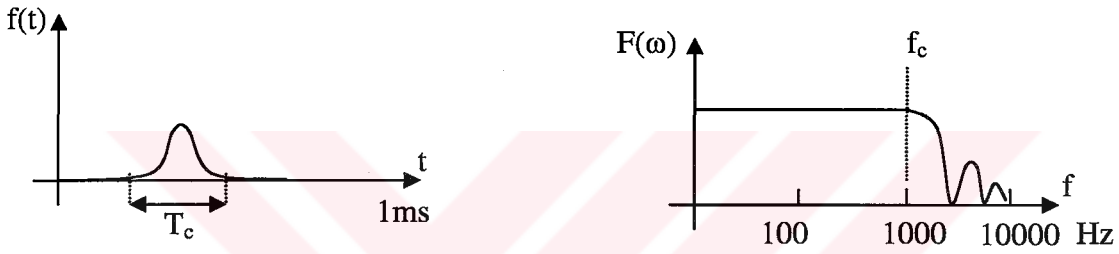


Şekil 1.11. Yaygın olarak kullanılan çekiç türü

Çekiçle uygulanan etkinin büyüklüğü, çekiç başlığının kütlesine ve çekicinin yapıya vurulduğu andaki hızına bağlı olarak belirlenir. Ölçümü yapan yani çekici kullanan kişi uygulanan kuvvetten daha ziyade vuruş hızını kontrol edebilmektedir. Dolayısıyla istenilen seviyede kuvvet uygulamak için en uygun yol çekicinin başlığının kütlesini değiştirmektir.

Bu tip cihazlar kullanılarak üretilen frekans aralığı, çekicinin başlığının kütlesine ve temas yüzeyinin rijitliğine bağlı olarak belirlenir. Temas yüzeyi rijitliğinin çekicinin kütlesine oranının karekökü olarak verilen ifade ile hesaplanan frekans değeri sistem rezonansı olarak adlandırılır ve bu frekansın üzerindeki frekanslarda yapıya enerji aktarımı zordur. Çekicinin ucu ölçülecek sisteme vurulduğu zaman yarım sinüs dalgasına benzer bir kuvvet etkisi oluşturur (Şekil 1.12a). Bu tip bir etki Şekil 1.12b’de gösterilen formda bir frekans içeriğine sahiptir. Şekil 1.12b’den grafiğin belli bir frekans değerine ( $f_c$ ) kadar düz olduğu ve ondan sonra azaldığı görülmektedir. Yani bu tip bir darbenin grafikten elde edilen bu  $f_c$  frekans değerine kadar etkili olduğu ve bunun üzerindeki frekans değerlerinde ise etkisiz olduğu görülmektedir. Dolayısıyla bu  $f_c$  değerinin belirlenmesi önemli hale gelmektedir. Bu grafikler birlikte düşünüldüğünde darbe süresi ( $T_c$ ) ile frekansın azalmaya

başladığı frekans değeri ( $f_c$ ) arasında bir ilişki olduğu görülebilir. Bu ilişkiden, daha uzun bir frekans aralığı elde edilmek isteniyorsa, daha kısa bir darbe süresi oluşturulması gerekmektedir. Bu da, temas yüzeyinin rijitliğine ve çekiç başlığının kütlesine bağlıdır. Çekiç ucunda kullanılan malzeme sertleştikçe darbe süresi kısalmış ve etkili frekans aralığı genişler. Benzer şekilde çekicinin kütlesi hafiflettikçe etkili frekans aralığı genişler. Bu nedenle ölçümlerde kullanılan çekiçler için farklı başlık ve uç alternatifleri sunulmaktadır. İlgili frekans aralığında enerjiyi tamamıyla yapıya aktarmak için yumuşak çekiç uçları kullanılmalıdır. Gereğinden sert uçlar kullanılması durumunda ise enerji, ilgili frekans aralığının dışına çıkar.



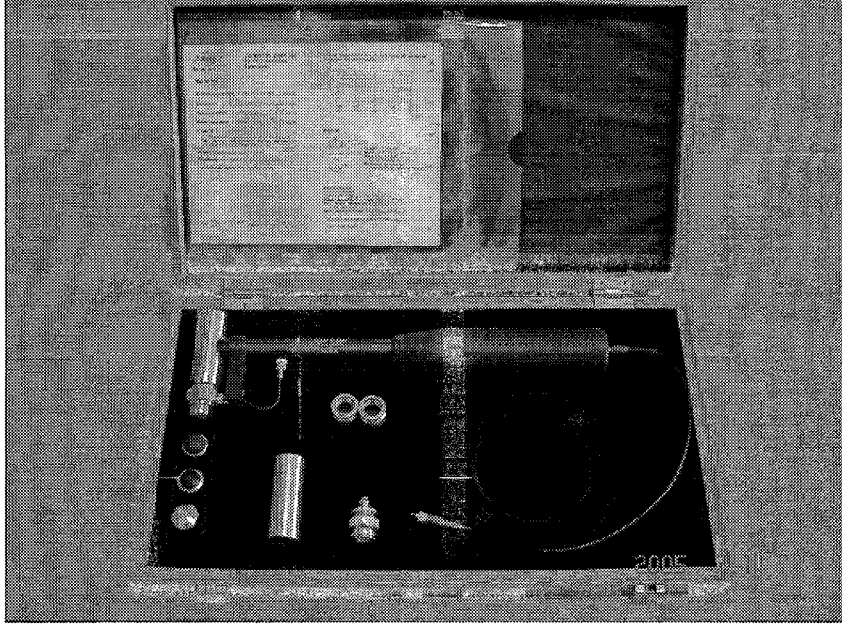
a. Zaman ortamında çekiç darbesi

b. Darbenin frekans spektrumu

Şekil 1.12. Çekiç testinde darbe sinyali ve frekans spektrumu

Çekiç testinde bazı zorluklar da mevcuttur. Bunlar her bir darbenin bir öncekiyle aynı veya ona yakın olması ve kuvvetin yüzeyin normali doğrultusunda uygulanması gibi zorluklar olarak sıralanabilir. Ayrıca, çekiçle vurulduktan sonra çekicinin geri tepmemesi gerekir yani her ölçüm için yapıya bir kez vurmak gerekmektedir.

Bu tez çalışmasında, yapılara titreşim uygulamak amacıyla B&K firmasının üretmiş olduğu 8202 tip bir çekiç kullanılmıştır (Şekil 1.13).



Şekil 1.13. B&K 8202 tip çekiç ve ilave parçaları

#### 1.7.4. Etki ve Tepkinin Ölçülmesi

Piezoelektrik tip ölçerler, deneysel modal analizde yapıya uygulanan kuvvetin (etkinin) ve yapının bu kuvvete gösterdiği tepkinin ölçülmesinde en çok kullanılan ölçer tipidir. Sadece bazı özel durumlarda alternatif tipteki ölçerler de kullanılmaktadır.

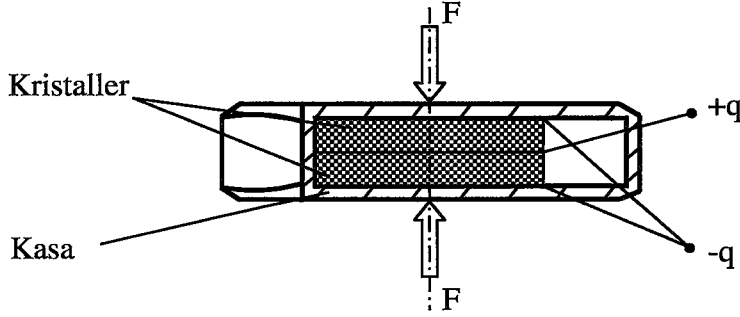
Üç tip piezoelektrik ölçer mevcuttur. Bunlar kuvvet ölçerler, ivme ölçerler ve direnç (impedance) başlığıdır. Ölçerlerin yapımında doğal veya yapay kristaller kullanılmaktadır. Bu kısımda, bu tez çalışmasında kullanılan piezoelektrik tip kuvvet ölçerler ve ivme ölçerleri incelenmiştir.

##### 1.7.4.1. Kuvvet Ölçerler

Kuvvet ölçerler en basit tipteki piezoelektrik ölçerlerdir. Kuvvet ölçerlerin çalışma prensibi, kristallerin yüzeyine bir  $F$  kuvveti uygulandığında bu kuvvetle orantılı olarak bir  $q$  elektrik yükü üretilmesine dayanmaktadır. Kuvvet ölçerlerde genellikle hassas kristaller kullanılır ve belirli bir düzene göre kuvvet ölçer kasasının içerisine yerleştirilirler (Şekil 1.14). Kristallerin negatif yüzeyleri kuvvet ölçerin kasasına ve pozitif yüzeyleri ise karşılıklı birbirine degecek şekilde yerleştirilirler. Bu şekilde, düzenleme ile kasanın bir yüzeyini diğer yüzeyinden elektriksel olarak izole etme ihtiyacı ortadan kalkmış olur. Bu

şekilde düzenlemenin diğer önemli bir faydası ise, kristallerin ve kasanın aksenal yöndeki rijitliğinin fazla olmasıdır. Uygulanan kuvvetin iletirme oranı, bu aksenal yöndeki rijitliğe bağlı olarak değişmektedir.

Kristallerden çıktı olarak alınan kuvvet ile çekiçle uygulanan kuvvet ve yapıya aktarılan kuvvet arasında çok az bir farklılık vardır. Bunun sebebi ise, kristal ile yapı arasındaki bağlantıyı sağlayan elemanlardan kaynaklanmaktadır.

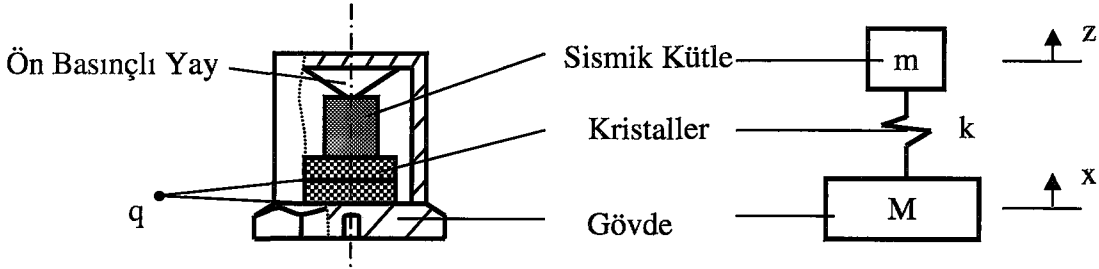


Şekil 1.14. Yaygın olarak kullanılan kuvvet ölçer türü

#### 1.7.4.2. İvme Ölçerler

İvme ölçerlerde tepkinin iletimi direkt değildir ve sismik kütle kullanılarak yapılır (Şekil 1.15a). Bu düzende kristallerde oluşan kuvvet sismik kütlelerin atalet kuvveti ( $m\ddot{z}$ )'dir. İvme ölçerin gövde kısmı ile sismik kütle birlikte hareket ettiği sürece yani  $\ddot{x}$  ve  $\ddot{z}$  aynı olduğu sürece ivme ölçerin çıktı sinyali gövdenin ivmesiyle ve aynı zamanda ivme ölçerin bağlandığı yapının ivmesiyle orantılıdır. Basit bir dinamik model üzerinde bu tür bir ivme ölçer kullanıldığında ( $\ddot{x}/\ddot{z}$ ) oranının değeri ivme ölçerin birinci frekansına kadar olan oldukça geniş bir frekans aralığında 1'e yakındır. Bu frekansın %20'sine kadar olan bir frekans aralığında bu orandaki sapma 0.04, %33'üne kadar olan bir alanda ise 0.12'dir. Buradan ivme ölçerin ölçüm aralığını belirleyebilmek için ivme ölçerin en düşük rezonans frekansının belirlenmesinin gerekliliği ortaya çıkmaktadır. İvme ölçerin en düşük rezonans frekansı ivme ölçerin bağlandığı yapı özelliklerine ve bazı diğer parametrelere göre değişir. Genellikle üretici firmalar ivme ölçerlerin yapıya bağlı olduğu durumdaki rezonans

frekansını ivme ölçerle birlikte vermektedirler. Şekil 1.15b'de gösterilen basitleştirilmiş model için bu frekans  $\sqrt{k/m}$  ifadesiyle elde edilmektedir. Bu değer üst sınır olarak alınmalıdır. Çünkü çoğu ölçüm durumunda ivme ölçer sabit bir yüzeye bağlanamamaktadır. Bunun sonucunda da rezonans frekansı düşmektedir (Broch, 1984).



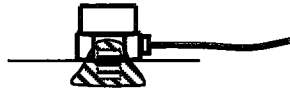
a. Yaygın olarak kullanılan ivme ölçer türü

b. Basitleştirilmiş Model

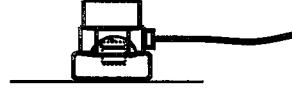
Şekil 1.15. İvme ölçerlerin genel yapısı

İvme ölçerlerin hassasiyetleri 1–10,000 pc/g arasında değişir. Genellikle ölçümlerde yüksek hassasiyetli ivme ölçerler kullanılması istenilir. Hassasiyetin yüksek olması ivme ölçerin büyüklüğünü ve ağırlığını artırmaktadır. Bu da ölçülecek sistemin veya parçanın küçük olması durumunda ölçüm işlemi için elverişsiz olmaktadır. Bu nedenle, ölçülecek sisteme bağlı olarak yeterli hassasiyeti sağlayan ivme ölçerler kullanılmalıdır.

Ölçüm işlemi için ivme ölçerin bağlandığı yer ve bağlanma türü önemlidir. İvme ölçerin ölçülecek sisteme bağlanmasında birkaç farklı yöntem mevcuttur. Bunların bazıları ara elemanlar (cıvatalar) kullanarak bağlama, mıknatıslı başlıklar kullanarak bağlama, ince bir mum tabakasına yapıştırarak bağlama ve elle ölçülecek sisteme tutmak şeklinde sıralanabilir (Şekil 1.16a, 1.16b, 1.16c, 1.16d). Her bir bağlama yönteminin avantaj ve dezavantajları vardır. Bu nedenle, her yöntem uygun ölçüm durumunda kullanılmalıdır.



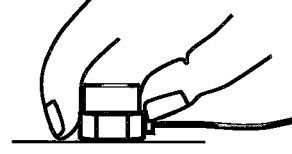
a. Cıvatalı bağlama



b. Mıknatıslı başlıklarla bağlama



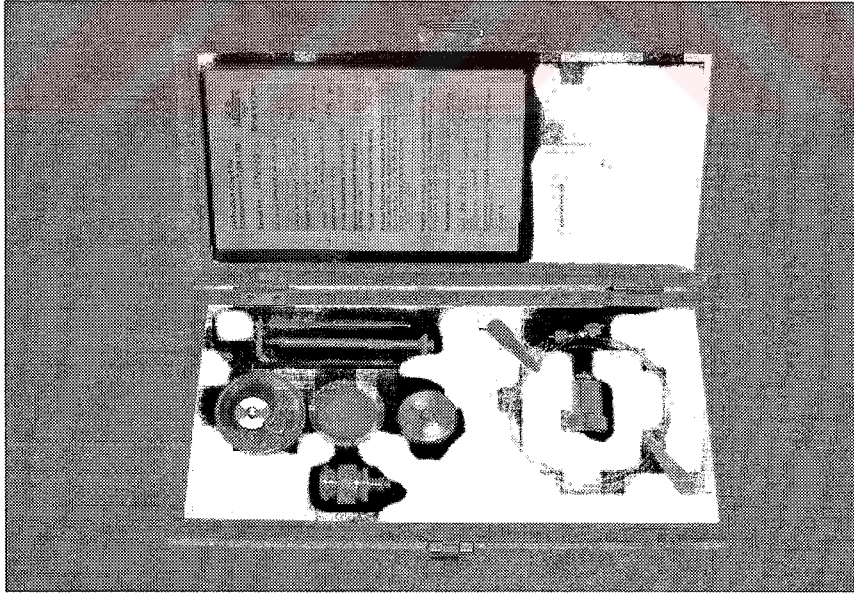
c. Mum tabakasıyla bağlama



d. Elle tutma

Şekil 1.16. İvme ölçeri yapıya bağlama yöntemleri

Bu tez çalışmasında, yapıların titreşimlerini ölçmek amacıyla B&K firmasının üretmiş olduğu 4382 tip ivme ölçer kullanılmıştır (Şekil 1.17). Ölçümleri yapılan modeller çelik malzemeden üretilmiş olduğundan, mıknatıslı başlıklar kullanılarak ivme ölçer yapılara bağlanmıştır.

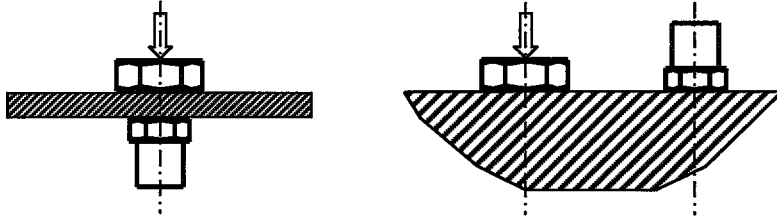


Şekil 1.17. B&amp;K 4382 tip ivme ölçer ve ilave parçaları

İvme ölçerin bağlanma biçimi kadar nereye bağlandığı da önemlidir. Eğer ivme ölçer bir veya daha fazla moda ait bir düğüm noktasına yakın bir noktaya yerleştirilirse, o



modlara ait değerler belirlenemeyeceğinden dolayı, ivme ölçerin yerinin değiştirilmesi gerekir. Bu nedenle yapıların deneysel modal analiz ölçümleri yapılmadan önce, sonlu elemanlar analizleri yapılarak ölçüm noktalarının belirlenmesi faydalıdır. Ayrıca ölçümlerde kuvvetin uygulandığı nokta ile ivme ölçerle tepkilerin ölçüldüğü noktanın aynı olması istenir. Bunun için kuvvet uygulanan nokta ile ivme ölçerin bağlandığı noktanın ya karşılıklı ya da aynı tarafta birbirine çok yakın olması istenir (Şekil 1.18).



Şekil 1.18. İvme ölçerlerin yerleştirilme biçimleri

### 1.7.5. Analiz Ediciler

Deneysel modal analiz ölçümlerinde ölçerlerden gelen verileri değerlendirmek ve yapıya ait modal parametreleri belirlemek amacıyla analiz ediciler kullanılır. Analiz edici, aslında etki ve tepki seviyelerini belirlemek amacıyla kullanılan çok özel bir voltmetredir. Ölçülecek yapıya bağlı olarak genellikle üç tip analiz edici kullanılmaktadır. Bunlar,

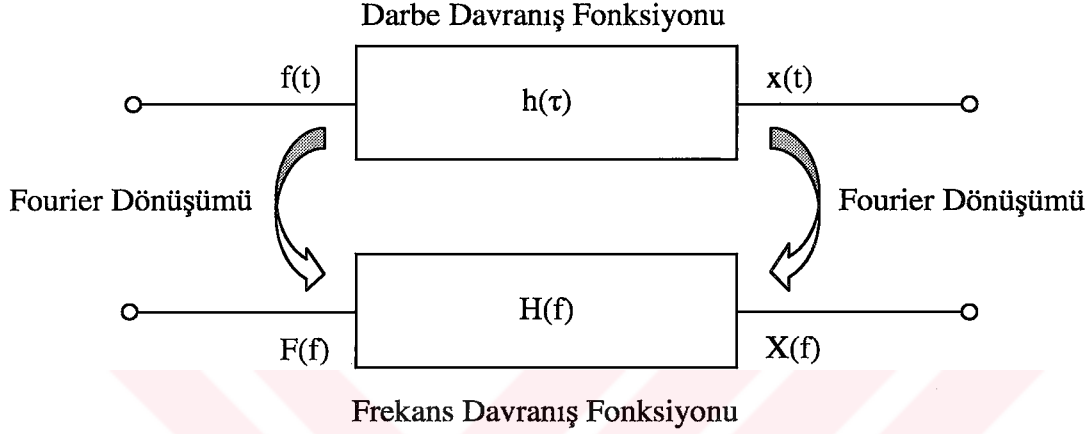
- Tracking Fitler
- Frekans Tepki Analiz Edici
- Spektrum Analiz Edici

olarak sıralanır.

Bu analiz edicilerin ilki analog bir cihaz iken, ikinci ve üçüncü analiz ediciler genellikle dijital cihazlardır. Bütün analiz edicilerde, veriler analiz ediciye analog formda iletilirler. Dijital analiz edicilerde, ilk olarak veriler analog-dijital dönüştürücüler yardımıyla dijitalleştirilirler ve işlemler yapılır.

Deneysel modal analizin temel prensibi, yapıya uygulanan etki ile yapının bu etkiye göstermiş olduğu tepki arasındaki bağlantıyı kurmaya dayanmaktadır. Analiz edicilerin başlıca görevi etki ve tepki fonksiyonları arasındaki bu bağlantıları oluşturmak ve grafiksel olarak görüntülemektir.

Etki ve tepki fonksiyonları arasında zaman ortamındaki Darbe Davranış Fonksiyonu (Impulse Response Function) ve frekans ortamındaki Frekans Davranış Fonksiyonu (Frequency Response Function) tanımlanır. Zaman ortamındaki etki,  $f(t)$ , ve tepki,  $x(t)$ , fonksiyonları Fourier dönüşümüyle frekans ortamındaki etki,  $F(f)$ , ve tepki,  $X(f)$ , fonksiyonlarına dönüştürülürler (Şekil 1.19).



Şekil 1.19. Fourier dönüşümü

Frekans ortamındaki etki ve tepki fonksiyonları arasındaki bağıntı,

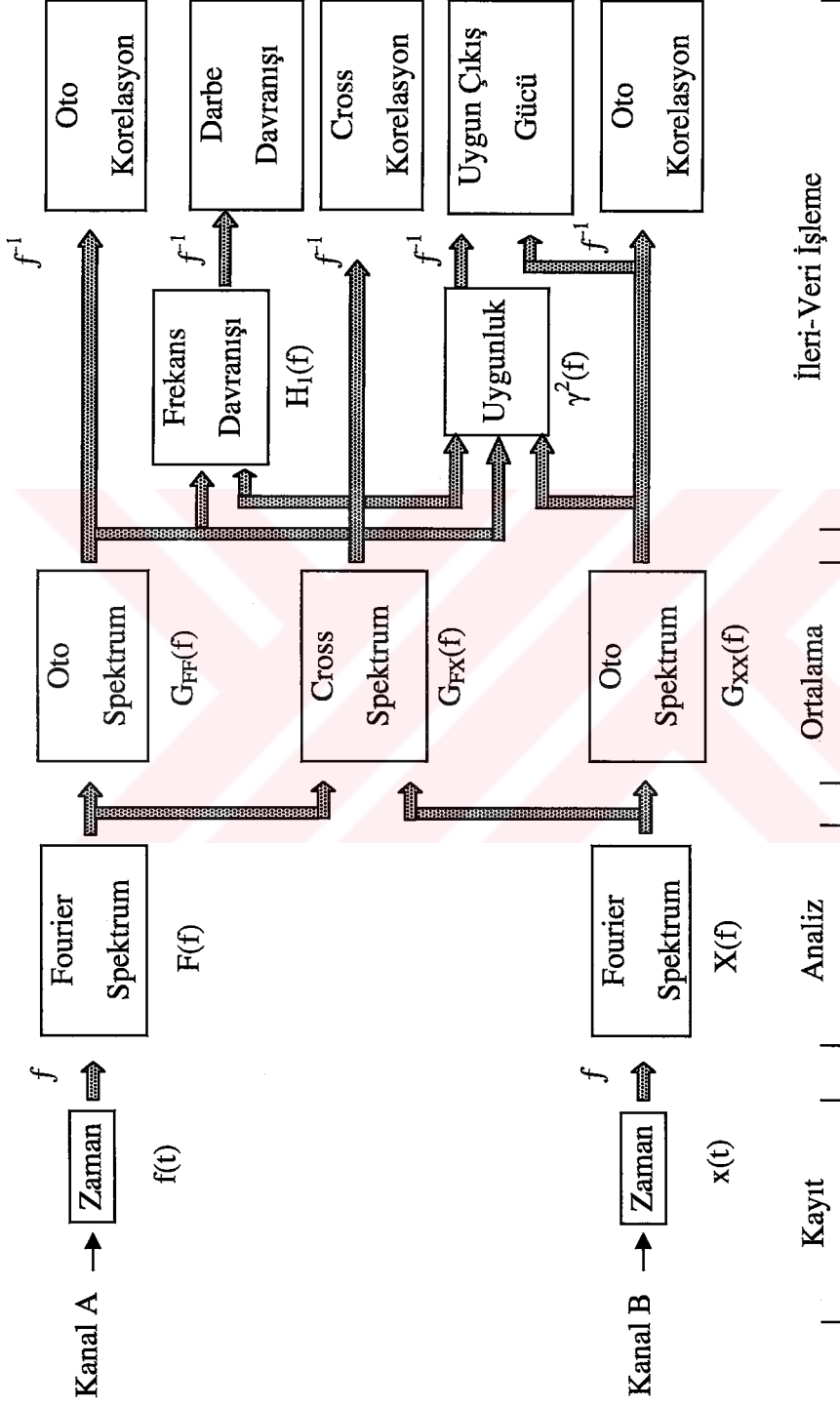
$$X(f) = H(f).F(f) \quad (1.60)$$

olarak tanımlanır. Bu ifadeden frekans davranış fonksiyonu,

$$H(f) = \frac{X(f)}{F(f)} \quad (1.61)$$

olarak elde edilir.

Deneysel modal analiz yönteminde analiz edicilerde takip edilen işlem sırası Şekil 1.20'de ve aşağıda ayrıntılı olarak gösterilmektedir.



Şekil 1.20. Deneysel modal analiz yönteminde analiz edicilerde takip edilen işlem sırası

(a) Oto Spektrum ve Cross Spektrum

Etki sinyaline ait oto spektrum,  $G_{FF}$ ,

$$G_{FF} = \overline{F^*(f).F(f)} \quad (1.62)$$

olarak tanımlanır. Burada  $F^*(f)$ ,  $F(t)$ 'nin eşleniğidir. Üst çizgi değerlerin ortalamasının alındığını göstermektedir. Fourier spektrumu kompleks değerde iken oto spektrum reel ve pozitif bir değere sahiptir. Diğer bir deyişle faz değeri yoktur.

Tepki sinyaline ait oto spektrum,  $G_{XX}$ ,

$$G_{XX} = \overline{X^*(f).X(f)} \quad (1.63)$$

olarak tanımlanır. Etki ve tepki sinyalleri arasındaki cross spektrum ise,  $G_{FX}$ ,

$$G_{FX} = \overline{F^*(f).X(f)} \quad (1.64)$$

olarak tanımlanır.  $G_{FX}$  fonksiyonu komplekstir ve faz değerine sahiptir. Bu faz değeri de ölçülen yapının etki ve tepki fonksiyonları arasındaki faz değeridir (Gatzwiller ve Herlufsen, 1994).

(b) Frekans Davranış Fonksiyonu

Frekans davranış fonksiyonları etki ve/veya tepki sinyallerinde gürültü olması durumlarına bağlı olarak üç farklı şekilde hesaplanabilmektedir.

Tepki sinyalinde gürültü olması durumunda frekans davranış fonksiyonu, (1.61) denkleminin pay ve paydası  $F(f)$ 'in eşleniği ile çarpılarak,

$$H(f) = \frac{\overline{F^*(f).X(f)}}{\overline{F^*(f).F(f)}} = \frac{G_{FX}}{G_{FF}} = H_1(f) \quad (1.65)$$

şeklinde tanımlanır. Etki sinyalinde gürültü olması durumunda ise benzer şekilde pay ve payda  $X(f)$ 'in eşleniği ile çarpılırsa,

$$H(f) = \frac{\overline{X^*(f).X(f)}}{X^*(f).F(f)} = \frac{G_{XX}}{G_{XF}} = H_2(f) \quad (1.66)$$

şeklini alır. Hem etki hem de tepki sinyallerinde gürültü olması durumunda, frekans davranış fonksiyonu,

$$H_3(f) = \sqrt{H_1(f).H_2(f)} \quad (1.67)$$

olarak tanımlanır. Bu üç frekans davranış fonksiyonu arasında,

$$|H_1(f)| \leq |H_3(f)| \leq |H_2(f)| \quad (1.68)$$

bağıntısı mevcuttur.

### (c) Uygunluk (Coherence) Fonksiyonu

İdeal bir ölçüm sonucunda oto spektrum ve cross spektrumlar arasında,

$$G_{FF}.G_{XX} = |G_{FX}|^2 \quad (1.69)$$

bağıntısı mevcuttur. Ölçümlere gürültü karışması durumunda bu bağıntı,

$$G_{FF}.G_{XX} \geq |G_{FX}|^2 \quad (1.70)$$

haline dönüşür.

Uygunluk fonksiyonu,

$$\gamma^2(f) = \frac{|G_{FX}|^2}{G_{FF} \cdot G_{XX}} = \frac{H_1(f)}{H_2(f)} \quad (1.71)$$

olarak tanımlanır. Uygunluk fonksiyonu,

$$0 \leq \gamma^2(f) \leq 1 \quad (1.72)$$

aralığında bir değere sahiptir. Yani, uygunluk fonksiyonunun değeri ölçümlere gürültü karışmaması durumunda 1, gürültü karışması durumunda ise 1'den küçüktür.

### 1.7.5.1. Tracking Filter

Tracking filter, deneysel modal analizde kullanılan en eski tip analiz edicidir ve sadece titreşim kaynağı olarak sinüzoidal sinyaller uygulandığı durumda kullanılırlar. Titreşim sinyaline bağlı olarak ölçerlerde dar bant filtresi oluşur. Her bir filtrenin merkez frekansı, emir (command) sinyalinin frekansına bağlı olarak sürekli olarak değişir. Böylece, her ölçerdeki sinyalin şiddeti ve fazı belirlenir.

Bu analiz edicilerde filtrelerin kullanılması zorunludur. Çünkü emir sinyali olarak yapıya uygulanan bir sinüs dalgası, ölçümler sırasında ortamdaki gürültüden ve yapının lineer olmayan özelliklerinden dolayı olumsuz etkilenebilmekte ve yapının tepkisi düzgün olarak ölçülememektedir. Özellikle yapının rezonans ve anti-rezonans frekanslarına yakın bölgelerde bu sorunlar daha fazladır.

### 1.7.5.2. Frekans Tepki Analiz Edici

Frekans tepki analiz edici, tracking filter analiz edicinin geliştirilmiş bir modelidir. Frekans tepki analiz edicilerde işlemler dijital olarak yapılmaktadır.

Bu analiz edici, emir sinyalini kendi içerisinde dijital olarak üretebilmektedir. Üretilen bu sinyal dijital-analog dönüştürücülerle analog forma dönüştürülür ve yapıya uygulanır. Benzer şekilde yapıdan alınan tepkiler analog-dijital dönüştürücüler tarafından dijitalleştirilir ve işlemler yapılır.

### 1.7.5.3. Spektrum Analiz Edici

Spektrum analiz edici, frekans tepki analiz ediciden oldukça farklıdır. Frekans tepki analiz edici, her ölçümde yapıya ait sadece bir frekansı elde edebilirken, spektrum analiz edici yapının bütün frekanslarını aynı anda belirleyebilmektedir. Elde edilen değerler sonlu sayıda ayırık değerler halinde bir spektrumda gösterilmektedir. Spektrum analiz edici, aynı anda her biri farklı frekansları ölçen frekans tepki analiz edicilerin birleşmesinden oluşan bir cihaz olarak düşünülebilir.

Genellikle, dijital spektrum analiz ediciler kullanılmaktadır. Dijital spektrum analiz edicilerde ayırık fourier dönüşümü kullanılarak elde edilen sinyaller işlenir ve yapıya ait modal özellikler elde edilir.

Bu tez çalışmasında, kuvvet ölçer ve ivme ölçerden elde edilen sinyalleri işlemek amacıyla B&K firmasının üretmiş olduğu 3550 tip çift kanallı bir spektrum analiz edici kullanılmıştır (Şekil 1.21).



Şekil 1.21. B&K 3550 tip çift kanallı spektrum analiz edici

### 1.7.6. Dijital Sinyal İşleme

Spektrum analiz edicilerin görevi, etki ve tepki sinyallerine ait Fourier dönüşümünü sağlamak veya spektral yoğunluk fonksiyonlarını belirlemektir. Ölçerlerden analiz ediciye gelen sinyaller zaman ortamında, buna karşın spektral özellikler ise frekans ortamındadır. Dolayısıyla verilerin zaman ortamından frekans ortamına dönüştürülmesi gerekmektedir.

T periyodundaki bir  $x(t)$  fonksiyonunun Fourier serisinde açılımı,

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(\omega_n t) + b_n \sin(\omega_n t)] \quad (1.73)$$

şeklindedir. Bu denklemde,

$$\omega_n = \frac{2\pi n}{T} \quad (1.74)$$

$$a_0 = \left(\frac{2}{T}\right) \int_0^T x(t) dt \quad (1.75)$$

$$a_n = \left(\frac{2}{T}\right) \int_0^T x(t) \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) dt \quad (1.76)$$

$$b_n = \left(\frac{2}{T}\right) \int_0^T x(t) \sin\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) dt \quad (1.77)$$

olarak tanımlanmaktadır.

$x(t)$  fonksiyonu ayrık değerler haline dönüştürülürse, N değerden oluşan sonlu seri olarak,

$$x_k = x(t_k) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{N/2} [a_n \cos(\omega_n t_k) + b_n \sin(\omega_n t_k)] ; k = 1, N \quad (1.78)$$

şeklinde yazılır. Buradaki  $a_n$  ve  $b_n$  değerleri daha önce tanımlanan değerlerdir ve Fourier veya spektral katsayılar olarak adlandırılırlar.  $a_n$  ve  $b_n$  değerleri faz formunda,



$$C_n (= X_n) = (a_n^2 + b_n^2)^{1/2} \quad (1.79)$$

ve

$$\phi_n = \text{tg}^{-1}(-b_n/a_n) \quad (1.80)$$

olarak yazılır.

### 1.7.6.1. Ayrık Fourier Dönüşümü

Bütün analiz edicilerde, sinyaller analiz ediciye analog formda iletilirler ve analog-dijital dönüştürücülerle dönüştürülerek N ayrık değer olarak ölçümün yapıldığı süre boyunca kaydedilirler. Sinyalin periyodik olduğu kabul edilirse, Fourier dönüşümü (1.78) bağıntısıyla hesaplanır. Bu dönüşümde veriler arasında,

$$\omega_{\max} = \frac{\omega_s}{2} = \frac{1}{2} \left( \frac{2\pi N}{T_s} \right) \quad (1.81)$$

ve

$$\Delta\omega = \frac{\omega_s}{N} = \frac{2\pi}{T_s} \quad (1.82)$$

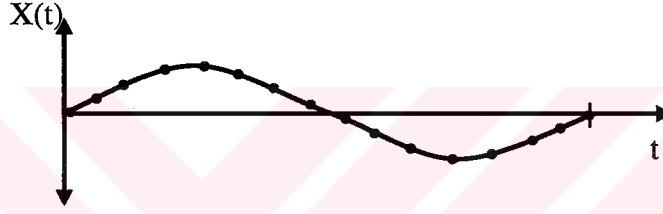
bağıntısı vardır. Bu ifadelerde;  $T_s$  sinyal uzunluğunu, N ayrık değer sayısını,  $\omega_s$  sayısallaştırma oranını,  $\omega_{\max}$  frekans spektrum alanını,  $\Delta\omega$  spektrum çözünürlüğünü göstermektedir. Ayrık değer sayısı, N, kullanılan analiz edicinin özelliğine bağlı olarak belirlenir. Frekans spektrum alanı ve spektrum çözünürlüğü her sinyalin zaman uzunluğuna bağlı olarak değişmektedir.

Bu tez çalışmasında, 800 ayrık değer sayısına sahip grafikler kullanılmış ve genellikle 0-400 Hz frekans aralığında ölçümler yapılmıştır.

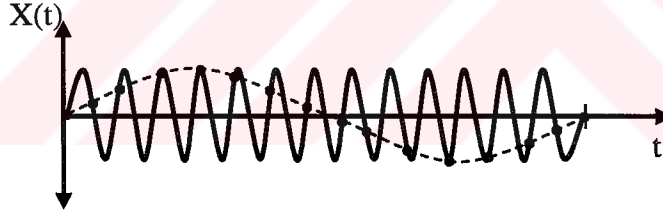
Dijital spektrum analizi, düzgün olarak uygulanmazsa bazı önemli hatalar oluşabilir. Bu hatalar genellikle ayrık değerlere dönüştürme yaklaşımından ve zaman ortamındaki verilerin kısalığından oluşmaktadır. Örtüşme (aliasing), sızma (leakage), pencereleme (windowing), yakınlaştırma (zooming) ve ortalama (averaging) olarak adlandırılan bu durumlara ölçümler sırasında dikkat edilmelidir.

### 1.7.6.2. Örtüşme (Aliasing)

Örtüşme problemi, verilerin ayırık değerlere dönüştürülmesi sırasında oluşabilmektedir. Ayırık değerlere dönüştürme işlemi sırasında, eğer sayısallaştırma oranı çok yavaş olursa orijinal sinyaldeki çok yüksek frekansların varlığı yanlış değerlendirilebilir. Yani yüksek frekanslar, düşük frekanslar gibi görünür ve gerçek düşük frekans değerlerinden ayırt edilemez. Şekil 1.22a'da gösterilen düşük frekanslı bir sinyalin sayısallaştırılması sonucunda oluşan ayırık değerlerin, Şekil 1.22b'de gösterilen yüksek frekanslı bir sinyalin sayısallaştırılması sonucu elde edilen değerlerle aynı olduğu görülmektedir (Ewins, 1995).



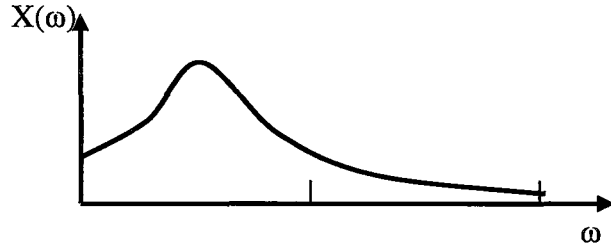
a. Düşük frekanslı bir sinyal



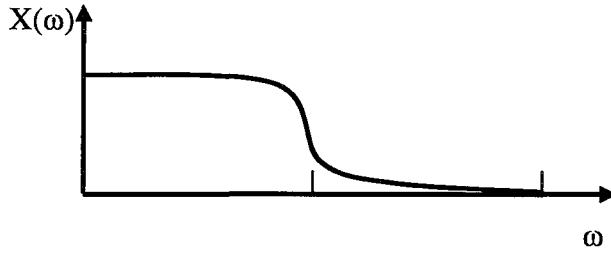
b. Yüksek frekanslı bir sinyal

Şekil 1.22. Örtüşme (Aliasing) problemi

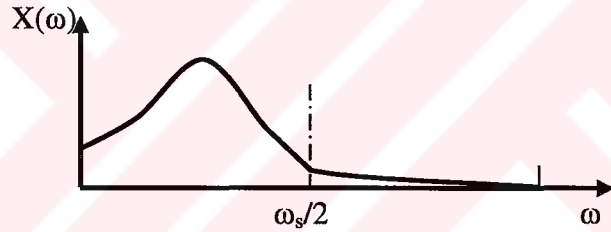
Örtüşme problemini önlemek için anti-aliasing filtreler kullanılmalıdır. Bu filtreler Şekil 1.23'te gösterilen formda özelliklere sahip sharp cut-off filtrelerdir. Bu filtreler sinyalleri belli bir frekans değerinde keserek filtre ederler. Böylece analizlerde filtrelenmiş sinyaller kullanılır.



a. Filtre edilmemiş sinyal



b. Filtre fonksiyonu



c. Filtre edilmiş sinyal

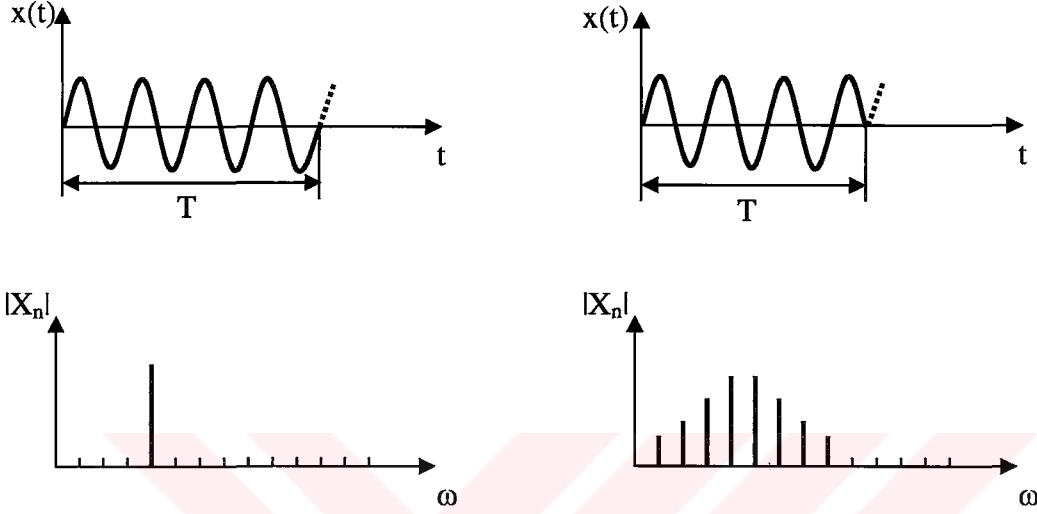
Şekil 1.23. Anti-Aliasing filtreleme işlemi

Bu tez çalışmasında, kullanılan ölçüm cihazı sinyallere bağlı olarak anti-aliasing filtreyi otomatik olarak kullanmaktadır.

### 1.7.6.3. Sızma (Leakage)

Sızma (leakage), sinyalin periyodik olduğu varsayımına bağlı olarak zaman ortamında sonlu uzunlukta veri dikkate alınmasından kaynaklanan bir durumdur. Şekil 1.24a'da sinüzoidal bir sinyal ekranda tam olarak görülmektedir ve sinyalin spektrumu ise sinüzoidal sinyalin frekans değerinde bir çizgidir. Şekil 1.24b'de ise periyodik yaklaşım

tam geçerli değildir. Bu durumda spektrumda farklı frekanslardaki çizgiler oluşmaktadır. Yani, enerji doğru frekanstaki çizgiye yakın farklı frekanslardaki çizgilere sızmakta ve farklı çizgiler olarak görülmektedir. Sinyalin frekansı düşük olduğu zaman bu etki daha fazla görülmektedir.



a. Tam periyodik bir sinyal

b. Tam periyodik olmayan bir sinyal

Şekil 1.24. Sızma problemi

#### 1.7.6.4. Pencereleme (Windowing)

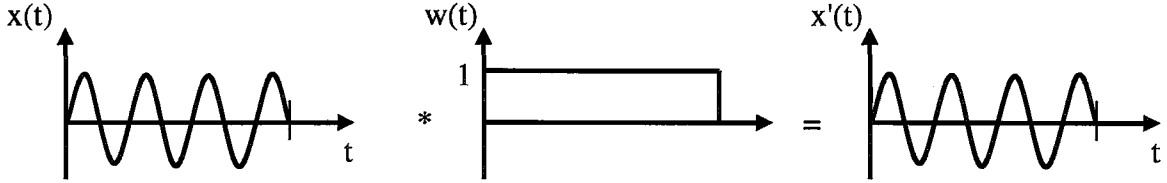
Sızma probleminin pratik çözümlerinden biri pencereleme (windowing) işlemi veya ağırlık fonksiyonlarının kullanılmasıdır. Bu amaçla farklı birçok ağırlık fonksiyonu kullanılmaktadır.

Pencereleme işlemi, Fourier dönüşümü yapılmadan önce zaman ortamındaki etki ve tepki sinyallerine belirlenen ağırlık fonksiyonlarının uygulanmasıdır. Bu ağırlık fonksiyonları  $w(t)$  olarak gösterilirler. Şekil 1.25'te kullanılan bazı ağırlık fonksiyonları görülmektedir. Ağırlık fonksiyonlarının uygulanması sonucunda  $x(t)$  sinyali,

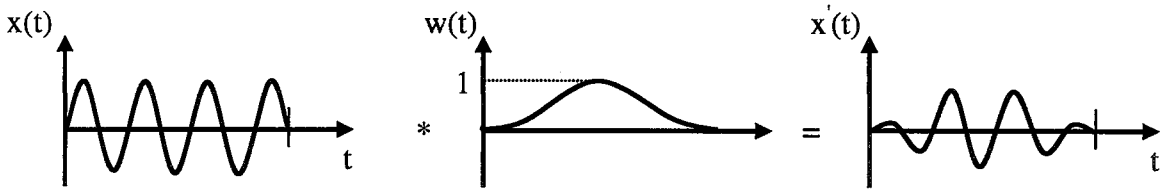
$$x'(t) = x(t) * w(t) \quad (1.83)$$

işlemiyle  $x'(t)$  pencerelenmiş sinyaline dönüştürülür.

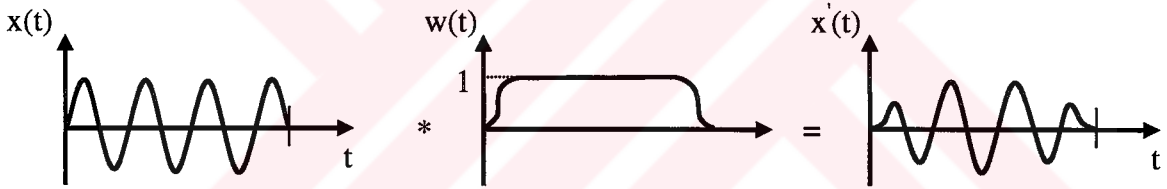
Hanning ve Cosine Taper ağırlık fonksiyonları rasgele titreşimler ve düzenli periyodik titreşimler gibi sürekli titreşimler için kullanılırken, exponansiyel ağırlık fonksiyonu çekiç kullanılarak üretilen geçici (transient) sinyaller için kullanılır.



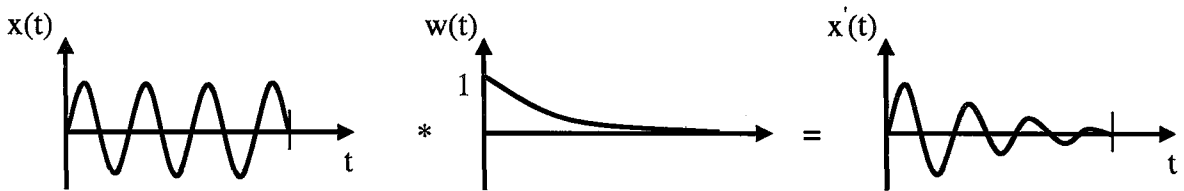
a. Dikdörtgen ağırlık fonksiyonu



b. Hanning ağırlık fonksiyonu



c. Cosine Taper ağırlık fonksiyonu



d. Exponansiyel ağırlık fonksiyonu

Şekil 1.25. Yaygın olarak kullanılan ağırlık fonksiyonları

Bu tez çalışmasında, etki sinyali için exponansiyel ağırlık fonksiyonu kullanılırken, tepki sinyali için dikdörtgen ağırlık fonksiyonunun özel bir hali olan transient ağırlık fonksiyonu kullanılmıştır.

### 1.7.6.5. Yakınlaştırma (Zooming)

Yakınlaştırma problemi ayırık değer sayısının sınırlı olmasından kaynaklanan bir durumdur. Bunun için daha büyük dönüştürücüler kullanılabilir, fakat bunun sonucunda ilgili frekans bölgesinde gerekenden fazla veri ortaya çıkar ve bu da istenilmeyen bir durumdur.

Yakınlaştırma problemi için yaygın kullanılan çözüm, maksimum ve minimum frekans aralığı belirlemek ve bu aralıkta dönüşümleri yapmaktır.

### 1.7.6.6. Ortalama (Averaging)

Ortalama, ölçümler sonucu elde edilen değerlerin doğruluğunu sağlamak ve sinyallere karışan istenilmeyen gürültülerin etkisini en aza indirmek amacıyla kullanılır. Genellikle lineer ortalama yöntemi kullanılır.

Bu tez çalışmasında, lineer ortalama yöntemi kullanılmış ve her ölçüm için beş ortalama dikkate alınmıştır.

### 1.7.7. Titreşim Türleri

Yapıların tepkileri yapıya uygulanan titreşime bağlı olarak belirlendiğinden dolayı yapıyı titreştirmek için kullanılan titreşim kaynağı önemlidir. Yaygın olarak kullanılan titreşim kaynakları;

- Kademeli Sinüzoidal (Stepped-Sinusoidal)
- Yavaş Sinüs Taraması (Slow Sine Swep)
- Periyodik
- Rasgele (Random)
- Geçici (Transient)

olarak sıralanabilir. Her bir titreşim kaynağı avantaj ve dezavantajlara sahip olduğundan uygun durumlarda kullanılmalıdırlar (Lang, 1978).

Yapıya bir titreşim dalgası uygulanıp ölçüm yapıldığında bir sonraki ölçüm için yapının kararlı durumda olması gerekmektedir. Aksi halde yapıda istenilmeyen kısa süreli etkiler oluşabilir. Bu etkiler,

- Titreşim frekansının yapının frekansına olan yakınlığına,
- Titreşim sinyalleri arasındaki sürenin kısa olmasına,
- Yapısal modlarda sönümün azlığına,

bağlı olarak oluşur. Yapının kararlı duruma gelmesi zaman aldığından dolayı ölçüm işlemleri fazla zaman alabilmektedir.

#### **1.7.7.1. Kademeli Sinüzoidal (Stepped-Sinusoidal) Titreşimler**

Kademeli sinüs titreşiminde, yapıya sabit genlik ve frekanstaki ayrı sinüs dalgaları uygulanmaktadır. Yapının titreşim frekanslarını yakalayabilmek için sinüs dalgası bir ayırık değerden diğer bir ayırık değere kademeli olarak uygulanır.

Bu yöntemin avantajlarından biri, yapının rezonans frekanslarına yakın frekansların yapıya uygulanabilmesidir. Yani yapının hangi frekans aralığındaki rezonansları ölçülmek isteniyorsa o frekans aralığında farklı sinüs dalgaları uygulanır. Böylece ölçüm işlemi daha hızlı yapılabilir.

#### **1.7.7.2. Yavaş Sinüs Taraması (Slow Sine Sweep) Titreşimler**

Yavaş sinüs taramasında yapıya uygulanan sinüs dalgasının frekansı çok yavaş bir şekilde ama sürekli olarak değişmektedir. Bu durumda da, ölçümler yapılmadan önce kararlı durum şartlarının sağlanması gerekmektedir. Bu yöntemde sinüs dalgasının değişim oranı ya da tarama oranı uygun olarak belirlenmelidir. Aksi halde yapının modal özellikleri hatalı olarak belirlenebilir.

#### **1.7.7.3. Periyodik Titreşimler**

Periyodik titreşimde ölçülecek frekans aralığındaki bütün sinüs dalgalarının frekanslarını içeren kompleks bir sinyal oluşturulur. Spektrum analiz edicilerle yapının etki ve tepki sinyallerini eşzamanlı olarak değerlendirerek yapının rezonans frekansları elde edilir.

Genellikle sistematik ve yapay rasgele olmak üzere iki tip periyodik titreşim kullanılır. Sinyaller analiz edici içerisinde üretilir ve yapıya uygulanır. Bu yöntemin avantajı, periyodik sinyaller kullanıldığından dolayı sızma probleminin oluşmamasıdır.

#### 1.7.7.4. Rasgele Titreşimler

Rasgele titreşimlerde, titreşim kaynağı analiz edicinin içinde değildir; yapıya titreştirici bağlanarak uygulanır. Rasgele titreşimde, farklı frekanstaki titreşimler yapıya uygulanır ve spektrum analiz edici kullanılarak yapı modal özellikleri belirlenir.

#### 1.7.7.5. Geçici (Transient) Titreşimler

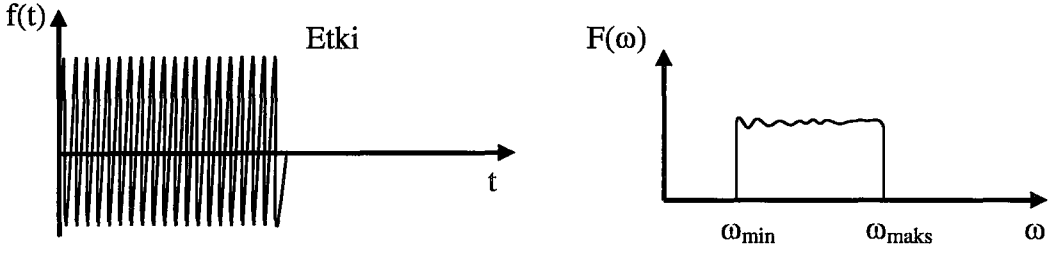
Üç tip geçici titreşim türü vardır. Bunlar,

- Hızlı sinüs taraması (rapid sine sweep)
- Kısa süreli sinyaller (short section of signal)
- Darbe (impact)

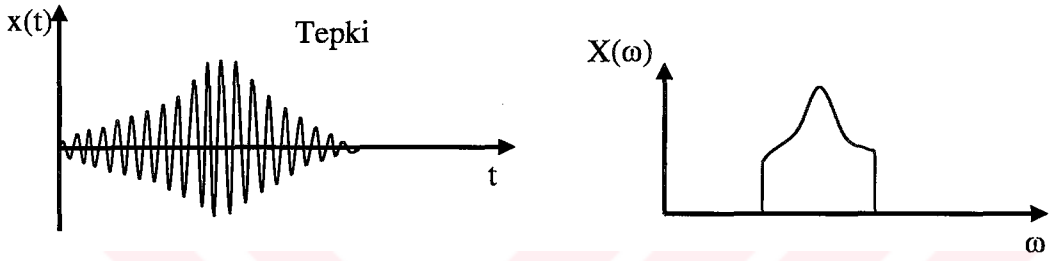
olarak sıralanabilir. Hızlı sinüs taraması olarak adlandırılan sinyallere chirp, kısa süreli sinyallere patlama ve darbe türü sinyallere de çekiç veya benzeri cihazlar kullanılarak üretilen sinyaller örnek verilebilir. Chirp ve patlama türü titreşimler yapıya sarsıcı bağlanarak sinüzoidal ve rasgele formda uygulanırken, darbe türü sinyaller yapıya çekiçle vurarak üretilir.

Chirp kısa süreli bir sinyaldir. Şekil 1.26'da chirp sinyali ve buna karşılık oluşan tepki sinyali görülmektedir.





a. Chirp sinyali

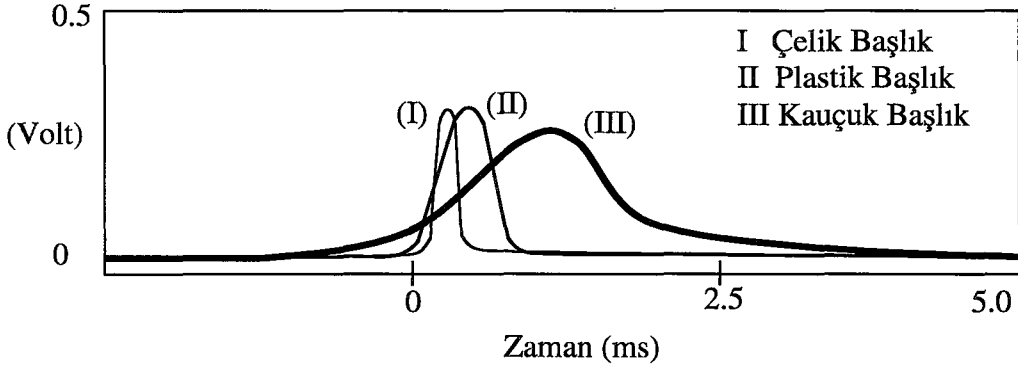


b. Chirp sinyaline karşılık oluşan tepki sinyali

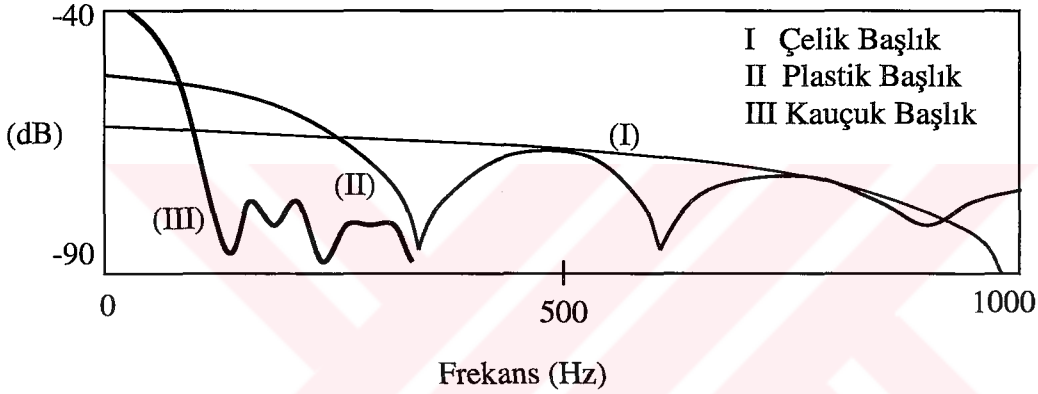
Şekil 1.26. Chirp sinyali

Patlama sinyali, chirp sinyalinin daha genel bir formudur. Patlamada kısa süreli sinyal herhangi bir formda olabilir.

Darbe sinyallerine örnek olarak ise, Şekil 1.27'de gösterilen farklı çekiç başlıkları kullanılarak üretilen sinyaller ile bunlara karşı oluşan tepki sinyalleri verilebilir.



a. Farklı çekiç başlıkları kullanılarak üretilen sinyaller



b. Tepki sinyalleri

Şekil 1.27. Çekiç veya darbe sinyalleri

Chirp ve darbe sinyalleri arasındaki en önemli fark, chirp sinyalinin frekans ve genliğinin darbe sinyallerine göre daha rahat kontrol edilebilmesidir. Çekiç kullanılarak üretilen darbe sinyalleri çekiç-yapı etkileşimine bağlı olarak değişmeler gösterdiğinden dolayı daha zor kontrol edilebilmektedir. Buna karşın, darbe sinyalleri daha önce tanımlanan  $f_c$  frekans değerine kadar geniş bir kullanım alanı sağlarken, chirp sinyallerinin yapıya uygulanması sırasında yapı-sarsıcı etkileşiminden oluşan zorluklar mevcuttur.

Geçici titreşimlerin kullanılması durumunda bazı sınırlandırmalar vardır. Örneğin, bir ölçüm için sayısallaştırma zamanı seçildiğinde buna bağlı olarak maksimum frekans aralığı belirlenmiş olur. Bu durumda maksimum frekans değerinin üzerindeki frekanslardaki yapının rezonansları elde edilemez. Sayısallaştırma süresi daha kısa seçilmesi durumunda maksimum frekans değeri büyütülebilecek, fakat yapı tepkileri

zaman ortamında tam olarak elde edilemeyecektir. Bu durumda ağırlık fonksiyonlarının kullanılması ve yakınlaştırma (zooming) özelliğinin kullanılması fayda sağlayacaktır. Diğer bir sınırlama da ölçüm sırasında sinyallerin ortamdaki gürültüden dolayı olumsuz etkilenmesidir. Bu durumda ise ortalama sayısı artırılarak gürültünün etkisi azaltılabilirken, ölçüm süresi attırılmaktadır.

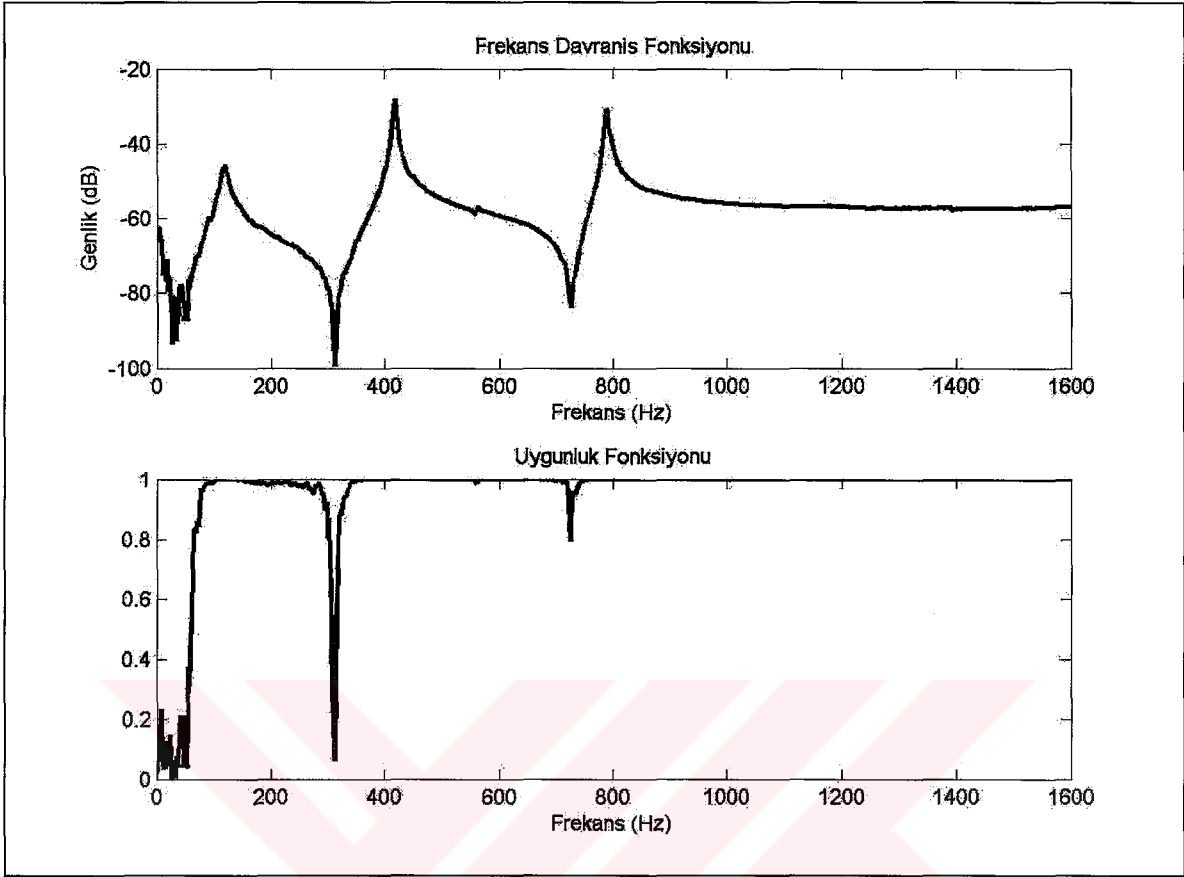
## 1.8. Modal Parametrelerin Elde Edilmesi

Ölçümler sonucunda yapıya ait frekans davranış fonksiyonu belirlendikten sonra modal parametreler olarak adlandırılan doğal frekanslar, mod şekilleri ve sönüm oranlarının elde edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla eğri uydurma (curve fitting) yöntemi olarak adlandırılan yöntem yaygın olarak kullanılmaktadır.

### 1.8.1. Ölçüm Sonuçlarının Kontrolü

Modal parametreler elde edilmeye başlanmadan önce, ölçülen frekans davranış fonksiyonunun kontrolünün yapılması hem zaman hem de modal parametrelerin doğruluğu açısından fayda sağlamaktadır. Eğer frekans davranış fonksiyonu istenilen şartları sağlamıyorsa, ölçümlerde hata yapıldığı ve ölçümlerin tekrarlanmasının gerekliliği ortaya çıkar. Frekans davranış fonksiyonunun ilk kontrolü aşağıdaki şartların sağlanıp sağlanmadığına bakılarak yapılabilir:

- Rezonans ve anti-rezonans bölgelerinin kontrolü: Frekans davranış fonksiyonunda rezonans ve anti-rezonanslar birbirini takip eder şekilde olmalıdır. Yani bir rezonanstan sonra bir anti-rezonans oluşmalıdır. Rezonans ve anti-rezonansların grafikteki sivriliği birbirine yakın olmalıdır.
- Uygunluk fonksiyonunun kontrolü: Frekans davranış fonksiyonu ile uygunluk fonksiyonu alt alta çizilmesi durumunda, frekans davranış fonksiyonunda anti-rezonans bölgelerine karşılık gelen kısımlarda uygunluk fonksiyonunda bozulmalar oluşmalıdır. Anti-rezonans bölgelerinin haricindeki kısımlarda ise uygunluk fonksiyonunun değerinin 1 olması gerekmektedir (Şekil 1.28).
- Nyquist grafiğinin kontrolü: Frekans davranış fonksiyonunda rezonans bölgelerinde Nyquist grafiği çizildiğinde daireye benzer bir şekil oluşmalıdır.



Şekil 1.28. Tipik bir frekans davranış fonksiyonu ve uygunluk fonksiyonu

## 1.8.2. Doğal Frekanslar ve Sönüm Oranlarının Elde Edilmesi

### 1.8.2.1. Tek Serbestlik Dereceli Sistemler İçin Kullanılan Yöntemler

Tek serbestlik dereceli sistemlerde doğal frekanslar ve sönüm oranlarının elde edilmesi için kullanılan yöntemlerin temelini, basit eğri uydurma yöntemleri oluşturmaktadır. Bu yöntemler, çoğu ölçüm sonuçlarına rahatlıkla uygulanabilmekte ve yeterince doğrulukta sonuçlar vermektedirler.

### 1.8.2.1.1. En Yüksek Genlik Yöntemi (Peak Amplitude ve Peak Picking)

Yapının modları ayırık değerler halinde frekans davranış fonksiyonunda ölçülebildiği durumda en yüksek genlik metodu kullanılarak yapının modal parametreleri elde edilebilir. Bu yöntemin işlem adımları aşağıda sıralanmıştır.

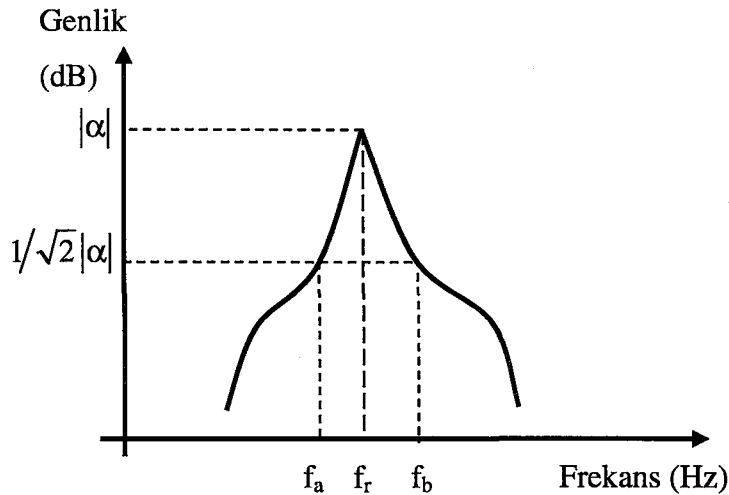
- Frekans davranış fonksiyonunda her bir rezonansa ait tepe noktası ve bu noktaya karşılık gelen frekans değeri (yapının doğal frekansı),  $f_r$ , belirlenir.
- Tepe noktasına karşılık gelen genlik değeri,  $|\alpha|$ , belirlenir. Bu tepe noktasından genlik değerinin  $1/\sqrt{2}$ 'si kadar aşağıda o rezonansa ait frekans bant genişliği,  $\Delta f$ , belirlenir. Bu noktalar  $f_a$  ve  $f_b$  olarak frekans davranış fonksiyonu üzerinde işaretlenir ve yarı-güç noktaları (half-power points) olarak adlandırılırlar (Şekil 1.29).
- Modal sönüm oranı  $\xi$ ,

$$n_r = \frac{f_a^2 - f_b^2}{2 f_r^2} = \frac{\Delta f}{f_r} \quad (1.84)$$

ve

$$\xi = 2 * n_r \quad (1.85)$$

ifadesiyle hesaplanır.



Şekil 1.29. Frekans davranış fonksiyonundan modal sönüm oranının elde edilmesi

Bu yöntemde sönüm maksimum genliğe bağlı olarak hesaplandığından dolayı, maksimum genlik değeri ne kadar doğru olarak hesaplanırsa, yapının sönümü de o kadar doğru hesaplanır. Bu yöntem, frekans davranış fonksiyonunda rezonans frekanslarının ayrı ayrı elde edildiği durumlarda kullanılır. Modların birbirine çok yakın olduğu bağımlı mod durumunda düzgün sonuçlar elde edilemeyebilir.

### 1.8.2.1.2. Daire Uydurma Yöntemi (Circle-Fit Method)

Daire uydurma yöntemi, frekans davranış fonksiyonunda rezonans bölgelerine daireye benzer bir eğri uydurma mantığına dayanmaktadır. Bu amaçla, rezonans bölgeleri Nyquist grafiği formatında çizilir. Elde edilen şekilden yapıya ait modal parametreler elde edilir. Bu yöntemin işlem adımları aşağıda sıralanmıştır.

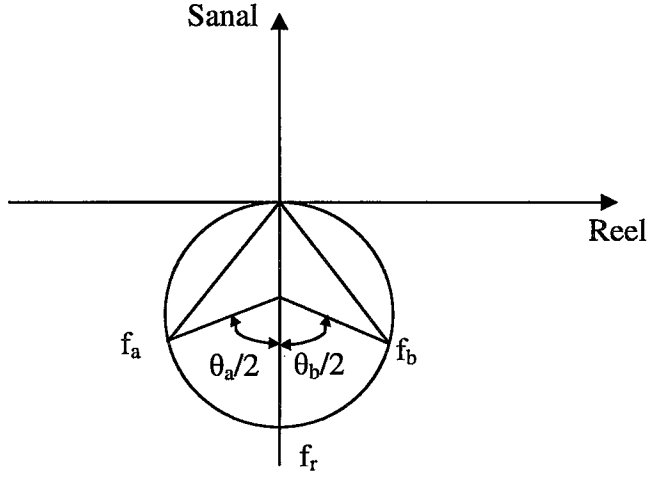
- Yapının doğal frekansları maksimum tarama noktasının belirlenmesiyle elde edilir. Bu nokta  $f=f_r$  olarak ilgili modun frekansıdır.
- Sönüm oranı eğri üzerinde, doğal frekans değerinin aşağısındaki  $f_a$  ve yukarısındaki  $f_b$  değerleri kullanılarak,

$$\xi_r = \frac{f_a^2 - f_b^2}{f_r^2 \{ \tan(\theta_a/2) + \tan(\theta_b/2) \}} \quad (1.86)$$

ifadesiyle elde edilir (Şekil 1.30). Eğer  $\theta_a = \theta_b = 90^\circ$  olursa bu ifade,

$$\xi_r = \frac{f_a^2 - f_b^2}{2 f_r^2} \quad (1.87)$$

haline dönüşür.



Şekil 1.30. Nyquist grafiğinden sönüm oranının elde edilmesi

### 1.8.2.2. Çok Serbestlik Dereceli Sistemler İçin Kullanılan Yöntemler

Yapıların frekans değerleri birbirine yakınsa yani bağımlı mod durumu mevcutsa tek serbestlik dereceli sistemler için olan yöntemlerle modal parametrelerin elde edilmesi zorlaşır. Bu nedenle çok serbestlik dereceli sistemler için yöntemler geliştirilmiştir.

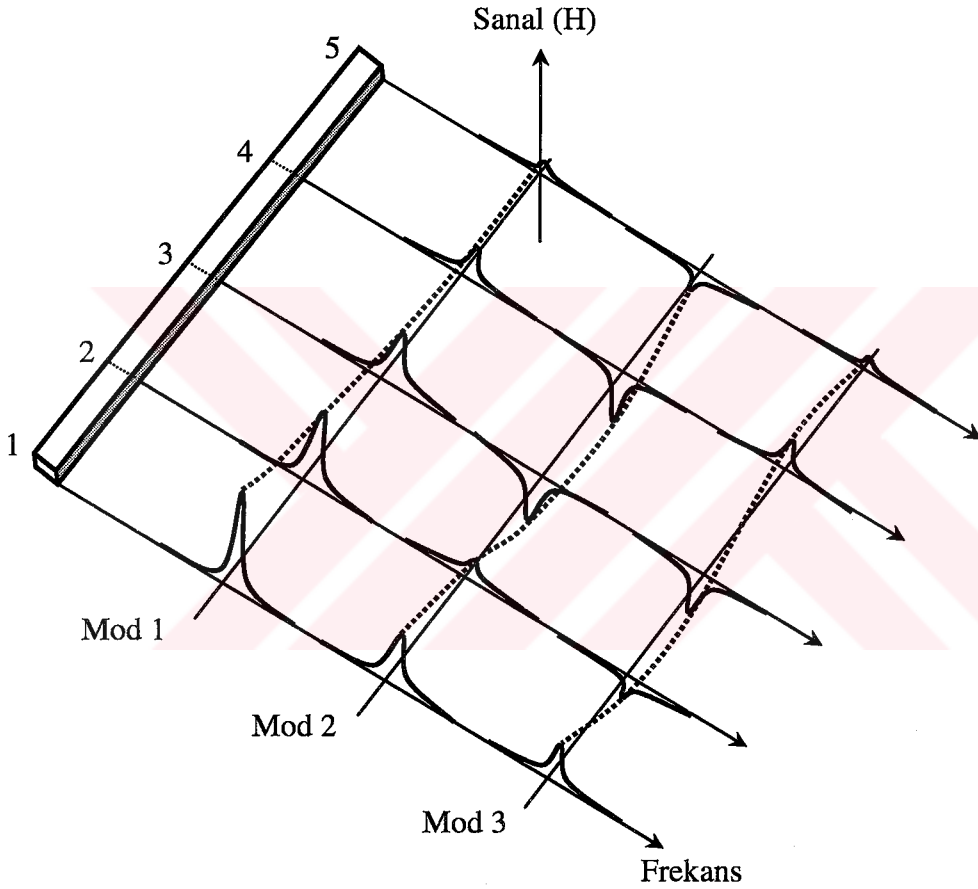
Çok serbestlik dereceli sistemler için modal parametrelerin elde edilme yöntemleri, sistemi bir bütün olarak ele aldığından sonuçlar daha güvenilirdir. Bu yöntemleri, frekans ortamındaki frekans ortamında en küçük kareler yöntemi (Least Square Frequency Domain Method-LSFD), frekans ortamında direkt parametrelerin belirlenmesi yöntemi (Frequency Domain Direct Parameter Identification-FDPI) ve kompleks mod gösterge fonksiyonu yöntemi (Complex Mode Indicator Function-CMIF) ile zaman ortamındaki İbrahim zaman ortamı yöntemi (The İbrahim Time Domain-ITD), çoklu referans dayalı en küçük kareler kompleks exponansiyel yöntemi (The Polyreference Least Squares Complex Exponential-LSCE), öz değer sistem uygulama algoritması yöntemi (The Eigensystem Realization Algorithm-ERA) olmak üzere iki gruba ayırmak mümkündür (Al-Nefae, 1991).

### 1.8.3. Mod Şekillerinin Elde Edilmesi

Mod şekillerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan yöntem, ikinci derece toplama (Quadrature Picking) yöntemidir. Bu yöntem, herhangi bir frekansa karşılık gelen

frekans davranış fonksiyonunun genliğinde bütün modların etkisinin olduğu mantığına dayanır. Buna göre, rezonans bölgelerinde frekans davranış fonksiyonunun sanal kısmının değeri modal yerdeğiştirmelerle orantılıdır.

Mod Őekillerini belirlemek için ölçümlerde ivme ölçer sabit bir noktada (referans noktası) dururken çekiçle farklı noktalardan titreşimler uygulanmaktadır. Her bir ölçüm sonucunda elde edilen değerler kullanılarak mod Şekilleri belirlenir. Tipik bir konsol kiriş eleman için mod Şekillerinin elde edilişi Şekil 1.31’de gösterilmiştir (Dossing, 1988).



Şekil 1.31. Tipik bir konsol kiriş eleman için mod Şekillerinin elde edilişi

#### 1.8.4. Modal Parametrelerin Doğruluğu

Yapıya ait modal parametreler elde edildikten sonra, bu modal parametrelerin doğruluğunun belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla birkaç farklı yöntem kullanılmaktadır. Modal parametrelerin kontrolü üç aşamadan oluşur. Birinci aşama, herhangi bir matematiksel işlem içermez sadece görsel kontroldür. Bu aşamada, frekans



davranış fonksiyonunun istenilen şartları sağlayıp sağlamadığına ve mod şekillerinin beklenen şekilde oluşup oluşmadığına bakılır. İkinci aşamada, yapı sonlu elemanlar yöntemiyle çözümlenir ve doğal frekanslar ve mod şekilleri açısından ölçülen değerlerle karşılaştırma yapılır. Üçüncü aşamada ise, modal parametreler arasında bazı matematiksel ifadelerin sağlanıp sağlanmadığına bakılır. Bu matematiksel ifadeler modal sigorta kriteri (Modal Assurance Criteria-MAC), modal ölçek faktörü (Modal Scale Factor-MSF), mod katılım faktörü (Mode Participation Factor-MPF), karşılıklık (Reciprocity), mod aşırı komplekslik faktörü (Mode Overcomplexity Factor) ve modal güvenilirlik faktörü (Modal Confidence Factor-MCF) olarak adlandırılmaktadır (Ewins,1995). Bunlardan ilk ikisi aşağıda verilmektedir.

#### 1.8.4.1. Modal Emniyet Kriteri (Modal Assurance Criteria-MAC)

Modal sigorta kriteri,

$$MAC(A, X) = \frac{\left| \sum_{j=1}^n (\phi_X)_j (\phi_A)_j^* \right|^2}{\left( \sum_{j=1}^n (\phi_X)_j (\phi_X)_j^* \right) \left( \sum_{j=1}^n (\phi_A)_j (\phi_A)_j^* \right)} \quad (1.88)$$

olarak tanımlanır. Burada;  $(\phi_X)_j$  deneysel olarak ölçülen j. mod şekli,  $(\phi_A)$  teorik olarak hesaplanan j. mod şekli,  $(\phi_X)_j^*$  deneysel olarak ölçülen j. mod şeklinin eşleniği,  $(\phi_A)_j^*$  teorik olarak hesaplanan j. mod şeklinin eşleniğini göstermektedir. Eğer deneysel olarak ölçülen mod şekli ile teorik olarak hesaplanan mod şekli aynı moda ait ise MAC değeri yaklaşık olarak 1, farklı modlara ait ise yaklaşık 0 olur. Genellikle MAC değerinin 0.9'den büyük olduğu durumda modların aynı olduğu ve 0.05'den küçük olduğu durumda ise farklı olduğu kabul edilmektedir. MAC değerinin 0.9'dan küçük olarak elde edilmesi,

- Test edilen yapının lineer olmayan özelliklerinden
- Ölçüme karışan gürültülerden
- Ölçüm sinyallerinin yeterince güçlü olmamasından

kaynaklanabilir.

### 1.8.4.2. Modal Ölçek Faktörü (Modal Scale Factor-MSF)

Modal ölçek faktörü,

$$\text{MSF}(X, A) = \frac{\sum_{j=1}^n (\phi_X)_j (\phi_A)_j^*}{\sum_{j=1}^n (\phi_A)_j (\phi_A)_j^*} \quad (1.89)$$

veya

$$\text{MSF}(A, X) = \frac{\sum_{j=1}^n (\phi_A)_j (\phi_X)_j^*}{\sum_{j=1}^n (\phi_X)_j (\phi_X)_j^*} \quad (1.90)$$

olarak tanımlanır. Burada,  $(\phi_X)_j$  deneysel olarak ölçülen j. mod şekli,  $(\phi_A)_j$  teorik olarak hesaplanan j. mod şekli,  $(\phi_X)_j^*$  deneysel olarak ölçülen j. mod şeklinin eşleniği,  $(\phi_A)_j^*$  teorik olarak hesaplanan j. mod şeklinin eşleniğini göstermektedir. Eğer deneysel ölçülen mod şekli ile teorik olarak hesaplanan mod şekli aynı moda ait ise MSF değeri yaklaşık olarak 1; aksi halde 0 olur.

## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

### 2.1. Giriş

Bu tez çalışmasında, deneysel modal analiz yönteminin inşaat mühendisliği alanındaki gerekliliği ve uygulanabilirliği çelik çerçeve sistemler üzerinde gösterilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla “Genel Bilgiler” bölümünde ayrıntılı olarak anlatılan deneysel modal analiz yöntemi ve ölçüm cihazları kullanılarak oluşturulan modeller üzerinde ölçümler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, oluşturulan modellerin sonlu elemanlar yöntemiyle teorik modal analizleri SAP2000 (SAP2000, 1997) programı kullanılarak yapılmıştır.

Bu bölümde, ilk olarak bir konsol kiriş model daha sonra üç katlı tek açıklıklı düzlem çerçeve model ve son olarak üç katlı tek açıklıklı üç boyutlu çerçeve model oluşturulmuş ve bu modellerin deneysel ve teorik modal analizleri yapılmıştır. Modeller oluşturulurken mevcut deneysel modal analiz cihazı ve ilave parçalarla ölçüm yapılabilmesine dikkat edilmiştir.

### 2.2. Deneysel Modal Analiz Ölçümleri

Oluşturulan modellerin deneysel modal analiz ölçümlerini yapmak amacıyla B&K firmasının üretmiş olduğu çift kanallı bir spektrum analiz edici kullanılmıştır. Bu ölçüm cihazında sinyalleri toplamak amacıyla Kanal A ve Kanal B olarak adlandırılan iki ünite bulunmaktadır. Kanal A’ya yapıyı titreştirmek amacıyla kullanılan çekiç ve Kanal B’ye ise yapının tepkilerini ölçmek amacıyla kullanılan ivme ölçer bağlanmıştır. Yapıya uygulanan kuvvet, çekicinin başlığındaki kuvvet ölçerle ve yapının tepkileri de ivme ölçerle ölçülmüştür.

Deneysel modal analiz ölçümleri için öncelikle modeller istenilen sınır şartlarını sağlayacak şekilde hazırlanmıştır. Bu amaçla konsol kiriş model demir bir sehpaye, diğer modeller ise beton içerisine yerleştirilen demir yüzeylere kaynaklanmıştır. Daha sonra modeller üzerinde çekicinin vurulacağı ve ivme ölçerin bağlanacağı noktalar belirlenmiştir. Bu tez çalışmasında, konsol kiriş model belirli aralıklarla işaretlenen noktalar kullanılarak, düzlem ile üç boyutlu çerçeve modeller ise kolon-kiriş birleşim noktaları kullanılarak

titreştirilmiş ve yine benzer noktalardan ölçümler alınmıştır. Ölçüm işlemi için ölçüm cihazının mevcut modelde oluşan sinyallere göre ayarlanması gerekmektedir. Bunun için öncelikle ölçümün yapılacağı frekans aralığı belirlenmiştir. Ölçümler, modellerin ilk 3 ile 10 frekansının 0-400 Hz frekans aralığında olacağı düşünülerek bu frekans aralığında yapılmıştır. Fourier dönüşümü için “Genel Bilgiler” bölümünde “Ayrık Fourier Dönüşümü” isimli kısımda tanımlanan ifadeler seçilen frekans aralığına bağlı olarak cihaz tarafından otomatik olarak hesaplanmaktadır. Bu değerler hesaplanırken ölçümlerde kullanılan anti-aliasing filtre de dikkate alınmaktadır. Ölçüm frekans aralığı belirlendikten sonra, yapıya çekiçle birkaç kez vurularak kuvvet ölçer ve ivme ölçer hassasiyetleri belirlenmiştir. Kanal A ve Kanal B’de oluşan sinyallere göre ağırlık fonksiyonları düzenlenmiştir. Kanal A’da oluşan etki sinyal için dikdörtgen ağırlık fonksiyonunun özel bir hali olan transient ağırlık fonksiyonu kullanılmıştır. Transient ağırlık fonksiyonunun başlama noktası ve uzunluğu etki sinyaline bağlı olarak belirlenmiştir. Kanal B’de oluşan tepki sinyali için ise exponansiyel ağırlık fonksiyonu kullanılmıştır. Exponansiyel ağırlık fonksiyonunun başlama noktası ve azalma oranı tepki sinyaline göre belirlenmiştir. Kanal A ve Kanal B’deki sinyaller arasındaki zaman farkı dikkate alınarak gecikmeler hesaplanmıştır. Ayrıca gürültüden oluşan etkileri azaltmak amacıyla lineer ortalama yöntemi kullanılmış ve her bir ölçüm için beş ortalama dikkate alınmıştır. Ölçüm işlemi için yapıya belirlenen noktadan bir kez vurulduktan sonra ölçüm cihazının ekranında ilk frekans davranış fonksiyonu elde edilmiştir. Bir sonraki vuruş için titreşimin tamamen yapıdan çıkması, yani kararlı durum şartlarının oluşması, için belirli bir süre beklenmiştir. Her bir yapıya toplam beş kez vurularak ölçüm işlemi tamamlanmıştır. Aynı model üzerinde kuvvet uygulanan nokta ve/veya ivme ölçer bağlanan nokta değiştirilerek ölçümler tekrarlanmıştır.

Ölçüm işlemi tamamlandıktan sonra ölçüm cihazının ekranında oluşan frekans davranış fonksiyonunun ilk kontrolü yapılmıştır. Yeterli şartları sağlayan frekans davranış fonksiyonları üzerinde yapıya ait modal parametreler elde edilmiştir.

### 2.3. Teorik Modal Analizler

Oluşturulan modellerin teorik modal analizleri SAP2000 (SAP2000, 1997) sonlu elemanlar programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kiriş elemanlar kullanılarak yapıların analitik modelleri oluşturulmuştur. Kullanılan malzemenin lineer elastik izotropik bir

malzeme olduğu kabul edilmiştir. Malzeme özellikleri ve kesit değerleri girildikten sonra yapılara ait serbestlik dereceleri belirlenerek modelleme tamamlanmıştır. Konsol kiriş ve düzlem çerçeve modeller için  $U_x$ ,  $U_z$  ve  $\theta_y$  serbestlikleri dikkate alınırken, üç boyutlu çerçeve model için  $U_x$ ,  $U_y$ ,  $U_z$ ,  $\theta_x$ ,  $\theta_y$ , ve  $\theta_z$  serbestlikleri dikkate alınmıştır.

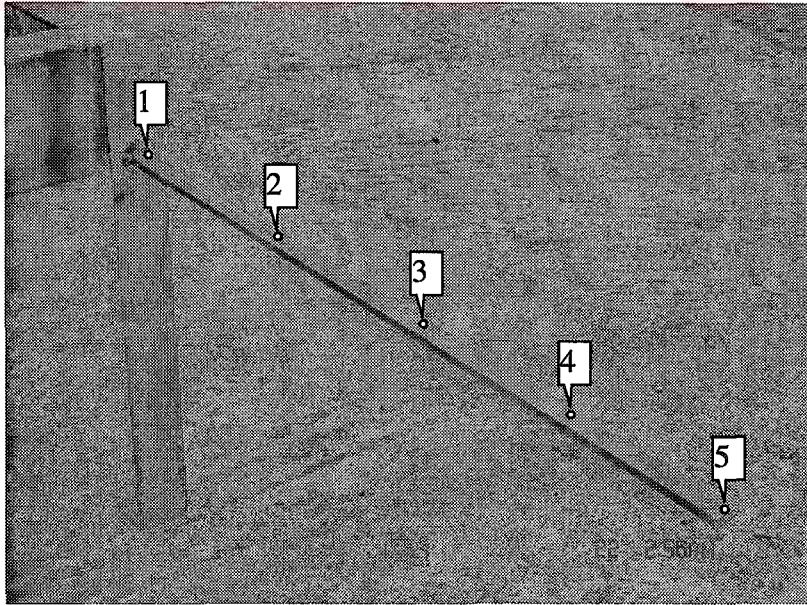
Modal analizler yapılarak yapılara ait doğal frekanslar ve mod şekilleri elde edilmiştir.

## 2.4. Konsol Kiriş Modeli

### 2.4.1. Yapısal Model

Konsol kiriş modeli, dikdörtgen ve dolu kesitli bir malzeme kullanılarak oluşturulmuştur. Kirişin bir ucu sabit bir yüzeye kaynaklanarak ankastre mesnet şartı sağlanmaya çalışılmış ve diğer ucu ise serbest bırakılmıştır. Oluşturulan konsol kiriş modeli Şekil 2.1’de görülmektedir.

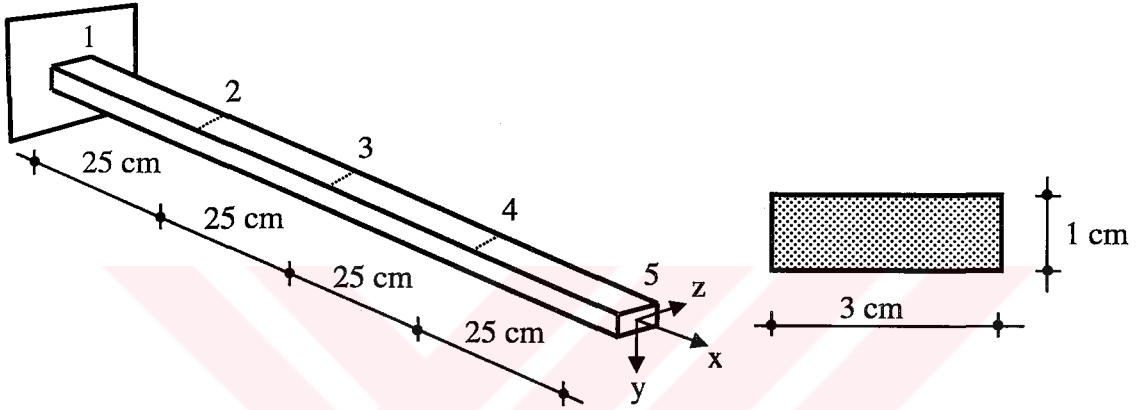
Şekil 2.1’de numaralandırılan noktalar, kuvvetin uygulandığı ve tepkilerin ölçüldüğü noktaları göstermektedir. Konsol kiriş modelin ön analizinde ilk dört frekans 0-400 Hz frekans aralığında elde edildiğinden dolayı ölçümler bu frekans aralığında yapılmıştır.



Şekil 2.1. Konsol kiriş modeli

### 2.4.2. Sonlu Elemanlar Modeli

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak konsol kirişin modal analizi gerçekleştirilmiştir. Konsol kirişin sonlu elemanlar modeli, kiriş (beam) elemanlar kullanılarak oluşturulmuştur. Mesnet noktasının bütün serbestlikleri tutularak ankastre mesnet şartı sağlanmıştır. Diğer bütün düğüm noktalarının ise  $U_x$ ,  $U_y$  ve  $\theta_z$  serbestliklerine sahip oldukları kabul edilmiştir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Konsol kirişin sonlu elemanlar modeli

### 2.4.3. Malzeme Özellikleri

Konsol kiriş modelde kullanılan malzemenin lineer elastik bir malzeme olduğu kabul edilmiştir. Kullanılan malzemeye ait özellikler Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1. Konsol kiriş model için kullanılan malzeme özellikleri

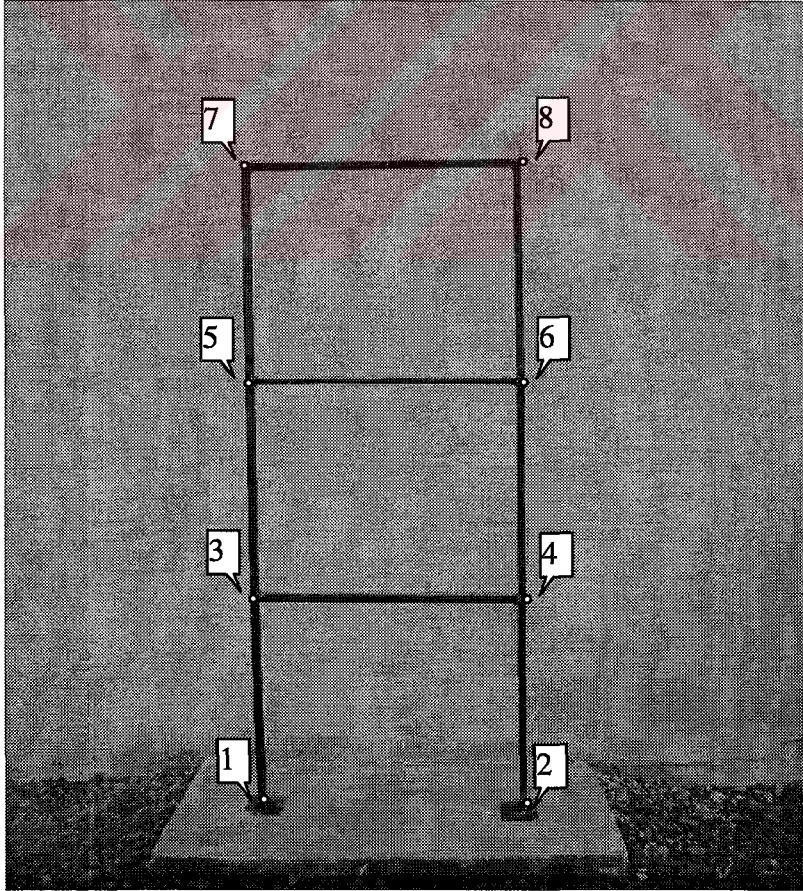
Konsol Kiriş Modelin Malzeme Özellikleri	
Kesit Alanı ( $m^2$ )	$3.0 \cdot 10^{-4}$
Atalet Momenti ( $m^4$ )	$2.5 \cdot 10^{-9}$
Elastisite Modülü ( $N/m^2$ )	$2.06182 \cdot 10^{11}$
Poisson Oranı	0.3
Kütle Yoğunluğu ( $kg/m^3$ )	7850

## 2.5. Düzlem Çerçeve Modeli

### 2.5.1. Yapısal Model

Düzlem çerçeve modeli olarak dikdörtgen ve dolu kesitli malzemeler kullanılarak üç katlı tek açıklıklı bir model oluşturulmuştur. Kolon ve kiriş elemanlarda aynı malzeme kullanılmıştır. Kolon-kiriş birleşimleri, kaynaklı birleşim kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, kolon ayakları zeminde oluşturulan sabit bir yüzeye kaynaklanarak ankastre mesnet şartları sağlanmaya çalışılmıştır. Oluşturulan düzlem çerçeve model Şekil 2.3'te verilmiştir.

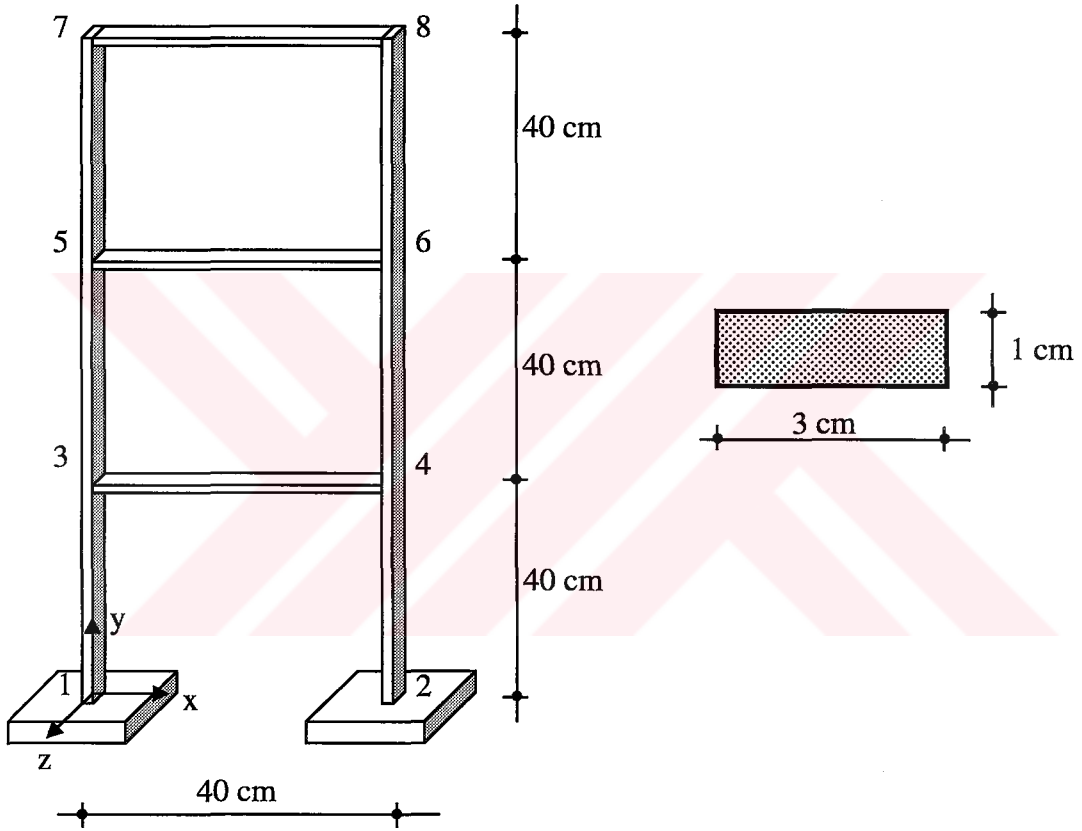
Ölçümlerde, kuvvetin uygulanması ve tepkilerin ölçülmesi kolon kiriş birleşim noktaları üzerinde gerçekleştirilmiş olup, bu noktalar Şekil 2.3'te görüldüğü şekilde numaralandırılmıştır. 0-400 Hz frekans aralığında deneysel modal analiz ölçümleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.3. Düzlem çerçeve modeli

### 2.5.2. Sonlu Elemanlar Modeli

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak düzlem çerçevenin modal analizi gerçekleştirilmiştir. Düzlem çerçevenin sonlu elemanlar modeli kiriş elemanlar kullanılarak oluşturulmuştur. Mesnet noktalarının bütün serbestlikleri tutularak ankastre mesnet şartları sağlanmıştır. Diğer bütün düğüm noktalarının ise  $U_x$ ,  $U_y$  ve  $\theta_z$  serbestliklerine sahip oldukları kabul edilmiştir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Düzlem çerçevenin sonlu elemanlar modeli

### 2.5.3. Malzeme Özellikleri

Düzlem çerçeve modelde kullanılan malzeme, Tablo 2.1'de verilen konsol kiriş model için kullanılan malzeme ile aynı olduğundan bu kısımda tekrar verilmemiştir.

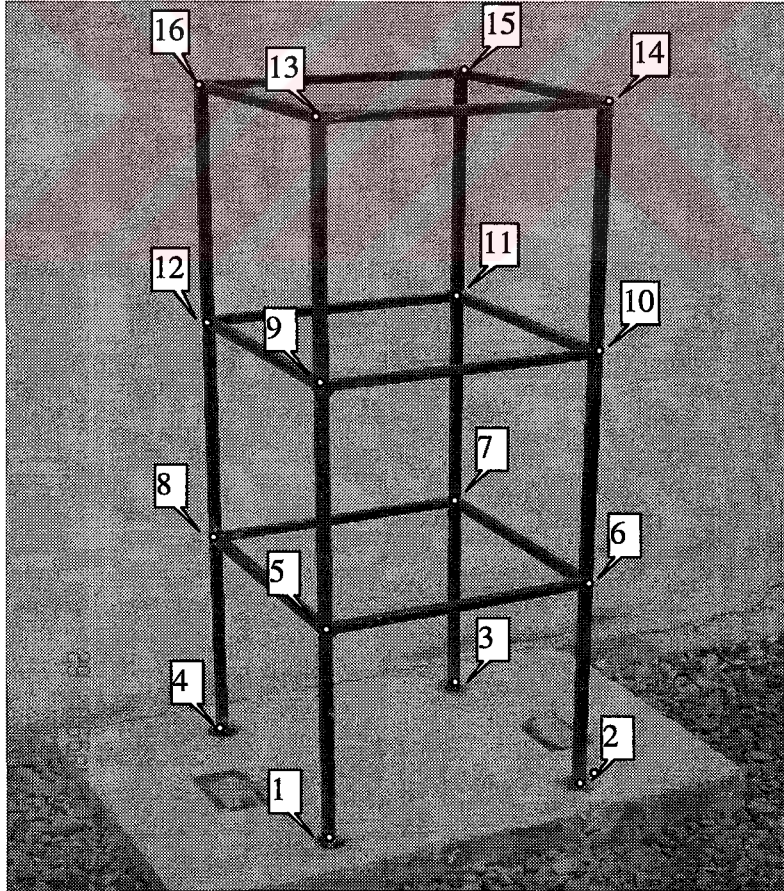


## 2.6. Üç Boyutlu Çerçeve Modeli

### 2.6.1. Yapısal Model

Üç boyutlu çerçeve modeli olarak, kare ve dolu kesitli malzeme kullanılarak üç katlı tek açıklıklı bir model oluşturulmuştur. Kolon ve kiriş elemanlarda aynı malzeme kullanılmıştır. Kolon-kiriş birleşimleri, kaynaklı birleşim kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, kolon ayakları zeminde oluşturulan sabit bir yüzeye kaynaklanarak ankastre mesnet şartları sağlanmaya çalışılmıştır. Oluşturulan üç boyutlu çerçeve model Şekil 2.5'te verilmiştir.

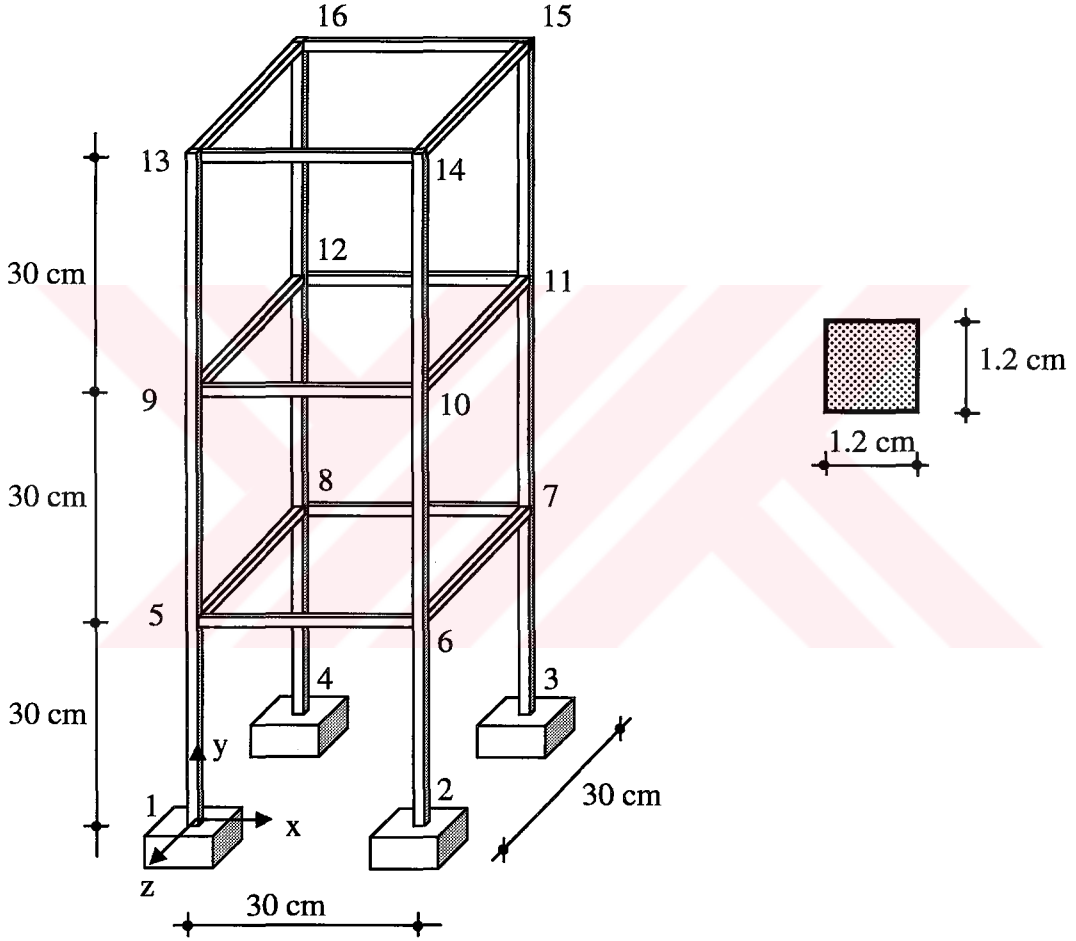
Ölçümlerde, kuvvetin uygulanması ve tepkilerin ölçülmesi kolon kiriş birleşim noktaları üzerinde gerçekleştirilmiş olup, bu noktalar Şekil 2.5'te görüldüğü şekilde numaralandırılmıştır. Üç boyutlu çerçeve modelin modal analizinde ilk sekiz frekans 0-200 Hz frekans aralığında elde edildiğinden dolayı ölçümler bu frekans aralığında yapılmıştır.



Şekil 2.5. Üç boyutlu çerçeve modeli

### 2.6.2. Sonlu Elemanlar Modeli

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak üç boyutlu çerçevenin modal analizi gerçekleştirilmiştir. Üç boyutlu çerçevenin sonlu elemanlar modeli kiriş elemanlar kullanılarak oluşturulmuştur. Mesnet noktalarının bütün serbestlikleri tutularak ankastre mesnet şartları sağlanmıştır. Diğer bütün düğüm noktalarının ise  $U_x$ ,  $U_y$ ,  $U_z$ ,  $\theta_x$ ,  $\theta_y$  ve  $\theta_z$  serbestliklerine sahip oldukları kabul edilmiştir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. Üç boyutlu çerçevenin sonlu elemanlar modeli

### 2.6.3. Malzeme Özellikleri

Üç boyutlu modelde malzemenin lineer elastik bir malzeme olduğu kabul edilmiştir. Kullanılan malzemeye ait özellikler Tablo 2.2'de verilmiştir.

Tablo 2.2. Üç boyutlu çerçeve model için kullanılan malzeme özellikleri

Üç Boyutlu Çerçeve Modelin Malzeme Özellikleri	
Kesit Alanı (m <sup>2</sup> )	1.44*10 <sup>-4</sup>
Atalet Momenti (m <sup>4</sup> )	1.728*10 <sup>-9</sup>
Elastisite Modülü (N/m <sup>2</sup> )	2.06182*10 <sup>11</sup>
Poisson Oranı	0.3
Kütle Yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )	7850



## **3. BULGULAR VE İRDELEMELER**

### **3.1. Giriş**

Bu bölümde, oluşturulan modeller üzerinde gerçekleştirilen deneysel modal analiz ölçümlerinden ve aynı modellerin sonlu elemanlar yöntemiyle modal analizlerinden elde edilen bulgular ve irdelemeler verilmiştir. Ölçümler sonucunda, yapılara ait modal parametreler olarak adlandırılan doğal frekanslar, sönüm oranları ve mod şekilleri elde edilmiştir. Ayrıca, sonlu elemanlar yöntemiyle analizler sonucunda, yine yapılara ait doğal frekanslar ve mod şekilleri hesaplanmıştır.

Deneysel modal analiz ölçümleri sonucunda elde edilen frekans davranış fonksiyonları ve uygunluk fonksiyonları her bir model için ayrı ayrı verilmiştir. Yapılara ait frekans davranış fonksiyonları kullanılarak, doğal frekanslar ve sönüm oranları elde edilmiş ve tablolar halinde sunulmuştur. Ayrıca, mod şekilleri frekans davranış fonksiyonunun sanal kısmından belirlenmiş ve grafik olarak çizilmiştir. Teorik modal analizler neticesinde hesaplanan doğal frekanslar ve mod şekilleri her bir yapı için ayrı ayrı verilmiştir. Son olarak, deneysel ve teorik analiz sonuçları karşılaştırılmış ve sonuçlar üzerinden değerlendirmeler yapılmıştır.

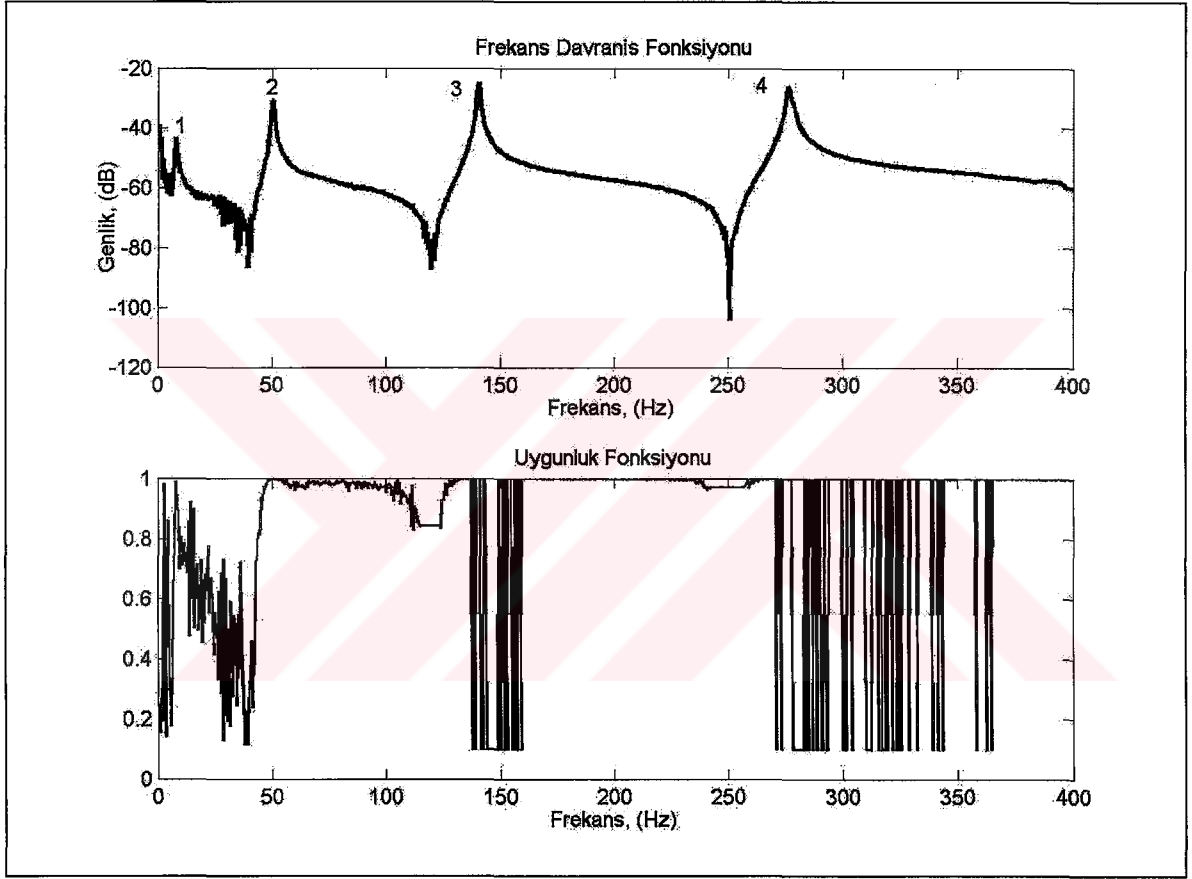
### **3.2. Konsol Kiriş Model Sonuçları**

Konsol kiriş modele ait sonuçlar, deneysel modal analiz sonuçları ve teorik analiz sonuçları olmak üzere iki şekilde verilecektir. Ayrıca deneysel ve teorik sonuçların karşılaştırılması yapılacaktır.

#### **3.2.1. Deneysel Modal Analiz Ölçüm Sonuçları**

Deneysel modal analiz ölçümleri sonucunda konsol kiriş modele ait frekans davranış fonksiyonu ve uygunluk fonksiyonu Şekil 3.1'de verilmektedir. Bu frekans davranış fonksiyonu kuvvetin 5 numaralı noktaya uygulanması ve tepkinin de aynı noktadan ölçülmesi durumunda elde edilmiştir.

Modal parametreler elde edilmeye başlamadan önce, “Genel Bilgiler” bölümünde “Modal Parametrelerin Elde Edilmesi” isimli kısımda ayrıntılı olarak anlatılan frekans davranış fonksiyonunun kontrollerin yapılması modal parametrelerin doğru elde edilebilmesi açısından fayda sağlamaktadır. Şekil 3.1’den de görüldüğü üzere ölçülen frekans davranış fonksiyonu belirtilen ön şartları sağlamaktadır. Numaralandırılan her bir tepe noktası sırasıyla konsol kirişe ait modların frekanslarını göstermektedir.



Şekil 3.1. Konsol kiriş modele ait frekans davranış fonksiyonu ve uygunluk fonksiyonu

Frekans davranış fonksiyonu kullanılarak konsol kiriş modele ait elde edilen modal parametreler aşağıda verilmektedir.

• Doğal frekanslar ve sönüm oranları:

Tablo 3.1’de konsol kiriş modele ait deneysel olarak elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları verilmektedir.

Tablo 3.1. Konsol giriş modele ait deneysel modal analiz sonucunda elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları

Mod No	Doğal Frekans (Hz)	Sönüm Oranı (%)
1	<b>8.00</b>	----
2	<b>50.50</b>	<b>0.500</b>
3	<b>140.50</b>	<b>0.178</b>
4	<b>276.00</b>	<b>0.181</b>

• *Mod Şekilleri:*

Frekans davranış fonksiyonunun sanal kısmının değerleri kullanılarak elde edilen mod şekil değerleri Tablo 3.2’de verilmektedir. Bu tabloda, satırlar kuvvetin uygulanma noktasına bağlı olarak elde edilen frekans davranış fonksiyonunun değerlerini gösterirken, sütunlar ise her bir modun ölçüm noktalarına göre değişimini göstermektedir.

Tablo 3.2. Konsol giriş modele ait frekans davranış fonksiyonunun sanal kısmının değerleri

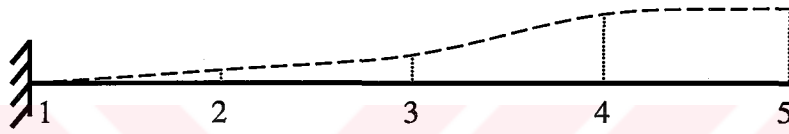
Mod \ F	1	2	3	4
5	<b>(7.08)</b>	<b>(22.30)</b>	<b>(57.60)</b>	<b>47.10</b>
4	<b>6.57</b>	<b>-3.33</b>	<b>-45.60</b>	<b>-15.40</b>
3	<b>2.71</b>	<b>-19.30</b>	<b>3.80</b>	<b>(49.80)</b>
2	<b>0.13</b>	<b>-15.30</b>	<b>26.30</b>	<b>-46.10</b>

Normalleştirilmiş mod değerlerini elde etmek için, her kolon, kolonun maksimum değerine bölünür. Bu maksimum değerler Tablo 3.2’de ( ) şeklinde gösterilmiştir. Normalleştirilmiş mod değerleri Tablo 3.3’te verilmiştir.

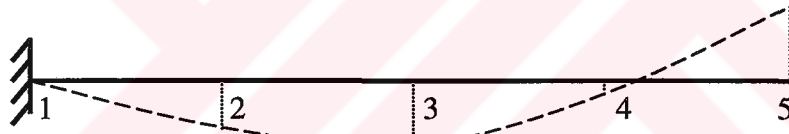
Tablo 3.3. Konsol kiriş modele ait normalize edilmiş mod değerleri

F \ Mod	1	2	3	4
5	<b>1.000</b>	<b>1.000</b>	<b>1.000</b>	<b>0.946</b>
4	<b>0.928</b>	<b>-0.149</b>	<b>-0.792</b>	<b>-0.309</b>
3	<b>0.383</b>	<b>-0.865</b>	<b>0.066</b>	<b>1.000</b>
2	<b>0.018</b>	<b>-0.686</b>	<b>0.457</b>	<b>-0.926</b>

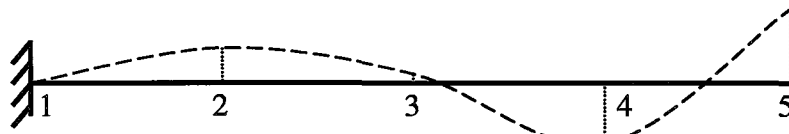
Normalize edilmiş mod değerleri kullanılarak çizilen mod şekilleri Şekil 3.2'de gösterilmektedir.



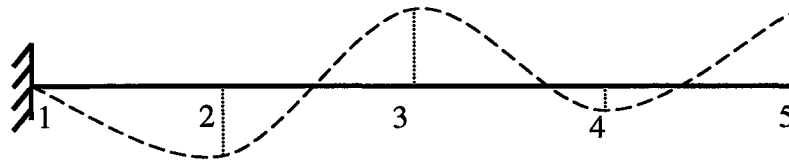
Mod # 1, 8.00 Hz



Mod # 2, 50.50 Hz



Mod # 3, 140.50 Hz



Mod # 4, 276.00 Hz

Şekil 3.2. Konsol kiriş modele ait deneysel modal analiz sonucunda elde edilen mod şekilleri

### 3.2.2. Teorik Modal Analiz Sonuçları

SAP2000 sonlu elemanlar programı kullanılarak yapılan teorik modal analiz sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Doğal frekanslar:

Tablo 3.4'te konsol giriş modele ait teorik olarak elde edilen doğal frekanslar verilmektedir.

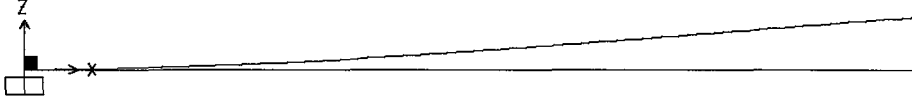
Tablo 3.4. Konsol giriş modele ait teorik analiz sonucunda elde edilen doğal frekanslar

Mod No	Doğal Frekans (Hz)
1	8.24
2	51.07
3	141.56
4	274.50

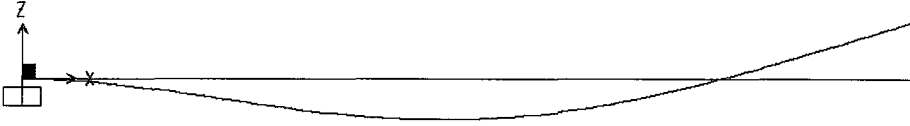
- Mod şekilleri:

Şekil 3.3'te konsol giriş modele ait teorik olarak elde edilen mod şekilleri verilmiştir.

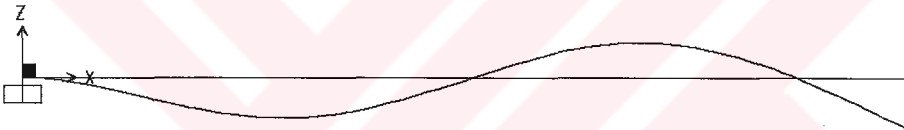




Mod # 1, 8.24 Hz



Mod # 2, 51.07 Hz



Mod # 3, 141.56 Hz



Mod # 4, 274.50 Hz

Şekil 3.3. Konsol kiriş modele ait teorik analiz sonucunda elde edilen mod şekilleri

### 3.2.3. Deneysel ve Teorik Modal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

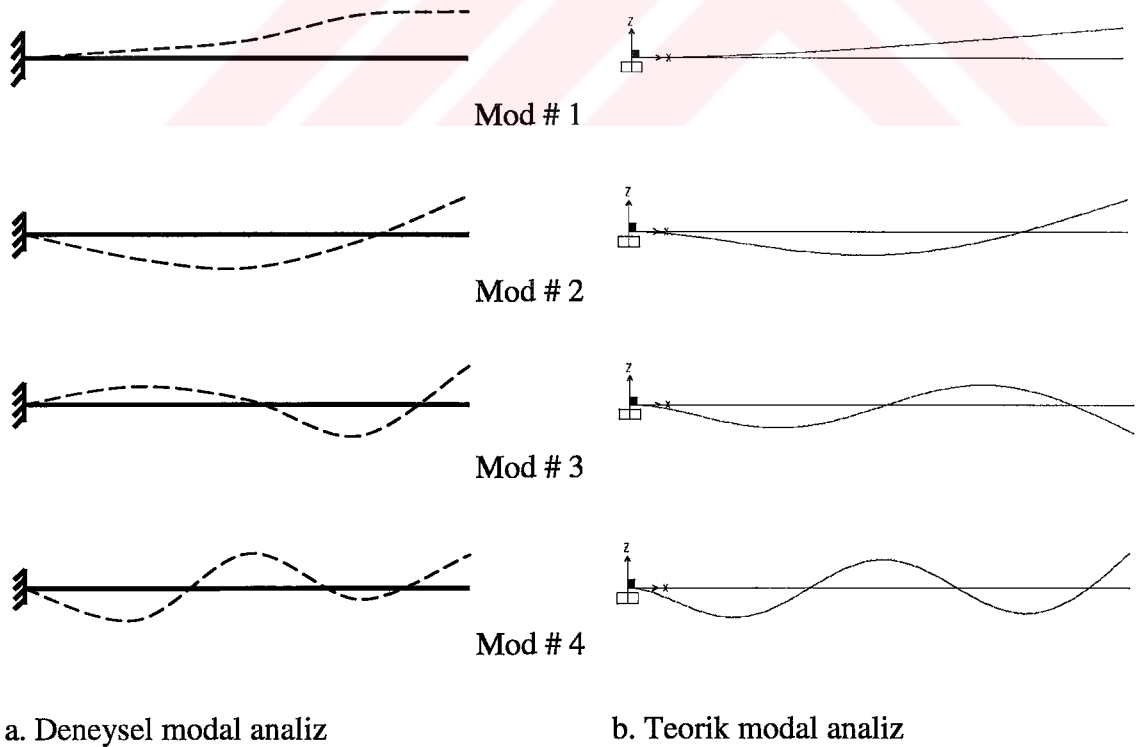
Deneysel ve teorik analizler neticesinde elde edilen doğal frekansların karşılaştırılması ve sonuçlar arasındaki farklılık Tablo 3.5'te verilmiştir.

Tablo 3.5. Konsol kiriş modelin deneysel ve teorik modal analizi sonucunda elde edilen doğal frekansların karşılaştırılması

Mod No	Deneysel Modal Analiz (Hz)	Teorik Modal Analiz (Hz)	Fark (%)
1	<b>8.00</b>	<b>8.24</b>	<b>3.01</b>
2	<b>50.50</b>	<b>51.07</b>	<b>1.13</b>
3	<b>140.50</b>	<b>141.56</b>	<b>0.75</b>
4	<b>276.00</b>	<b>274.50</b>	<b>0.54</b>

Doğal frekanslar açısından bakıldığında deneysel ve teorik modal analiz sonuçlarının birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Oluşturulan konsol kiriş modelin basit bir model olması, kuvvetin uygulandığı yönde kirişin titreşim yapması ve etki ve tepki noktalarının birbirine yakın olması nedeniyle konsol kirişe ait frekans davranış fonksiyonu ve uygunluk fonksiyonu düzgün olarak elde edilebilmiştir. Dolayısıyla modal parametreler de birbirine oldukça yakın olarak belirlenmiştir.

Deneysel ve teorik modal analizler sonucunda elde edilen mod şekillerinin karşılaştırılması Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4. Konsol kiriş modelin deneysel ve teorik modal analizleri sonucunda elde edilen mod şekilleri karşılaştırılması

Mod şekilleri açısından bakıldığında, deneysel ve teorik modal analiz ile konsol giriş modelin mod şekillerinin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Konsol giriş modelin basit bir model olmasından dolayı deneysel mod şekilleri rahatlıkla elde edilebilmiştir.

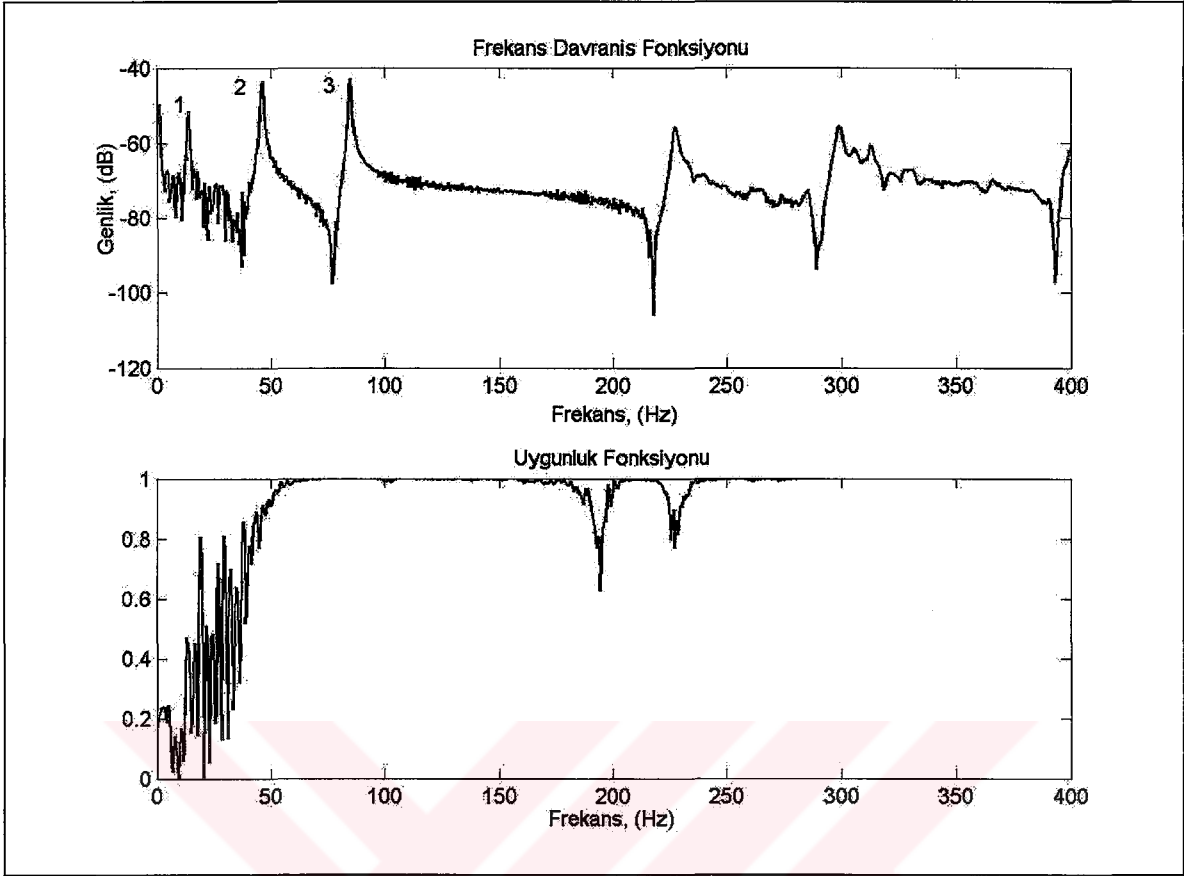
### **3.3. Düzlem Çerçeve Model Sonuçları**

Düzlem çerçeve modele ait sonuçlar, konsol giriş modelde olduğu gibi, deneysel modal analiz sonuçları ve teorik analiz sonuçları olmak üzere iki şekilde verilecektir. Ayrıca deneysel ve teorik sonuçların karşılaştırılması yapılacaktır.

#### **3.3.1. Deneysel Modal Analiz Ölçüm Sonuçları**

Deneysel modal analiz ölçümleri sonucunda, düzlem çerçeve modele ait frekans davranış fonksiyonu ve uygunluk fonksiyonu Şekil 3.5'te verilmiştir. Bu frekans davranış fonksiyonu kuvvetin 7 numaralı düğüm noktasına uygulanması ve tepkinin de 8 numaralı düğüm noktasından ölçülmesi durumunda elde edilmiştir.

Konsol giriş modelde olduğu gibi, modal parametreler elde edilmeye başlamadan önce frekans davranış fonksiyonunun kontrolleri yapılmıştır. Numaralandırılan her bir tepe noktası sırasıyla düzlem çerçeveye ait modların frekanslarını göstermektedir.



Şekil 3.5. Düzlem çerçeve modele ait frekans davranış fonksiyonu ve uygunluk fonksiyonu

Frekans davranış fonksiyonu kullanılarak düzlem çerçeve modele ait elde edilen modal parametreler aşağıda verilmiştir.

• Doğal frekanslar ve sönüm oranları:

Tablo 3.6'da düzlem çerçeve modele ait deneysel olarak elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları verilmiştir.

Tablo 3.6. Düzlem çerçeve modele ait deneysel modal analiz sonucunda elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları

Mod No	Doğal Frekans (Hz)	Sönüm Oranı (%)
1	14.00	1.786
2	46.50	0.538
3	85.00	0.294

İvme ölçer sayısının az olması ve yapının kuvvet uygulanan doğrultu haricindeki doğrultularda da titreşim yapması nedeniyle hem frekans davranış fonksiyonunda bozulmalar olmuş hem de mod şekilleri elde edilememiştir.

### 3.3.2. Teorik Modal Analiz Sonuçları

SAP2000 sonlu elemanlar programı kullanılarak yapılan teorik modal analiz sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda verilmektedir.

- Doğal frekanslar:

Tablo 3.7’de düzlem çerçeve modele ait teorik olarak elde edilen doğal frekanslar verilmiştir.

Tablo 3.7. Düzlem çerçeve modele ait teorik analiz sonucunda elde edilen doğal frekanslar

Mod No	Doğal Frekans (Hz)
1	13.98
2	46.15
3	83.13
4	151.98

Teorik modal analiz sonucunda mod şekilleri hesaplanmış olmasına rağmen deneysel ölçümlerden mod şekilleri elde edilemediğinden dolayı teorik mod şekilleri verilmemiştir.

### 3.3.3. Deneysel ve Teorik Modal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

Deneysel ve teorik modal analizler neticesinde elde edilen doğal frekansların karşılaştırılması ve sonuçlar arasındaki farklılık Tablo 3.8’de verilmektedir.

Tablo 3.8. Düzlem çerçeve modelin deneysel ve teorik modal analizi sonucunda elde edilen doğal frekansların karşılaştırılması

Mod No	Deneysel Modal Analiz (Hz)	Teorik Modal Analiz (Hz)	Fark (%)
1	14.00	13.98	0.14
2	46.50	46.15	0.75
3	85.00	83.13	2.20

Deneysel ve teorik modal analizler neticesinde elde edilen doğal frekansların birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Fakat ölçümlerde sadece bir tane ivme ölçer kullanılması, yapının kuvvet uygulanan doğrultu haricindeki doğrultularda da titreşim yapması ve modelin oluşturulması ve mesnet şartlarının sağlanmasında oluşan sıkıntılar nedeniyle frekans davranış fonksiyonu düzgün olarak elde edilememiştir. Bunun sonucunda da mod şekilleri belirlenememiştir.

### 3.4. Üç Boyutlu Çerçeve Model Sonuçları

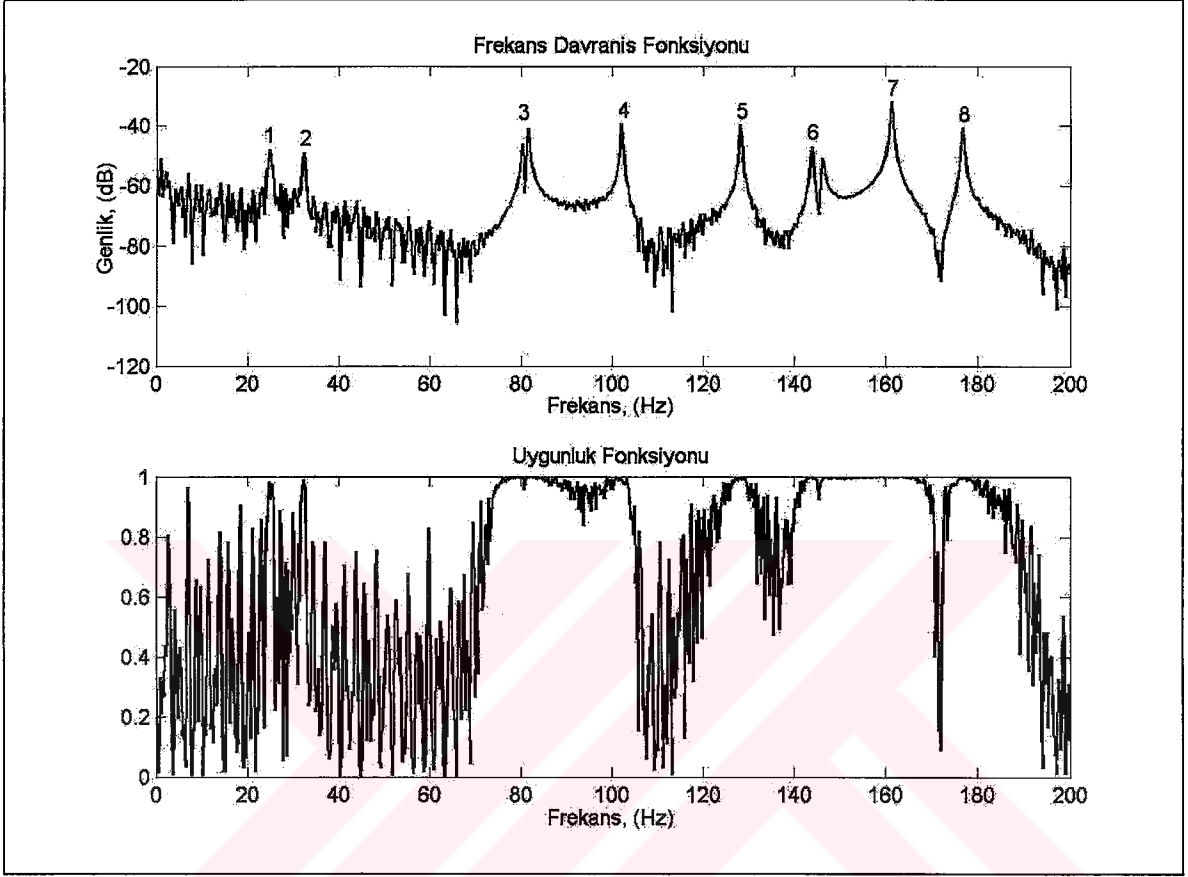
Üç boyutlu çerçeve modele ait sonuçlar, önceki modellerde olduğu şekilde, deneysel modal analiz sonuçları ve teorik analiz sonuçları olmak üzere iki şekilde verilmiştir. Ayrıca deneysel ve teorik sonuçların karşılaştırılması yapılmıştır.

#### 3.4.1. Deneysel Modal Analiz Ölçüm Sonuçları

Deneysel modal analiz ölçümleri sonucunda üç boyutlu çerçeve modele ait frekans davranış fonksiyonu ve uygunluk fonksiyonu Şekil 3.6'da verilmektedir. Bu frekans davranış fonksiyonu kuvvetin 13 numaralı düğüm noktasına uygulanması ve tepkinin de 14 numaralı düğüm noktasından ölçülmesi durumunda elde edilmiştir.

Önceki modellerde olduğu şekilde, modal parametreler elde edilmeye başlamadan önce frekans davranış fonksiyonunun kontrollerinin yapılmıştır. Şekil 3.6'dan da görüldüğü üzere ölçülen frekans davranış fonksiyonu belirtilen ön şartları yeterince sağlamamaktadır. Buna rağmen, frekans davranış fonksiyonundan modal parametreler elde

edilerek teorik modal analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Numaralandırılan her bir tepe noktası sırasıyla üç boyutlu çerçeveye ait modların frekanslarını göstermektedir.



Şekil 3.6. Üç boyutlu çerçeve modele ait frekans davranış ve uygunluk fonksiyonu

Frekans davranış fonksiyonu kullanılarak üç boyutlu çerçeve modele ait elde edilen modal parametreler aşağıda verilmiştir.

- Doğal frekanslar ve sönüm oranları:

Tablo 3.9'da üç boyutlu çerçeve modele ait deneysel modal analiz sonucunda elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları verilmektedir.

Tablo 3.9. Üç boyutlu çerçeve modele ait deneysel modal analiz sonucunda elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları

Mod No	Doğal Frekans (Hz)	Sönüm Oranı (%)
1	24.75	1.657
2	32.25	1.496
3	81.50	1.645
4	102.00	0.730
5	128.00	---
6	143.75	---
7	161.25	---
8	176.75	---

İvme ölçer sayısının az olması, yapının kuvvet uygulanan doğrultu haricindeki doğrultularda da titreşim yapması ve modelin karmaşık bir model olması nedeniyle hem frekans davranış fonksiyonunda bozulmalar olmuş hem de mod şekilleri elde edilememiştir.

### 3.4.2. Teorik Modal Analiz Sonuçları

SAP2000 sonlu elemanlar programı kullanılarak yapılan modal analiz sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda verilmektedir.

- *Doğal frekanslar:*

Tablo 3.10'da üç boyutlu çerçeve modele ait teorik analiz sonucunda elde edilen doğal frekanslar verilmiştir.



Tablo 3.10. Üç boyutlu çerçeve modele ait teorik analiz sonucunda elde edilen doğal frekanslar

Mod No	Doğal Frekans (Hz)
1	24.62
2	32.54
3	80.50
4	102.15
5	125.93
6	142.87
7	160.53
8	173.51

Teorik modal analiz sonucunda mod şekilleri hesaplanmış olmasına rağmen deneysel ölçümlerden mod şekilleri elde edilemediğinden dolayı teorik mod şekilleri verilmemiştir.

### 3.4.3. Deneysel ve Teorik Modal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

Deneysel ve teorik modal analizler neticesinde elde edilen doğal frekansların karşılaştırılması ve sonuçlar arasındaki farklılık Tablo 3.11’de verilmektedir.

Tablo 3.11. Üç boyutlu çerçeve modelin deneysel ve teorik modal analizi sonucunda elde edilen doğal frekansların karşılaştırılması

Mod No	Deneysel Modal Analiz (Hz)	Teorik Modal Analiz (Hz)	Fark (%)
1	24.75	24.62	0.53
2	32.25	32.54	0.89
3	81.50	80.50	1.24
4	102.00	102.15	0.15
5	128.00	125.93	1.64
6	143.75	142.87	0.62
7	161.25	160.53	0.45
8	176.75	173.51	1.87

Deneyisel ve teorik modal analizler neticesinde, elde edilen doğal frekansların birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Fakat ölçümlerde sadece bir tane ivme ölçer kullanılması, yapının kuvvet uygulanan doğrultu haricinde doğrultularda da titreşim yapması, modelin oluşturulmasında ve mesnet şartlarının sağlanmasından oluşan sıkıntılar nedeniyle frekans davranış fonksiyonunda bozulmalar oluşmuştur.



#### 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, deneysel modal analiz yönteminin inşaat mühendisliği alanındaki gerekliliği ve uygulanabilirliği çelik çerçeve sistemler kullanılarak gösterilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla oluşturulan modeller üzerinde deneysel modal analiz ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel modal analiz ölçümlerinde model yapıları titreştirmek amacıyla çekiç, yapıların tepkilerini ölçmek amacıyla ivme ölçer ve sinyalleri değerlendirmek amacıyla bir spektrum analiz edici kullanılmıştır. Kullanılan ölçüm cihazları Brüel&Kjaer firması tarafından üretilmiştir. Ölçümler sonucunda elde edilen frekans davranış fonksiyonları kullanılarak seçilen çelik çerçeve modellere ait modal parametreler olarak adlandırılan doğal frekanslar, sönüm oranları ve mod şekilleri elde edilmiştir. Ayrıca oluşturulan modellerin teorik modal analizleri sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak SAP2000 programıyla gerçekleştirilmiştir. Teorik modal analizlerde, yapılar iki boyutlu çubuk (kiriş) elemanlar kullanılarak modellenmiş ve kullanılan malzemenin lineer elastik izotropik bir malzeme olduğu kabul edilmiştir. Deneysel ve teorik modal analiz sonuçlarının karşılaştırılması yapılarak yöntemin gerekliliği ve uygulanabilirliği gösterilmeye çalışılmıştır.

Uygulama amacıyla, dolu kesitli malzemeler kullanılarak konsol kiriş, düzlem çerçeve ve üç boyutlu çerçeve modeller oluşturulmuştur. Modellerin ayakları sabit bir yüzeye kaynaklanarak ankastre mesnet şartları sağlanmaya çalışılmıştır. Genellikle 0-200 Hz veya 0-400 Hz frekans aralığında modellerin ilk 3 ila 10 frekansları elde edilebildiğinden dolayı ölçümler bu frekans aralıklarında gerçekleştirilmişlerdir.

Bu tez çalışmasından, deneysel modal analiz ölçümlerinin yapılması ile deneysel ve teorik modal analiz sonuçlarının karşılaştırılmasına ilişkin aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- 1) Kuvvetin uygulandığı nokta ile ivme ölçerin bağlandığı noktanın birbirine yakın olması durumunda frekans davranış fonksiyonları daha düzgün olarak elde edilmiştir.
- 2) Kuvvetin uygulanacağı noktanın kesitin simetri ekseninde belirlenmesine ve çekiçle her vuruşta mümkün olduğunca aynı noktaya vurulmasına dikkat edilmiştir. Aksi halde burulma etkileri gibi ikincil etkilerin de oluştuğu ve titreşim enerjisi yapıya istenilen doğrultuda uygulanamadığından dolayı frekans davranış fonksiyonlarında bozulmalar oluştuğu gözlemlenmiştir.

- 3) Ölçümde kullanılan çekiç üç farklı sertlikteki başlığa sahiptir. Modellerde kullanılan malzemeye bağlı olarak çekiç başlığı seçilmiştir. Çekiç başlığının uygun seçilmemesi durumunda, düşük frekanslı bölgede yapı frekanslarının tam olarak elde edilemediği görülmüştür.
- 4) Çekiç ile yapıya vurma hızının, frekans davranış fonksiyonlarını önemli derecede etkilediği belirlenmiştir. Eğer yapıya çok hızlı vurulursa ölçüm kanallarında oldukça yüksek değerlerde sinyaller oluştuğu ve bunun sonucunda uzun ve düşük seviyeli sinyallerde bozulmalar oluştuğu görülmüştür. Eğer yapıya gereğinden yavaş vurulursa, yapı yeterince titreştirilmemiş olacağından dolayı ölçümlere fazla miktarda gürültü karıştığı ve frekans davranış fonksiyonlarının bozulduğu görülmüştür. Ayrıca art arda vuruş şiddetlerinin birbirine yakın olması durumunda frekans davranış fonksiyonları daha düzgün olarak elde edilmiştir.
- 5) Yapıya çekiçle vurulduktan sonra, çekicinin geri tepmemesine dikkat edilmiştir. Çekiçte tepme olması durumunda yapıya peş peşe iki farklı titreşim uygulanmış olduğu ve yapının titreşim hareketlerinin karıştığı görülmüştür.
- 6) Yapıya çekiçle vurularak bir ölçüm yapıldıktan sonra, diğer ölçüm için yapının kararlı duruma gelmesi yani bir önceki titreşimin yapıda tamamen bitmesi gerekmektedir. Bu nedenle, her ölçümden önce belirli bir süre beklenmiştir. Bu durumun özellikle esnek yapılarda ölçüm süresinin uzamasına neden olduğu belirlenmiştir.
- 7) Ölçüm yapılan ortamda mevcut gürültüler ölçüm sonuçlarına olumsuz etkide bulunmaktadır. Bu nedenle, her ölçümden önce kanallarda oluşan sinyallere göre ağırlık fonksiyonları seçilmiş ve kullanılmıştır.
- 8) Her ölçümde, çekiçle uygulanan titreşim ile yapıdan ivme ölçer ile ölçülen tepki arasındaki zaman gecikmesi dikkate alınması ve ölçüm cihazında zaman gecikme ayarlamaları yapılması gerektiği sonucuna varılmıştır.
- 9) Ölçümlerde yapıyı titreştirmek amacıyla kullanılan çekicinin ve yapının tepkilerini ölçmek amacıyla kullanılan ivme ölçerin belirli frekans aralığındaki sinyallerde kullanılabilir olmasından dolayı, büyük ve karmaşık modellerin ölçülmesi durumunda frekans davranış fonksiyonunda bozulmalar ve sonuçlarda farklılaşmalar oluştuğu görülmüştür. Bu nedenle, büyük ve karmaşık modeller oluşturulduğunda daha uygun sarsıcı tipinin kullanılması gerekliliği ortaya çıkmıştır.

- 10) Ölçümlerde yapının tepkisi yapı üzerine bağlanan sadece bir ivme ölçer ile ölçülmüştür. Bunun neticesinde, yapıların tepkileri tam olarak belirlenememiş ve frekans davranış fonksiyonu ve uygunluk fonksiyonunda bozulmalar oluşmuştur. Bu durum üç boyutlu çerçeve modele ait frekans davranış fonksiyonu ve uygunluk fonksiyonundan açıkça görülmektedir.
- 11) Kuvvet uygulanan noktanın ve ivme ölçer bağlanan noktanın yapının serbest uçlarına yakın olarak seçilmesi durumunda, yapı titreşimleri daha kolaylıkla ölçülebildiğinden dolayı frekans davranış fonksiyonları daha düzgün olarak elde edilmiştir.
- 12) Deneysel ve teorik modal analizler neticesinde, konsol giriş model için elde edilen doğal frekanslar ve mod şekillerinin birbirine oldukça yakın olduğu görülmüştür.
- 13) İvme ölçer sayısının az olmasından dolayı mod şekillerinin elde edilememesine rağmen, düzlem ve üç boyutlu çerçeve sistemlerin deneysel ve teorik modal analizlerinden elde edilen doğal frekansların birbirine çok yakın olduğu görülmüştür.
- 14) İki ve üç boyutlu sistemlerde, birden çok ve üç eksenli ivme ölçer kullanılarak dinamik karakteristiklerin belirlenmesi daha uygun olacaktır.
- 15) Yapı davranışı, düğüm noktaları ve mesnetlerde kullanılan kaynaklı birleşimlerden etkilendiğinden dolayı, modellerin oluşturulmasında yapılan kaynaklı birleşimlere özen gösterilmelidir.
- 16) Sarsıcılarla titreştirmenin mümkün olmadığı büyük yapılar için, çevresel yüklerin dikkate alındığı deneysel modal analiz yöntemleri kullanılarak yapıların dinamik karakteristikleri belirlenebilir.

Oluşturulan modeller üzerinde deneysel modal analiz yöntemiyle gerçekleştirilen ölçümlerden ve aynı modellerin teorik modal analizlerinden, yapılara ait dinamik karakteristiklerin birbirine oldukça yakın olarak elde edildiği görülmüştür. Mevcut ölçüm cihazı ve ilave ekipmanların elverdiği ölçüde gerçekleştirilen bu tez çalışması ile deneysel modal analiz yönteminin gerekli ölçüm alt yapısı oluşturularak yapıların mevcut durumlarındaki dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde güvenle kullanılacağı sonucuna varılmıştır.

## 5. KAYNAKLAR

- Ahn, S.J., Jeong, W.B. ve Yoo, W.S., 2004. Unbiased Expression of FRF with Exponential Window Function in Impact Testing, Journal of Sound and Vibration, 227, 934-941.
- Aksel, T., 1993. Structural Identification and Damage Detection of Two Steel Truss Bridges with Experimental Modal Analysis and Finite Element Analysis, Msc. Thesis, University of Cincinnati , USA.
- Al-Nefaie, K.A., 1991. New Method for Structural Damage Identification Using Experimental Modal Analysis, Ph. D. Dissertation, B. S. King Abdulaziz University, Saudi Arabia.
- Armstrong, D.M., Sibbald, A., Fairfield, C.A. and Forde, M.C., 1995. Modal Analysis for Masonry Arch Bridge Spandrell Wall Separation Identification, NDT&E International, 28, 6, 377-386.
- Ashory, M.R., 1999. High Quality Modal Testing Methods, Ph. D. Dissertation, University of London.
- Bayraktar, A. ve Türker, T., 2005-a. Deneysel Modal Analiz Yöntemi İle Düzlem Çerçevelerin Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi, Deprem Sempozyumu Kocaeli 2005, Kocaeli, Türkiye.
- Bayraktar, A. ve Türker, T., 2005-b. Finite Element Modeling and Experimental Modal Testing of Steel Structures, The 1st International Operational Modal Analysis Conference (IOMAC2005), Copenhagen, Denmark.
- Bonato, P., Ceravolo, R. ve Stefano, A.D., 1998. The Use of Wind Excitation in Structural Identification, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 74-76, 709-718.
- Braun, S.G. ve Ram, Y.M., 2001. Modal Modification of Vibrating Systems: Some Problems and Their Solutions, Mechanical Systems and Signal Processing, 15, 1, 101-119.
- Brincker, R., Ventura, C.E. ve Andersen, P., 2003. Why Output-Only Modal Testing is a Desirable Tool for a Wide Range of Practical Applications, Proceeding of the 21st International Modal Analysis Conference (IMAC XXI), Kissimmee, Florida.
- Broch, J.T., 1984. Mechanical Vibration and Shock Measurements, Brüel&Kjaer, Denmark.
- 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.

- Cauberghe, B., Guillaume, P., Verboven, P., Vanlanduit, S. ve Parloo, E., 2004. Frequency Response Function-Based Parameter Identification from Short Data Sequences, Mechanical Systems and Signal Processing, 18, 1097-1116.
- Ceballos, M.A., Car, E.J., Prato, T.A., Prato, C.A. ve Alvarez, L.M., 1998. Experimental and Numerical Determination of the Dynamic Properties of the Reactor Building of Atucha II NPP, Nuclear Engineering and Design, 182, 93-106.
- Çolakoğlu, A. ve Köksal, Ö., 2000. Savunma Sistemlerinde Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Doğal Frekans Analizi, Aselsan Dergileri, 55.
- Doebbling, S.W., Farrar, C.R. ve Cornwell, P.J., 1998. Development of a General Purpose Code to Couple Experimental Modal Analysis and Damage Identification Algorithms, Structural Engineering World Wide, Proc. of Structural Engineers World Congress, San Francisco, CA, T200-5.
- Dossing. O., 1988. Structural Testing Part II: Modal Analysis and Simulation, Brüel&Kjaer, Denmark.
- Dyke, S.J. ve Johnson, E.A., 2000. Monitoring of Benchmark Structure for Damage Identification, Proc. of the Engineering Mechanics Specialty Conference, Austin, Texas.
- Ewins, D.J., 1995. Modal Testing: Theory and Practice, John Wiley & Sons, New York.
- Ewins, D.J., 2001. Basics and State of Art of Modal Testing, Proc. Indian Academy Sciences, Sadhana, 25, 3, 207-220.
- Farrar, C.R. ve Doebbling, S.W., 1997. Lessons Learned from Applications of Vibration-Based Damage Identification Methods to Large Bridge Structures, Proc. of the International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford, CA, 351-370.
- Farrar, C.R. ve James III, G.H., 1997. System Identification from Ambient Vibration Measurements on a Bridge, Journal of Sound and Vibration, 205, 1, 1-18.
- Fladung, W. ve Rost, R., 1997. Application and Correction of the Exponential Window for Frequency Response Functions, Mechanical Systems and Signal Processing, 11, 1, 23-36.
- Gatzwiller, K. ve Herlufsen, H., 1994. Application Notes, Brüel&Kjaer, Denmark.
- Göge, D., Sinagius, M., Füllekrug, U. ve Link, M., 2005. Detection and Description of Non-Linear Phenomena in Experimental Modal Analysis via Linearity Plots, International Journal of Non-Linear Mechanics, 40, 27-48.
- Haapaniemi, H., Luukkanen, P., Nurkkala, P., Rostedt, J. ve Saarenheimo, A., 2003. Correlation Analysis from Modal Analysis of a Pipeline, Proceeding of the 21th International Modal Analysis Conference (IMAC), Orlando, Florida.

- Hartley, M.J., Pavic, A. ve Waldron, P., 1999. Investigation of Pedestrian Walking Loads on a Cable Stayed Footbridge Using Modal Testing and FE Model Updating, 17th International Modal Analysis Conference (IMAC XVII), Kissimmee, FL, USA, 1076-1082.
- Hermans, L. ve Auweraer, H.V.D., 1999. Modal Testing and Analysis of Structures under Operational Conditions: Industrial Applications, Mechanical Systems and Signal Processing, 13, 2, 193-216.
- Hwang, H.Y. ve Kim, C., 2004. Damage Detection in Structures Using A Few Frequency Response Measurements, Journal of Sound and Vibration, 270, 1-14.
- Kammer, D.C., 2004. Sensor Set Expansion for Modal Vibration Testing, Mechanical Systems and Signal Processing.
- Katafygiotis, L.S. ve Lam, H.F., 2000. Application of a Statistical Approach on a Benchmark Damage Detection Problem, EM2000 Fourteenth Engineering Mechanics Conference, Austin, Texas.
- Kharrazi, M.H.K., Ventura, C.E., Bricker, R. and Dascotte, E., 2002. A Study on Damage Detection Using Output-Only Modal Data, Proceedings of the 20th International Modal Analysis Conference (IMAC XX), Los Angeles, California, USA.
- Kitazaki, S. ve Griffin, M.J., 1998. Resonance Behaviour of the Seated Human Body and Effects of Posture, Journal of Biomechanics, 31, 2, 143-149.
- Lang, G.F., 1978. Understanding Vibration Measurements, Nicolet Scientific Corporation, New Jersey.
- Levent, M.E., Şanlıtürk, K.Y. ve Gül, M., 2003. Düz ve Yüzeyi Şekillendirilmiş Panellerin Sonlu Elemanlar ve Deneysel Modal Analiz Yöntemleri ile İncelenmesi, 11. Ulusal Makina Teorisi Sempozyumu, Gazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Ankara.
- Lord, J.F., Ventura, C.E., Dascotte, E., Brincker, R. ve Anderson, P., 2003. FEM Updating Using Ambient Vibration Data from a 48 Storey Building in Vancouver British Columbia Canada, The 32nd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, Jeju International Convention Center, Segowipo, Korea.
- Luş, H., Betti, R. ve Longman, R.W., 2000. Damage Identification in Linear Structural Systems, Proceedings of the 14th ASCE Engineering Mechanics Conference, Austin, Texas.
- Maeck, J. ve Roeck, G.D., 2000. Experimental and Numerical Modal Analysis of a Concrete High Speed Train Railway Bridge, Proceedings of International Symposium on Modern Concrete Composites and Infrastructure (MCCI2000), Beijing, China, 2, 61-68.



- Miglietta, L., 1995. Experimental Modal Analysis on the Supporting Structure of the Secondary Mirror of the Binocular Telescope, Large Binocular Telescope Project, Florence, Italy.
- Parloo, E., Gulliaume, P., Anthonis, J., Heylen, W. ve Seuevers, J., 2003. Modeling Sprayer Boom Dynamics by Means of Maximum Likelihood Identification Techniques, Part1: A Comparison of Input-Output and Output-Only Modal Testing, Biosystems Engineering, 85, 2, 163-171.
- Pavic, A., Pimentel, R.L. ve Waldron, P., 1998. Instrumented Sledge Hammer Impact Excitation: Worked Examples, 16th International Modal Analysis Conference (IMAC XVI), Sandra Barbara, CA, USA, 929-935.
- Pavic, A. ve Reynolds, P., 2002. Modal Testing of a 34 m Catenary Footbridge, 20th International Modal Analysis Conference (IMAC XX), Los Angeles, California, USA.
- Peeters, B. ve Roeck, G.D., 1999. Reference-Based Stochastic Subspace Identification for Output-Only Modal Analysis, Mechanical Systems and Signal Processing, 13, 6, 855-878.
- Petyt, M., 1990. Introduction to Finite Element Vibration Analysis, Cambridge University Pres, Cambridge.
- Reynolds, P., Pavic, A. ve Prichard, S., 2002. Dynamic Analysis and Testing of a High Performance Floor Structure, International Conference on Structural Dynamic Modeling-Test, Analysis, Correlation and Validation, Maderia Island, Portugal, 339-346.
- Reynolds, P., Pavic, A. ve Ibrahim, Z., 2004. A Remote Monitoring System for Stadia Dynamics, Proceedings of the ICE: Structural and Buildings, 157, SB6, 385-393.
- Sampaio, R.P.C., Maia, N.M.M. ve Silva, J.M.M., 1999. Damage Detection Using the Frequency-Response- Function Curvature Method, Journal of Sound and Vibration, 226, 5, 1029-1042.
- Şanlıtürk, K.Y. ve Çakar, O., 2004. Noise Elimination from Measured Frequency Response Functions, Mechanical Systems and Signal Processing, 19, 615-631.
- SAP2000, 1997. Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures, Computers and Structures, Inc., Berkeley, California, USA.
- Schwarz, B.J. ve Richardson, M.H., 1999. Experimental Modal Analysis, Vibrant Technology, Inc., Jamestown, California.
- Sinha, J.K., Rao, A.M. ve Moorthy, R.I.K., 2003. Significance of Analytical Modeling for Complete Interpretation of Experimental Modal Analysis: A Case Study, Nuclear Engineering and Design, 220, 91-97.

- Tawfiq, I., Vinh, T. ve Chouychai, T., 1997. A New Approach to Impact Testing Instrumentation Using An Electronic Slave Hammer, Mechanical Systems and Signal Processing, 11, 2, 269-285.
- Teleghani , B.K., ve Pappa, R.S., 1996. Finite-Element Vibration Analysis and Modal Testing of Graphite Epoxy Tubes and Correlation between the Data, National Aeronautics and Space Administration Langley Research Center, Hampton, Virginia.
- Verboven, P., Gulliaume, P., Cauberghe, B., Valanduit, S. ve Parloo, E., 2003. A Comparison of Frequency-Domain Transfer Function Modal Estimator Formulations for Structural Dynamics Modeling, Journal of Sound and Vibration.
- Wang, B.T., 1998. Structural Modal Testing with Various Actuators and Sensors, Mechanical Systems and Signal Processing, 12, 5, 627-639.
- Wu, J.J., 2004. Finite Element Modeling and Experimental Modal Testing of a Three Dimensional Framework, International Journal of Mechanical Sciences, 46, 1245-1266.
- Xia, Y. ve Hao, H., 2000. Measurement Selection for Vibration-Based Structural Damage Identification, Journal of Sound and Vibration, 236, 1, 89-104.
- 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.

## ÖZGEÇMİŞ

Temel TÜRKER, 1980 yılında Trabzon ilinin Akçaabat ilçesinde doğdu. İlköğrenimini Kavaklı 17 Şubat İlkokulu'nda, orta öğrenimini Akçaabat Mevlüt Selami Yardım Ortaokulu'nda ve lise öğrenimini Trabzon Fatih Lisesi'nde tamamladı. 1998 yılında girdiği üniversite sınavını kazanarak Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimine başladı. 2002 yılında İnşaat Mühendisliği Bölümü'ndeki lisans eğitimini tamamladı ve bölüm altıncısı olarak mezun oldu. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı.

Bekar olan Temel TÜRKER, İngilizce bilmektedir.

