

175866

**TİTREŞİM TESTLERİNDEN ELDE EDİLEN VERİLERİN
KALİTESİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ**

DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Orhan ÇAKAR
(503992053)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 21 Temmuz 2003
Tezin Savunulduğu Tarih : 30 Ekim 2003

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Kenan Yüce ŞANLITÜRK
Diğer Jüri Üyeleri Prof. Dr. H. Temel BELEK (İ.T.Ü.)
Prof. Dr. Tuncer TOPRAK (İ.T.Ü.)
Prof. Dr. H. Nevzat ÖZGÜVEN (O.D.T.Ü.)
Yrd. Doç. Dr. Hasan ALLİ (F.Ü.)

[Handwritten signatures of the thesis advisor and jury members]

Ekim 2003

ÖNSÖZ

Modal test, yapıların dinamik özelliklerinin incelenmesinde teorik bilgileri ve pratik tecrübeleri bir araya getiren oldukça önemli ve önemli olduğu kadar da zevkli bir çalışma alanıdır. Örnek olarak, hava taşıtları ve uzay mekiği gibi oldukça pahalı ve emniyetli hareketin de oldukça önemli olduğu sistemlerin daha prototip aşamasında iken çok pahalı ve riskli olan gerçek denemelerden önce, modal test verileri ile düzeltilen teorik modelleri yardımıyla bilgisayar ortamında bu yapıların davranışları incelenebilmektedir. Bu bakımdan modal test AR-GE için oldukça önemli ve kaçınılmaz bir test tekniğidir. Teorik çalışmaların gerçek sistemler üzerinde uygulanmasına ve sonuçlarının izlenmesine olanak tanınması da modal testi zevkli kılan özelliklerindedir. Bu özellikleri ile modal test, benim de ilgimi çekmiş ve bu konuda büyük bir zevkle araştırma yapmama vesile olmuştur.

Bu çalışmalarım esnasında geniş bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, her konuda desteğini gördüğüm tez danışmanım İ.T.Ü. Makina Fakültesi öğretim üyesi sayın Doç. Dr. Kenan Yüce ŞANLITÜRK 'e teşekkürü bir borç bilirim. Tez çalışmalarımı yakından takip eden, deneysel çalışmalarında ihtiyaç duyduğum sistemlerin temin edilmesinde yardımlarını esirgemeyen ve de modal test ile tanışmama vesile olan İ.T.Ü. Makina Fakültesi öğretim üyesi sayın Prof. Dr. H. Temel BELEK 'e, aynı ortamı paylaştığım mesai arkadaşlarım İ.T.Ü Makina Teorisi Sistem Dinamiği ve Kontrol anabilim dalı ailesine teşekkür ederim. Akademik çalışmalarına birlikte başladığım ancak beklenmedik bir anda aramızdan ayrılan Fırat Üniversitesi öğretim üyelerinden merhum Doç. Dr. Bülent TUTAK 'ı rahmetle anarım. Ayrıca, tez çalışmalarım süresince her zaman yanımda olan, sıkıntı ve mutlulukları birlikte yaşadığımız aileme de teşekkürlerimi sunarım.

Temmuz 2003

Orhan ÇAKAR

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
İÇİNDEKİLER	iii
KISALTMALAR	vi
TABLO LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ	xiii
ÖZET	xv
SUMMARY	xvii
1 GİRİŞ	1
1.1 Giriş	1
1.2 Titreşim Ölçümleri ve Frekans Tepki Fonksiyonu	2
1.3 Modal Test ve Uygulama Alanları	5
1.4 FTF Ölçümlerinde Karşılaşılan Hatalar	7
1.5 Frekans Tepki Fonksiyonlarındaki Sistemik Hatalar	8
1.5.1 Transdüserlerin Kütle Etkisi	9
1.5.2 Mesnetleme Etkileri	10
1.5.3 Yapı-Sarsıcı Etkileşimi	12
1.6 Parazitler	12
1.7 Literatür Araştırması	14
1.7.1 Frekans Tepki Fonksiyonlarının Niteliği ve Kalitesi	15
1.7.2 Transdüser Kütle Etkisi	17
1.7.3 Mesnetleme Etkileri	20
1.7.4 Yapı -Sarsıcı Etkileşimi	21
1.7.5 Ölçülmüş Verilerdeki Parazitler	23
1.8 Mevcut Durum ve Araştırma Konuları	28
1.9 Tezin Amacı	29
1.10 Tezin Kapsamı	29
2 FTF 'LARINDAKİ SİSTEMATİK HATALARIN KALDIRILMASI İÇİN MEVCUT YÖNTEMLER	31
2.1 Giriş	31
2.2 Sürüş Noktası FTF İçin Kütle Etkisini Kaldırma Yöntemi	31
2.3 Transfer FTF İçin Yöntemler	32
2.3.1 Standart SMURF yöntemi	33
2.3.2 Farklı Kütleli İki Transdüser İle Ölçüm Tekniği	34
2.3.3 İlave Kütle Kullanımına Dayalı Teknik	35
2.4 Açısal FTF 'larının Etkisi	37
2.5 Sonuç ve Değerlendirme	37
3 SİSTEMATİK HATALARIN DÜZELTİLMESİ İÇİN YENİ BİR YÖNTEM	38
3.1 Giriş	38
3.2 Sherman-Morrison (SM) Formülü : Teori	39
3.3 Yapısal Değişimde SM Formülünün Kullanılması	40
3.4 Genel Bir Değişim Formülünün Geliştirilmesi	43
3.4.1 Kütle Değişimi	45

3.4.2	Yay (Katılık) Değişimi	46
3.4.3	Sönüm Değişimi	47
3.5	Sonuç ve Değerlendirme	47
4	FTF 'LARINDAKİ TRANSDÜSER KÜTLE ETKİSİNİN KALDIRILMASI	48
4.1	Giriş	48
4.2	Teori	49
4.3	İvme Ölçer Sabit Tutularak FTF 'larının Ölçülmesi (Çekiç Testi)	51
4.3.1	Sayısal Simülasyon	52
4.3.2	Deneysel uygulamalar	56
4.3.2.1	Uygulama 1: Dikdörtgen Kesitli Bir Kiriş	56
4.3.2.2	Uygulama 2: Ankastre Plak	61
4.3.2.3	Uygulama 3: U-Çerçeve	64
4.4	İvme Ölçer Gezdirilerek FTF 'larının Ölçülmesi (Sarsıcı İle Yapılan Deneysel)	66
4.4.1	Sayısal Simülasyon	70
4.5	Sonuç ve Değerlendirme	75
5	FTF 'LARINDAKİ MESNET ETKİLERİNİN KALDIRILMASI	77
5.1	Giriş	77
5.2	Teori	78
5.2.1	Sayısal Simülasyon	80
5.3	Yapının İki Veya Daha Fazla Elastik Eleman İle Mesnetlenmesi Durumu	83
5.3.1	Sayısal Simülasyon	87
5.4	Sonuç ve Değerlendirme	90
6	ÖLÇÜLMÜŞ BİR GRUP FTF 'UNDAN PARAZİTLERİN AYIKLANMASI	92
6.1	Giriş	92
6.2	Teori : Tekil Değerlerine Ayırıştırma – TDA	93
6.3	Verilerdeki Parazitlerin TDA İle Ayıklanması Tekniği	95
6.4	Frekans Tepki Fonksiyonlarındaki Parazitlerin Ayıklanması	97
6.5	Genelleştirilmiş Tepki Fonksiyonu	99
6.6	Sayısal Simülasyon	100
6.6.1	Tekil Değerler İle Mod Sayısı Arasındaki İlişki	101
6.6.2	Frekans Bandının Tekil Değerlere Etkisi	102
6.6.3	Parazitlerin Tekil Değerlere Etkisi	103
6.6.4	Yöntemin Geçerliliği ve Performansının İncelenmesi	106
6.7	Deneysel Uygulama	109
6.8	Sonuç ve Değerlendirme	112
7	ÖLÇÜLMÜŞ HERHANGİ BİR FTF 'NDAKİ PARAZİTLERİN AYIKLANMASI İÇİN YENİ VE ETKİLİ BİR YÖNTEM	113
7.1	Giriş	113
7.2	Bir FTF 'undaki Parazitlerin Ayıklanması İçin Yeni Yöntem	114
7.3	Yöntemin Uygulanması	116
7.4	Hankel Matrisinin Satır ve Sütun Sayısının Etkisi	117
7.5	Sayısal Simülasyon	120
7.6	Deneysel uygulamalar	124
7.6.1	Uygulama 1: L-Plak	125
7.6.2	Uygulama 2: Bir Kenarı Ankastre Diğer Kenarları Serbest Bir Plak	127
7.6.3	Uygulama 3: Bir Fan Kapağı	129
7.7	Sonuç ve Değerlendirme	132
8	SONUÇLAR VE GENEL DEĞERLENDİRME	135
8.1	Giriş	135

8.2	Transdüserlerin Kütle Etkilerinin Kaldırılması	136
8.3	Askı Yaylarının Etkilerinin Kaldırılması	137
8.4	Parazitlerin Ayıklanması	138
8.5	Kaliteli FTF 'ları İçin Takip Edilebilecek Yol	141
8.6	Gelecekte Yapılabilecek Çalışmalar	142
KAYNAKLAR		144
EK A		152
EK B		156
EK C		157
EK D		158
EK E		159
EK F		161
EK G		162
ÖZGEÇMİŞ		169



KISALTMALAR

ADTF	: Ani Darbe Tepki Fonksiyonu (Impulse Response Function)
FD	: Fourier Dönüşümü (Fourier Transformation)
FTF	: Frekans Tepki Fonksiyonu (Frequency Response Function)
GTF	: Genelleştirilmiş Tepki Fonksiyonu (Principal Response Function)
SM	: Sherman-Morrison
SMW	: Sherman-Morrison-Woodburry
TDA	: Tekil Değerlerine Ayrıştırma (Singular Value Decomposition)



TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 4.1. İlave kütleli ve kütsüz olarak ölçülen doğal frekansların karşılaştırılması.....	58
Tablo 4.2. İlave kütsüz olarak ölçülen ve düzeltildikten sonra elde edilen doğal frekansların karşılaştırılması.....	60
Tablo C.1 ELNOS yazılımının özet açıklaması.....	157



ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1	Lineer bir yapının uygulanan kuvvete karşı gösterdiği tepki..... 3
Şekil 1.2	FTF ölçümlerinde kuvvet ve tepki konumları..... 4
Şekil 1.3	Deneysel Modal Analizin safhaları..... 5
Şekil 1.4	Tipik bir modal test deney düzeneği..... 8
Şekil 1.5	Tek giriş/çıkışlı lineer bir sistem modeli. 24
Şekil 2.1	Bir yapı üzerinde aynı noktaya yerleştirilen transdüserler..... 31
Şekil 2.2	Bir yapının kütle, yay ve sönüm elemanları ile yapısal değişimi.... 33
Şekil 2.3	Transdüseri temsil eden iki kütlelerin bir yapıya bağlanması..... 36
Şekil 3.1	İki sistemin birleşiminden oluşan yeni sistem..... 41
Şekil 3.2	Yapısal değişimde aktif koordinatlar..... 43
Şekil 3.3	Bir yapı üzerinde kütle değişimi..... 45
Şekil 3.4	Bir yapı üzerinde yay değişimi..... 46
Şekil 3.5	Bir yapı üzerinde sönüm değişimi..... 47
Şekil 4.1	Modal testte FTF ölçümü..... 49
Şekil 4.2	Dikdörtgen kesitli serbest-serbest kiriş..... 53
Şekil 4.3	İlave kütleli ('ölçülen') ve ilave kütsüz ('gerçek') transfer FTF 'larının karşılaştırılması (A_{61})..... 53
Şekil 4.4	Serbest-serbest kirişin y yönündeki eğilme titreşimlerinin mod biçimleri..... 54
Şekil 4.5	'ölçülen', gerçek ve düzeltilen transfer FTF 'larının karşılaştırılması..... 54
Şekil 4.6	'ölçülen', gerçek ve düzeltilen noktasal FTF 'larının karşılaştırılması (A_{66})..... 55
Şekil 4.7	Transfer FTF 'larının karşılaştırılması (%5 eklemeli parazit durumu)..... 55
Şekil 4.8	Noktasal FTF 'larının karşılaştırılması (%5 eklemeli parazit durumu)..... 56
Şekil 4.9	Deneysel uygulama için ilave kütleli ve ilave kütsüz ölçüm sistemleri..... 57
Şekil 4.10	İlave kütleli ve kütsüz olarak ölçülen noktasal FTF 'larının karşılaştırılması..... 58
Şekil 4.11	Ölçülen ve düzeltilen noktasal FTF 'larının karşılaştırılması (A_{22}). 59
Şekil 4.12	Ölçülen ve düzeltilen transfer FTF 'larının karşılaştırılması (A_{25}).. 59
Şekil 4.13	Ölçülen ve düzeltilen transfer FTF 'larının karşılaştırılması (5.mod) 60
Şekil 4.14	Bir kenarı ankastre, diğer kenarları serbest bir plak..... 61

Şekil 4.15	Farklı iki ağırlıktaki transdüser ile ölçülen noktasal FTF 'larının karşılaştırılması (A_{22}).....	62
Şekil 4.16	Farklı iki ağırlıktaki transdüser ile ölçülen ve düzeltilen noktasal FTF 'larının karşılaştırılması (A_{22}).....	63
Şekil 4.17	Farklı iki ağırlıktaki transdüser ile ölçülen ve düzeltilen transfer FTF 'larının karşılaştırılması (A_{21}).....	63
Şekil 4.18	Farklı iki ağırlıktaki transdüser ile ölçülen ve düzeltilen transfer FTF 'larının karşılaştırılması (A_{25}).....	63
Şekil 4.19	Test edilen yapı (U-çerçeve).....	64
Şekil 4.20	Farklı kütleli iki transdüser ile ölçülen noktasal FTF 'larının karşılaştırılması.....	64
Şekil 4.21	Farklı kütleli iki transdüser ile ölçülen ve düzeltilen noktasal FTF 'larının karşılaştırılması (550-950 Hz frekans aralığı).....	65
Şekil 4.22	Farklı kütleli iki transdüser ile ölçülen ve düzeltilen transfer FTF 'larının karşılaştırılması (550-950 Hz frekans aralığı).....	65
Şekil 4.23	Farklı iki ağırlıktaki transdüser ile ölçülen ve düzeltilen transfer FTF 'larının karşılaştırılması (550-900 Hz frekans aralığı).....	66
Şekil 4.24	Yardımcı kütle kullanılarak yapılan FTF ölçümü.....	67
Şekil 4.25	İki serbestlik dereceli bir mekanik sistem.....	71
Şekil 4.26	Ölçülen", düzeltilen ve gerçek transfer FTF A_{21}	71
Şekil 4.27	Ölçülmeden hesaplanabilen noktasal FTF A_{22}	72
Şekil 4.28	"Ölçülen", düzeltilen ve gerçek noktasal FTF A_{11} (%5 eklemeli parazit).....	73
Şekil 4.29	"Ölçülen", düzeltilen ve gerçek transfer FTF A_{21} (%5 eklemeli parazit).....	73
Şekil 4.30	Ölçülmeden hesaplanabilen noktasal FTF A_{22} (%5 eklemeli parazit).....	73
Şekil 4.31	"Ölçülen*", düzeltilen ve gerçek transfer FTF A_{21} (* : eğri uydurulmuş)	74
Şekil 4.32	Ölçülmeden hesaplanabilen noktasal FTF A_{22}	74
Şekil 5.1	FTF ölçümü için incelenen yapının bir yayla asılması.....	78
Şekil 5.2	Bir yayla mesnetli üç serbestlik dereceli mekanik bir sistem.....	80
Şekil 5.3	"Ölçülen", düzeltilen ve gerçek FTF A_{11}	81
Şekil 5.4	"Ölçülen", düzeltilen ve gerçek FTF A_{12}	82
Şekil 5.5	"Ölçülen", düzeltilen ve gerçek FTF A_{11} (%2 parazitli durum)....	82
Şekil 5.6	"Ölçülen", düzeltilen ve gerçek FTF A_{12} (%2 parazitli durum).....	83
Şekil 5.7	FTF ölçümü için incelenen yapının iki yayla asılması.....	83
Şekil 5.8	İki yayla mesnetli mekanik bir sistem.....	87
Şekil 5.9	"Ölçülen", düzeltilen ve gerçek FTF A_{12}	88
Şekil 5.10	"Ölçülen", düzeltilen ve gerçek transfer FTF A_{24}	88
Şekil 5.11	"Ölçülen", düzeltilen ve gerçek transfer FTF A_{12} (%1 parazitli)....	89
Şekil 5.12	Düzeltilen ve gerçek transfer FTF A_{14} (%1 parazitli).....	89
Şekil 5.13	Düzeltilen ve gerçek transfer FTF A_{24} (%1 parazitli).....	89
Şekil 6.1	TDA tekniği ile FTF 'larındaki parazitlerin ayıklanması için akış diyagramı.....	98

Şekil 6.2	Sayısal simülasyon için seçilen dikdörtgen kesitli serbest-serbest giriş.....	100
Şekil 6.3	Serbest-serbest girişin hesaplanan frekans tepki fonksiyonları (FTF).....	100
Şekil 6.4	81 FTF için hesaplanan tekil değerler grafiği.....	102
Şekil 6.5	Serbest-serbest girişin genelleştirilmiş tepki fonksiyonları (GTF).....	102
Şekil 6.6	Artık modların tekil değerlere etkisi.....	103
Şekil 6.7	Eklemeli parazitlerin tekil değerler üzerindeki etkisi.	104
Şekil 6.8	Çarpımsal parazitlerin tekil değerler üzerindeki etkisi.....	104
Şekil 6.9	%5 Eklemeli parazit durumunda genelleştirilmiş tepki fonksiyonları.....	105
Şekil 6.10	%5 Çarpımsal parazit durumunda genelleştirilmiş tepki fonksiyonları.....	105
Şekil 6.11	Gerçek ve %5 eklemeli parazitli FTF A_{22}	106
Şekil 6.12	Gerçek ve filtrelenmiş FTF A_{22} 'nin karşılaştırılması (%5 eklemeli parazit durumu).....	107
Şekil 6.13	Gerçek ve %2 çarpımsal parazitli FTF A_{13}	107
Şekil 6.14	Gerçek ve filtrelenmiş FTF A_{13} 'ün karşılaştırılması.....	108
Şekil 6.15	Rank değerinin a) $r=9$ ve b) $r=50$ seçilmesi durumunda elde edilen sonuçlar.....	108
Şekil 6.16	Deneysel uygulama için örnek bir sistem (Fan kapağı).....	109
Şekil 6.17	Fan kapağından ölçülen 96 tane FTF.....	109
Şekil 6.18	Fan kapağı için tekil değerler grafiği.....	110
Şekil 6.19	Fan kapağı için GTF 'ler.....	110
Şekil 6.20	Rank değeri a) $r=41$, b) $r=59$ ve c) $r=77$ seçilerek elde edilen FTF 'larının ölçülen FTF 'larıyla karşılaştırılması.....	111
Şekil 7.1	FTF ve ADTF kullanılması durumunda elde edilen tekil değerlerin karşılaştırılması.....	117
Şekil 7.2	Farklı Hankel kolon sayısı (N) için tekil değerlerin karşılaştırılması a)1-110 aralığındaki b)1-22 aralığındaki tekil değerler.....	118
Şekil 7.3	ADTF kullanımına dayalı parazit ayıklama yönteminin akış diyagramı (FD: Fourier Dönüşümü, FD^{-1} : Ters Fourier Dönüşümü).....	119
Şekil 7.4	%10 eklemeli parazit durumu için FTF A_{13} ve ADTF h_{13}	120
Şekil 7.5	%10 çarpımsal parazit durumu için FTF A_{13} ve ADTF h_{13}	121
Şekil 7.6	Çeşitli oranlardaki eklemeli parazitli A_{13} için tekil değerler grafiği.....	122
Şekil 7.7	Çeşitli oranlardaki çarpımsal parazitli A_{13} için tekil değerler grafiği.....	122
Şekil 7.8	Gerçek ve filtrelenmiş FTF 'larının karşılaştırılması, (%10 eklemeli parazit durumu).....	123
Şekil 7.9	Gerçek ve filtrelenmiş FTF 'larının karşılaştırılması, (%5 çarpımsal parazit durumu).....	123

Şekil 7.10	Parazitli ve filtrelenmiş FTF 'larının karşılaştırılması, (%5 çarpımsal parazit durumu).....	124
Şekil 7.11	Serbest sınır şartlarında FTF ölçümü yapılan bir L-Plaka.....	125
Şekil 7.12	L-Plaktan ölçülen bir FTF için tekil değerler grafiği.....	126
Şekil 7.13	L-Plak için ölçülen ve filtrelenmiş FTF 'larının karşılaştırılması...	126
Şekil 7.14	L-Plak için ölçülen ve filtrelenmiş FTF 'larının faz ve genliklerinin karşılaştırılması, (10-200 Hz frekans aralığı).....	127
Şekil 7.15	Bir kenarı ankastre diğer kenarları serbest bir plak.....	127
Şekil 7.16	Ankastre plak için tekil değerler grafiği.....	128
Şekil 7.17	Ankastre plak için ölçülen ve filtrelenmiş FTF 'larının faz ve genliklerinin karşılaştırılması.....	128
Şekil 7.18	Ankastre plak için ölçülen ve filtrelenmiş FTF 'larının karşılaştırılması, (400-800 Hz frekans aralığı).....	129
Şekil 7.19	Bir fan kapağı.	130
Şekil 7.20	Fan kapağı için farklı kolon sayılarındaki tekil değerler grafiği.....	130
Şekil 7.21	Kolon sayısı 200 ($r=49$) ve 800 ($r=87$) seçilerek elde edilen filtrelenmiş FTF 'larının karşılaştırılması.....	131
Şekil 7.22	Kolon sayısı 200 ve $r=53$ seçilerek elde edilen filtrelenmiş FTF 'nın ölçülmüş FTF ile karşılaştırılması.....	131
Şekil 7.23	Farklı rank değerleri (20, 53 ve 125) için elde edilen filtrelenmiş FTF 'larının karşılaştırılması.....	132
Şekil A.1	N tane ayrık noktadan oluşan bir zaman sinyali.....	154
Şekil C.1	Parazit ayıklama için MATLAB 'de geliştirilen yazılım (ELNOS V1.0b).....	157
Şekil D.1	%10 oranında hesaplanmış a) eklemeli ve b) çarpımsal tip parazitler.....	158
Şekil E.1	Gerçek, parazitli ve filtrelenmiş FTF, A_{23} 'ün karşılaştırılması (%10 eklemeli parazit durumu).....	159
Şekil E.2	Gerçek, parazitli ve filtrelenmiş FTF, A_{23} 'ün karşılaştırılması (%20 eklemeli parazit durumu).....	160
Şekil F.1	%1 çarpımsal parazitli ve filtrelenmiş FTF 'larının karşılaştırılması (A_{13}).....	161
Şekil F.2	%10 çarpımsal parazitli ve filtrelenmiş FTF 'larının karşılaştırılması (A_{11}).....	161
Şekil G.1	İki mekanik sistemin birleştirilmesi.	163
Şekil G.2	İki mekanik sistemin reseptanslarının birleştirilmesinin şematik gösterimi.....	164
Şekil G.3	İki mekanik sistemin birleştirilmesi.....	165
Şekil G.4	Birinci sistemin FTF 'larından A_{11} ve A_{13} (%0.5 parazitli).....	165
Şekil G.5	İkinci sistemin FTF 'larından A_{33} ve A_{43} (%0.5 parazitli).....	166
Şekil G.6	Birleştirilmiş sistemin 'gerçek' ve hesaplanan FTF 'larının karşılaştırılması (% 0.5 Parzitli).....	166
Şekil G.7	Birleştirilmiş sistemin 'gerçek' ve hesaplanan FTF 'larının karşılaştırılması (% 0.5 Parzitli).....	167

Şekil G.8	Birleştirilmiş sistemin 'gerçek' ve hesaplanan FTF 'larının karşılaştırılması (% 0.5 Parziteli).....	167
Şekil G.9	Parazitler ayıklandıktan sonra birleştirilmiş sistemin 'gerçek' ve hesaplanan FTF 'larının karşılaştırılması a) A_{11} , b) A_{12} , c) A_{13}	168



SEMBOL LİSTESİ

$r A_{pq}$: r modu için p ve q noktaları ile ilgili modal sabiti
A_{pq}	: İvme tipindeki frekans tepki fonksiyonu (Accelerance, Inertance)
b_i, θ_i ve ω_i	: Bir sinyalin i . harmoniğinin genlik, faz ve frekansı.
c	: Viskoz sönüm katsayısı
f	: Frekans (Hz)
F	: Zamandan bağımsız kuvvet
$f(t)$: Zamana bağlı kuvvet fonksiyonu
$G_{ff}(\omega)$: f giriş (kuvvet) sinyalinin öznel spektrumu (auto spectrum)
$G_{fx}(\omega), G_{xf}(\omega)$: Giriş ve çıkış arasındaki çapraz spektrum (cross spectrum)
$G_{xx}(\omega)$: x çıkış (cevap) sinyalinin öznel spektrumu
H_{pq}	: Tahrik konumu q ve cevap konumu p olan frekans tepki fonksiyonu (FTF)
h_{pq}	: Tahrik konumu q ve cevap konumu p olan ani darbe tepki fonksiyonu (ADTF)
i, j, k, l	: Tam sayılar
j	: $\sqrt{-1}$
k	: yay sabiti, katılık
L, M, N	: Tam sayılar
m	: Kütle
p_f, p_x	: Giriş ve çıkış sinyallerindeki parazitler
r	: Mod numarası, Matris rankı
r, s	: Değişim (modification) koordinatları
t	: Zaman (sn)
X	: Zamandan bağımsız cevap
$x(t)$: Zamana bağlı cevap fonksiyonu, bir sinyalin zaman geçmişi
x, y, z	: Kartezyen koordinatlar
\bar{x}	: Parazitsiz (gerçek) veri
Y_{pq}	: Hız tipindeki frekans tepki fonksiyonu (Mobility)
σ_i	: i . tekil değer

ϕ_{pr}	: r . mod vektörünün p . elemanı
η_r	: r . modun yapısal sönüm oranı
ω_r	: r . doğal frekans
$\alpha_{pq}^{(r)}, A_{pq}^{(r)}$: r koordinatında bir mekanik etki (kütle vb.) taşıyan (ölçülen) FTF
α_{pq}^*, A_{pq}^*	: Üzerinde mekanik etki kaldırılmış (gerçek) FTF

Vektör ve Matrisler:

$[\bar{A}]$: Parazitsiz (gerçek) veri matrisi
$[A]$: Veri matrisi
$[C]$: Sönüm matrisi,
$[G]$: Genelleştirilmiş tepki fonksiyonu matrisi
$[H]$: Frekans tepki fonksiyonu matrisi
$[K]$: Katılık matrisi,
$[M]$: Kütle matrisi,
$[P]$: Parazit matrisi
$[U]$: Sol ortogonal matris
$[U_0]$: küçük tekil değerlere karşılık gelen sol ortogonal matris
$[U_r]$: r kolonlu sol ortogonal matris
$[V]$: Sağ ortogonal matris
$[V_0]$: küçük tekil değerlere karşılık gelen sağ ortogonal matris
$[V_r]$: r kolonlu sağ ortogonal matris
$[Z^*]$: Değiştirilmiş dinamik direngenlik matrisi
$[Z]$: Dinamik direngenlik matrisi
$[\Delta Z]$: Değişim dinamik direngenlik matrisi
$[\Sigma]$: Tekil değerler matrisi (köşegen matris)
$[\Phi]$: Modal matris
$[\Sigma_0]$: küçük genlikli tekil değerler matrisi (köşegen matris)
$[\Sigma_r]$: r kolonlu tekil değerler matrisi (köşegen matris)

Simgeler:

$\{ \}$: Vektör
$[]$: Matris
$[]^T$: Matris transpozitesi
$[]^H$: Hermityen matris veya kompleks eşleniğin transpozitesi

TİTREŞİM TESTLERİNDEN ELDE EDİLEN VERİLERİN KALİTESİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ

ÖZET

Titreşim testlerinden elde edilen verilerin kalitesinin parazit (noise) ve sistematik hatalar gibi faktörler nedeniyle olumsuz olarak etkilendiği bilinmektedir. Aynı zamanda Frekans Tepki Fonksiyonlarını (FTF) kullanan çeşitli analizlerin doğruluğu ve güvenilirliği de ölçülmüş verilerin kalitesine bağlıdır. Daha güvenilir test verileri elde etmek ve bu verileri analizlerde başarılı bir şekilde kullanabilmek için istenmeyen bu etkilerin ölçülmüş verilerden ayıklanması gerekir.

Bu konu üzerine yapılan detaylı bir literatür araştırması sonunda ölçülmüş verilerdeki hata kaynaklarının etkilerinin incelenmesi ile ilgili olarak çok sayıda çalışma olduğu, ancak bu etkilerin kaldırılması ile ilgili çalışmaların sayısının oldukça sınırlı olduğu görülmüştür.

Bu tezin amacı Frekans Tepki Fonksiyonu formundaki ölçülmüş verilerin kalitesini iyileştirmek için etkili yöntemler geliştirmektir. Bu amaçla (i) transdüser kütleleri ve mesnet elemanlarının etkilerini kapsayan sistematik hataların ve (ii) parazitlerin ölçülmüş verilerden kaldırılmasına çalışılmıştır.

Bu tezde, sistematik hataların kaldırılması için yapısal değişim yaklaşımına dayanan yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Burada sunulan yöntem geneldir ve transdüser kütlesi ve mesnet etkilerinin kaldırılması için uygulanabilmektedir.

Ölçülmüş herhangi bir FTF üzerindeki kütle etkisinin transdüser koordinatındaki noktasal FTF 'nun (point FRF) de ölçülmesi halinde geliştirilen yöntem ile kaldırılabilirdiği görülmüştür. Yöntemin uygulanabilirliği ve pratikliği, pratikte çok kullanılan iki test tipinden sabit (çekiş testi) ve hareketli (sarsıcı testi) transdüser testleri durumları için incelenmiştir. Geliştirilen bu yöntemin sarsıcı testleri için bazı pratik sınırlamalarının olduğu görülmüştür. Bu tip bir testte her bir FTF 'nun ölçümü için transdüser farklı bir koordinata taşınmaktadır. Bu nedenle transdüser koordinatındaki noktasal FTF 'nu ölçmek çok zordur ve pratikteki bir çok uygulamada olanaksızdır. Bu durum yeni araştırmalara sevk etmiş ve sonuçta sarsıcı testleri için yeni bir test stratejisi önerilmiştir. Bu yaklaşım ile cevap koordinatlarındaki noktasal FTF 'larının ölçümü için sarsıcının taşınmasına gerek kalmadan kütle etkisini kaldırmak için gerekli noktasal FTF 'nun elde edilmesi sağlanmıştır. Yöntemlerin geçerliliği ve pratikte uygulanabilirliği kapsamlı sayısal simülasyonlar ve deneysel uygulamalarla incelenmiştir.

Bu tezde, ayrıca, ölçülmüş FTF 'larından parazitlerin ayıklanması için de bir kaç yöntem geliştirilmiştir. Parazitlerin ayıklanması için geliştirilen yöntemler Tekil Değerlerine Ayrıştırma (TDA) tekniğini kullanmakla birlikte (i) ayıklama işlemi süresince tek veya bir grup FTF 'nun kullanılması ve (ii) ayıklamanın frekans veya zaman bölgesinde yapılmasına göre farklılıklara sahiptirler. Yine bu yöntemlerin de

performansları, avantaj ve dezavantajları kapsamlı sayısal simülasyonlarla ve deneysel veriler kullanılarak incelenmiştir. Bu yöntemlerden birinin diğerlerine göre daha etkili ve daha iyi bir performansa sahip olduğu, pratik uygulamalar için de çok iyi bir potansiyele sahip olduğu görülmüştür.

Bu tezde geliştirilen yöntemlerden yararlanılarak ölçülmüş FTF 'larının kalitesinin iyileştirildiği sonucuna varılmıştır. Bu tezde ortaya çıkarılanlarla ölçülmüş titreşim verilerini kullanan bir çok uygulamanın başarı oranının ve güvenilirliğinin arttırılacağına inanılmaktadır.



IMPROVING THE QUALITY OF MEASURED VIBRATION DATA

SUMMARY

It is well-known that the quality of measured vibration data is adversely affected by many factors, most significant ones being noise and systematic errors. It is also known that the accuracy and the reliability of various analyses using the measured Frequency Response Functions (FRFs) depend strongly on the quality of measured data. In order to obtain more reliable test data and to make use of this data in various applications successfully, it is necessary to eliminate these undesirable and unwanted effects from the measured raw data.

A detailed literature survey on the subject revealed that there are significant amount of studies addressing the effects of various error sources contaminating the measured FRFs. However, studies dealing with removing these errors are very limited.

The main objective of this thesis is to develop effective methods for improving the quality of the measured data in the form of Frequency Response Functions. This is addressed in two areas, namely; (i) removing the systematic errors including the effects of the transducers' masses and the suspension supports and, (ii) eliminating the unavoidable noise from measured data.

In this thesis, a new method based on structural modification approach is developed for the elimination of systematic errors. The method presented here is general in the sense that it can be applied for removing the adverse effects of both transducer mass loading and those of suspension elements.

It is shown that the effect of transducer mass can be removed from any measured FRF using the method developed here provided that the point FRF corresponding to the transducer co-ordinate is also measured. The applicability and the practicality of the method are investigated for both fixed (hammer testing) and moving (shaker testing) transducer cases which are two common types of tests used in practice. It is found that the basic method developed here has practical limitations in shaker testing where each FRF is measured with the transducer being at a different location, hence making the point FRF measurement at the transducer co-ordinate very difficult, in fact, almost an impossible task for many applications in practice. This initiated further research and a new test strategy for shaker testing is proposed. It is shown that this approach can avoid the need for moving the shaker to all response locations for point FRF measurements, but allows acquiring the required data to remove the effects of the transducer mass loading from measured FRFs. The validity and the applicability of the proposed methods in practice are assessed by extensive numerical simulations as well as using real experimental data.

Several new methods are also developed in this thesis for the elimination of noise from measured FRFs. Although all the methods on noise elimination utilise the power of Singular Value Decomposition technique to separate the meaningful data

from noise, they differ from each other depending on (i) whether individual or a set of FRFs is processed during the noise elimination process, and (ii) whether the noise elimination is performed in time- or frequency-domains. Again, the performances of the individual methods, their advantages and drawbacks have been investigated using extensive numerical simulations as well as using real measured data. It is found that one of the methods has much better performance and efficiency than others and has a very good potential for practical use.

It is concluded that a high level of improvements of the quality of the measured FRFs can be achieved by utilising the methods developed in this thesis. It is believed that the achievements in this thesis will lead to higher reliability and success rate in many applications using measured vibration data.



1 GİRİŞ

1.1 Giriş

Mekanik titreşimler mühendislik yapılarının çoğunda önemli problemlere neden olabilmektedir. Herhangi bir yapı titreştiği zaman ortaya çıkabilecek problemlerden biri gürültüdür. Bunun yanında titreşimler, örneğin; bir taşıtta konforun azalmasına neden olur. Bir makinadaki titreşimler, bu makina üzerinde çalışan diğer bir parçanın görevini tam olarak yerine getirmesine engel olabilir ve performansı etkileyebilir. Uzun süreli titreşimler makina elemanının yorulmasına neden olabileceği gibi yüksek genlikteki titreşimler de hasar ve kırılmalara neden olabilmektedir. Günümüz teknolojisinin hızlı ve hafif yapılara yönelmesi, beraberinde daha esnek elemanların kullanılmasına ve buna bağlı olarak da titreşim problemlerinin artmasına neden olmaktadır.

Gerek yapısal bütünlüğün önemli olduğu ve dinamik karakteristiklerinin tam olarak bilinmesinin gerektiği türbin kanatları ve asma köprüler gibi yapıların, gerekse titreşimlerinden dolayı performansı olumsuz etkileyen, gürültü oluşturan ve konforu azaltan makina elemanlarının işletim şartlarındaki titreşim seviyelerinin bilinmesi önemlidir. Düşük gürültülü ve yüksek güvenli makinaların, konforlu taşıtların, dinamik yüklere karşı dayanıklı yapıların dizayn edilmesi, emniyetli işletim şartlarının ve optimum çalışma parametrelerinin bulunması gibi çeşitli amaçlar için sonlu elemanlar gibi oldukça etkili sayısal yöntemlerin yanında günümüzde son derece gelişmiş elektronik cihazlarla yapılan deneysel teknikler de kullanılmaktadır ve bunlara olan talep her geçen gün giderek artmaktadır.

Yapısal titreşimin deneysel çalışmaları, pratikte karşılaşılan titreşim olaylarının nedenlerini anlamada ve bunların kontrol edilmesinde önemli kolaylıklar sağlamaktadır. Bu amaçla, ya normal işletme şartlarında çalışan makina üzerindeki kuvvet ve cevaplar ölçülür ya da incelenen yapı veya eleman laboratuvar ortamında

bilinen bir kuvvet veya kuvvetler ile tahrik edilerek yapının cevapları ölçülür. İkinci tip ölçümde daha yakın ve esnek bir ölçüm söz konusu olduğundan yapı hakkında daha doğru ve detaylı bilgiler elde etmek mümkün olmaktadır.

1.2 Titreşim Ölçümleri ve Frekans Tepki Fonksiyonu

Bir yapı üzerinde ölçülen tepki fonksiyonları aşağıda sıralanan formlardan biri ile ifade edilebilmektedir:

- Frekans tepki fonksiyonu (Frequency Response Function),
- Ani darbe tepki fonksiyonu (Impulse Response Function),
- Geçirgenlik, (Transmissibility)
- Tepki spektrumu (Response spectrum) .

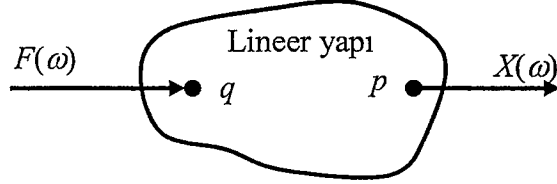
Bunlar bir yapının doğal frekans, mod biçimi ve sönüm oranı gibi karakteristiklerinin belirlenmesinde kullanılabilir. Buradaki tepki terimi genelde yer değiştirme, hız ve ivme büyüklüklerinden birisi olabilir.

Frekans Tepki Fonksiyonu (FTF), titreşim testlerinden elde edilen ve çok geniş bir uygulama alanı olan önemli bir fonksiyondur. Bu fonksiyon, uygulanan bir kuvvete karşı lineer bir yapının gösterdiği tepkiyi ifade eder. Bir başka deyişle uygulanan kuvvet ile yapının gösterdiği tepki arasındaki lineer ilişkiyi verir. Bu fonksiyon ilerde daha detaylı olarak incelenecektir.

Ani Darbe Tepki Fonksiyonu (ADTF), yapıya birim genlikli ani bir darbe uygulandıktan sonra yapının zaman geçmişi olarak tanımlanır. Burada ani darbeden kastedilen, ilgilenilen aralıkta yapının herhangi bir titreşim periyodundan daha kısa bir zaman süresince uygulanan kuvvettir. ADTF 'nun Fourier dönüşümü FTF 'nu vermektedir. (Fourier dönüşümleri için bakınız: EK A). ADTF 'nu yorumlamak nispeten zor olduğundan çoğu zaman FTF 'nun kullanımı tercih edilmektedir.

Geçirgenlik , FTF 'na benzer ancak farklı olarak iki noktanın tepkilerinin birbirine oranından hesaplanır.

Tepki spektrumu, hareketli bir yapıdan elde edilir ve yapının dinamik özellikleri hakkında önemli bilgileri verebilir. Öznel spektrum yoğunluk fonksiyonu (Autospectral density function), geçici davranışların Fourier dönüşümü ve periyodik bir tepkinin Fourier serisi tepki spektrumlarına birer örnektir.



Şekil 1.1 Lineer bir yapının uygulanan kuvvete karşı gösterdiği tepki.

Genel olarak tepki fonksiyonlarını kısaca tanımladıktan sonra bu çalışmada kullanılacak ve incelenecek olan FTF hakkında biraz daha geniş bilgi vermek faydalı olacaktır. Bir yapının giriş ve çıkışı arasındaki lineer ilişkiyi veren FTF, kompleks bir büyüklüktür ve genlik ile faz bilgilerini içerir. Şekil 1.1 'de görülen lineer bir yapı üzerindeki q konumundan genliği F ve frekansı ω olan sinüsoidal bir kuvvet uygulandığı zaman yapı bu kuvvete bir tepki gösterecek ve kararlı duruma geçtikten sonra aynı frekansla titreşecektir. Yapı üzerindeki herhangi bir p noktasının bu frekanstaki yer değiştirmesi de (hız veya ivme de olabilir) X olsun. Bu frekans için FTF 'nun genliği,

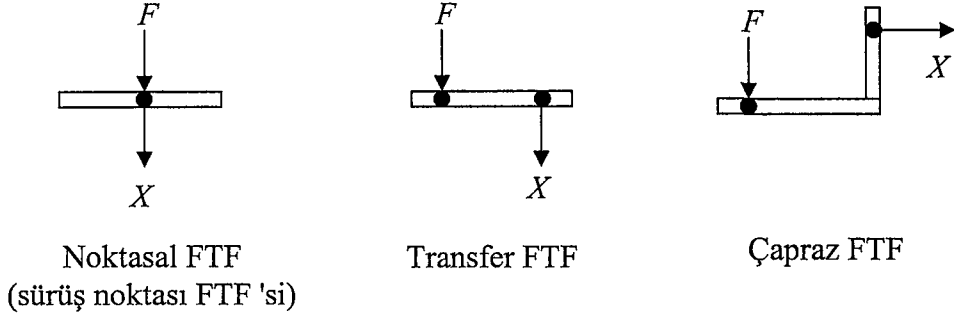
$$|H_{pq}(\omega)| = \frac{|X_p|}{|F_q|} \quad (1.1)$$

ile ifade edilir. FTF 'nun fazı ise yer değiştirme ve kuvvet arasındaki açı ile verilir.

FTF, frekansın bir fonksiyonudur. Uygulanan kuvvetin frekansı değiştiğinde FTF 'nun genliği ve fazı da değişir. Bir FTF, yapıya farklı frekanslarda sinüsoidal kuvvetler uygulanıp her frekansta kuvvet ve tepkilerin genlik ve fazları ölçülerek elde edilebilir. Ancak bu uzun ve zahmetli bir iş olduğundan pratikte daha hızlı ve kolay yöntemler kullanılmaktadır.

İncelenen yapının dinamik özelliklerini (doğal frekans, mod biçimi ve sönüm) içeren FTF 'ları rezonans frekanslarında sivri tepelere sahiptir. Bazı durumlarda iki

rezonans tepesi arasında ters-rezonans (anti-resonance) denilen sivri çukurlar da görülebilmektedir.



Şekil 1.2 FTF ölçümlerinde kuvvet ve tepki konumları

FTF 'larında kuvvet ve tepki konumları da önemlidir (Şekil 1.2). Bir FTF yapı üzerinde aynı konum ve doğrultuda ölçülen kuvvet ve tepkiden hesaplanmış ise "noktasal FTF" (point FRF) olarak adlandırılır. Kuvvet ve tepki konumları birbirinden farklı yerlerde seçildiğinde ise "transfer FTF" olarak adlandırılmaktadır. Alternatif olarak ölçümler farklı yönlerde de yapılabilir. Böyle hesaplanan FTF 'larına da bazen "çapraz" (cross) FTF denilmektedir.

FTF hesaplamalarında tepki olarak yer değiştirme, hız veya ivme büyüklükleri kullanılabilir. Bu durumda FTF 'larına verilen isimler aşağıda verilmiştir.

$$\alpha = \frac{\text{Deplasman}}{\text{Kuvvet}} \quad \text{:Dinamik esneklik veya Reseptans, (Receptance)}$$

$$Y = \frac{\text{Hız}}{\text{Kuvvet}} \quad \text{:Hız tipinde FTF, (Mobility)}$$

$$A = \frac{\text{İvme}}{\text{Kuvvet}} \quad \text{:İvme tipinde FTF (Accelerance, Inertance)}$$

Hız ve ivme tipindeki FTF 'larının dinamik esneklik ile ilişkileri de aşağıdaki ifadelerle verilir:

$$Y = j\omega\alpha \quad (1.2a)$$

$$A = -\omega^2\alpha \quad (1.2b)$$

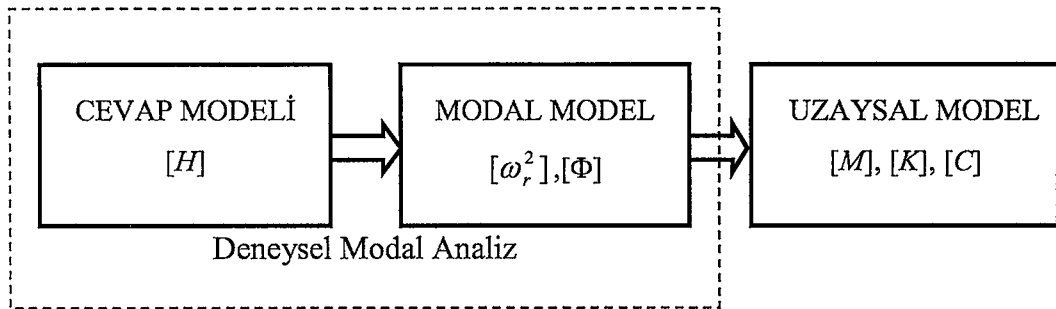
FTF analitik veya sayısal yöntemlerle belirlenen dinamik özellikler kullanılarak da aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\alpha_{pq}(\omega) = \sum_{r=1}^N \frac{\phi_{pr}\phi_{qr}}{(k_r - \omega^2 m_r) + j\eta_r k_r} \quad (1.3)$$

Burada; ϕ_{pr} ve ϕ_{qr} , r . mod biçim vektörünün p ve q konumlarındaki elemanları, k_r , m_r ve η_r , r . modun sırasıyla; modal yay sabiti, modal kütlesi ve modal sönüm oranıdır. ω ise (rad/s) olarak frekansı göstermektedir. Bu şekilde istenilen frekans aralığındaki FTF, her bir ω frekans değeri için tüm modların etkileri toplanarak hesaplanabilir.

1.3 Modal Test ve Uygulama Alanları

FTF 'ları bir yapının deneysel yöntemlerle dinamik özelliklerinin belirlenmesinde ana ögedir. Şekil 1.3 'de deneysel titreşim analizlerinde takip edilen yol şematik olarak gösterilmiştir. Birinci aşamada, ölçülen kuvvet ve cevaplardan Fourier dönüşümü yapabilen analizörler yardımıyla sistemin FTF 'ları $[H]$ elde edilir ve bunlar *Cevap Modeli* olarak adlandırılır. İkinci aşamada bir takım eğri uydurma yöntemleri ile incelenen sistemin doğal frekansları $[\omega_r^2]$ ve mod biçimleri $[\Phi]$ bulunur ve bunlar *Modal Modeli* teşkil eder. Bu iki aşama birlikte deneysel modal analiz olarak adlandırılmaktadır. Son olarak da yapının kütle $[M]$, katılık $[K]$ ve sönümleri $[C]$ elde edilerek *Uzaysal Model* oluşturulabilir. Dikkat edilirse böyle bir analizdeki aşamalar teorik analizlerdeki aşamaların tam tersidir.



Şekil 1.3 Titreşim analizinde deneysel yol.

Asıl amacı deneysel veriler kullanılarak incelenen yapının matematiksel bir modelinin kurulması olan modal test işlemi ise; ölçümlerin alınması, ölçülen verilerin analiz edilmesi ve matematiksel modelin oluşturulması olmak üzere başlıca üç ana safhadan oluşmaktadır. Bu yaklaşım ile elde edilen FTF verileri ve sonuçlar yapısal dinamiğin çok çeşitli alanlarında kullanılmaktadır.

Modal testin en yaygın kullanım alanlarından biri sonlu elemanlar veya diğer teorik modeller kullanılarak elde edilen sonuçlar ile testlerden elde edilen sonuçların *karşılaştırılması*dır. Bazen de yapının teorik modelden elde edilen modal özelliklerinin ölçümle bulunan sonuçlara yaklaştırılması amacıyla teorik modelin düzeltilmesi yoluna gidilebilir. Bu işlem *analitik modelin düzeltilmesi* veya *gerçeklenmesi* (updating) olarak adlandırılmaktadır.

Modal testin bir başka uygulama alanı yapısal dinamik *değiştirmedir*. Bu işlemde yapıya kütle ve yaylar eklenerek veya çıkarılarak yapılan değişikliklerin yapının dinamik özelliklerini nasıl etkilediği incelenir. Diğer bir uygulama alanı ise yapısal değişim (structural modification) kapsamında olan ve karmaşık yapıların teorik analizinde de sıkça kullanılan *yapısal ayırma-birleştirmedir* (substructuring-assembly, coupling-uncoupling). Bu işlemde incelenen yapı alt elemanlara bölünür ve her bir eleman için matematiksel model oluşturulur. Daha sonra bunlar belli usullere göre birleştirilerek ana yapının dinamik özellikleri belirlenmeye çalışılır. Bu işlemlerin her ikisinde de doğal frekansların, modal sönüm oranlarının ve mod biçimlerinin hassas olarak hesaplanabilmesi için ölçülen FTF 'larının oldukça kaliteli olması gerekir. Bunların dışında modal test, makinalarda titreşime sebep olan *kuvvetlerin belirlenmesi* ve *arıza tespiti* gibi amaçlar için de kullanılmaktadır. Modal test ile ilgili basılı başlıca kitaplar Ewins [1], McConnel [2] ve Maia ve Silva [3] 'nın kitaplarıdır. Ayrıca dinamik testler için hazırlanan DTA (Dynamic Testing Agency Handbook) el kitabı [4] başarılı bir test için stratejileri vermektedir.

Ölçülmüş FTF 'larının kullanıldığı bu alanların pek çoğunda oldukça kaliteli verilere ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak modal testin yapısından kaynaklanan bir takım hata kaynakları mevcuttur ve bunlar FTF verilerinin ve dolayısıyla analiz sonuçlarının kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir.

1.4 FTF Ölçümlerinde Karşılaşılan Hatalar

Şüphesiz bir analizden elde edilecek sonuçların doğruluğu bu analizlerde kullanılan verilerin kalitesi ile doğrudan ilişkilidir. Pek çok uygulamada, örnek olarak yapısal değişim ve analitik modellerin doğrulanması gibi alanlarda, kullanılan deneysel verilerin oldukça kaliteli olması gerekmektedir. Ancak modal testin yapısından kaynaklanan ve verilerin kalitesini olumsuz yönde etkileyen hatalar mevcuttur. Bu hatalar; ölçüm hataları, veri işleme hataları ve analiz hataları olmak üzere başlıca üç grup altında incelenebilir [8]:

A. Ölçüm hataları

- Transdüserlerin kütle etkileri
- Mesnetleme etkileri
- Yapı-sarsıcı etkileşimi
- Parazitler (noise)
- Transdüserlerin karakteristikleri (frekans aralığı, çapraz duyarlılığı (transverse sensitivity) ve yapıya tutturulma biçimi)
- Yapının doğrusal olmayan (non-linear) davranışları
- Yapıdaki kararsızlıklar

B. Veri işleme hataları

- İkiz yanılması (aliasing)
- Sızdırma (leakage)
- Ağırlık (window) fonksiyonunun etkisi
- Ortalama alma işleminin etkisi

C. Modal analiz hataları

- Daire uydurma
- Doğru uydurma
- Global modal analiz

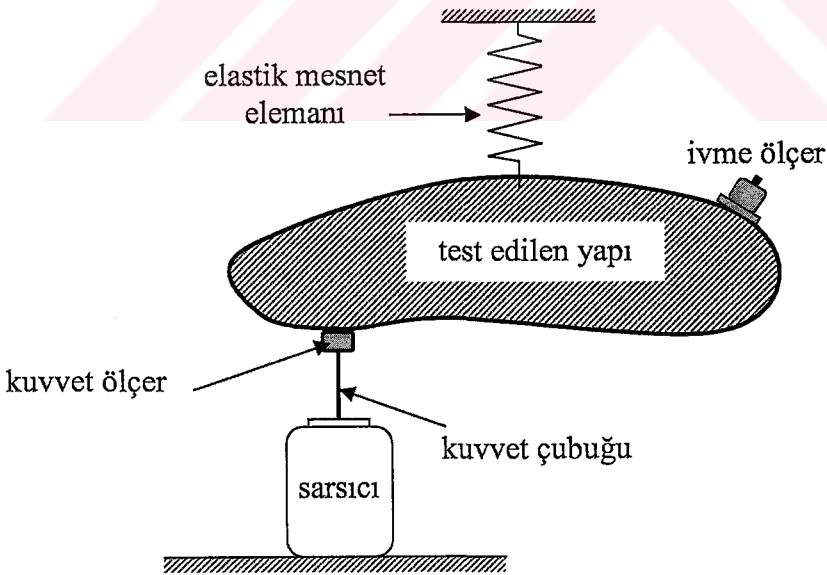
Bu hataların yanında modal testte sınırlayıcı bazı faktörler de vardır ki, bunlar:

- Yapı üzerinde bütün noktalarda ölçüm alınamaması,
- Yapıya pratik olarak moment uygulanamaması ve açışal hareketlerin ölçülmesindeki zorluklar ve

- Frekans ölçüm aralığının sınırlı olmasıdır.

Burada ölçüm hataları kapsamındaki parazitler sadece FTF 'larını değil elektronik veri toplama sistemleri (Data Acquisition Systems) kullanılarak ölçülen tüm verileri etkileyen önemli bir faktördür. Yine mekanik hatalar olarak da adlandırılan transdüserlerin kütle etkileri, mesnetleme etkileri ve yapı-sarsıcı etkileşiminden kaynaklanan hatalar rastlantısal (random) olmayıp tamamen ölçüm sisteminden kaynaklanan sistematik hatalardır ve bunlar yapının dinamik özelliklerini etkileyerek yapı hakkında hatalı bilgiler edinilmesine neden olmaktadır. Bu nedenle bu olumsuz etkilerin ölçülen verilerden çıkarılması gerekir. Bu çalışma, pek çok durumda ön plana çıkan ölçüm hataları sınıfındaki parazitler ile transdüser kütle etkisi ve mesnet etkilerini kapsamaktadır. Bu etkiler daha detaylı olarak aşağıdaki bölümlerde incelenmektedir.

1.5 Frekans Tepki Fonksiyonlarındaki Sistematik Hatalar



Şekil 1.4 Tipik bir modal test deney düzeneği.

Bir yapının dinamik davranışlarını incelemek üzere kurulan tipik bir modal test düzeneği Şekil 1.4 'de görülmektedir. Bu sistemde serbest sınır şartlarını sağlamak amacıyla yapı hafif elastik kordonlarla asılmıştır. Kuvvet, buradaki gibi bir sarsıcı kullanılarak uygulanabilmekle beraber darbe çekici gibi başka sistemlerle de

uygulanabilmektedir. Sarsıcıda üretilen kuvvetin yapıya aktarılması için kuvvet iletim yönünde sert diğer yönlerde ise çok esnek olan bir kuvvet çubuğu (stinger veya push rod) kullanılmaktadır. Uygulanan bu kuvvetin ve çeşitli noktalarda yapının tepkilerinin ölçülmesi amacıyla da kuvvet ve ivme transdüserleri yapıya bağlanmaktadır. Yapıya ilave olarak bağlanan bu elemanlar orijinal yapının dinamik özelliklerini etkilemektedir. Ölçüm esnasında bu elemanlar yapı ile sürekli temas halinde oldukları için ölçülen FTF 'ları ölçüm elemanları ve yapıdan oluşan tüm sistemin özelliklerini içerirler. Bu bakımdan sadece yapıya ait dinamik özelliklerin belirlenebilmesi için bu ilave elemanlardan kaynaklanan etkilerin ölçülen FTF 'larından çıkarılması gerekir.

1.5.1 Transdüserlerin Kütle Etkisi

Pratik olarak deney esnasında yapıya bağlanan transdüserler, yapıya eklenen bir kütle olmakla beraber genellikle ihmal edilmektedirler. Ancak hafif ve narin yapılar test edildiğinde yapıya bağlanan bu ilave kütlelerin etkisi önemli olmaktadır. Teorik olarak düşünüldüğünde, doğal frekansın karesi, yay katsayısı ve kütlelerin oranıdır. Buna göre ölçüm yapmak için yapıya bağlanan ivme ölçerin kütlesi yapının doğal frekansını düşürecek ve daha ağır bir transdüser, doğal frekansları gerçek değerinden daha da uzaklaştıracaktır. Bu durum üzerinde tabii ki incelenen yapının kütlesi de önemlidir. Örneğin köprü gibi büyük bir yapıya bağlanan bir ivme ölçerin etkisi ihmal edilebilir olmakla beraber küçük ve hafif olan bir yapıda ivme ölçerin kütlesi önemli olmaktadır. Şunu da belirtmek gerekir ki, burada 'yapının kütlesi' terimi sadece yapının tüm kütlesi olarak algılanmamalı, yapının etkin kısmının modal kütlesi olarak da algılanmalıdır. Diğer taraftan transdüserlerin yapıya bağlandığı konumlar da önemlidir. Eğer transdüser bir modun düğüm noktasına koyulmuş ise bu mod üzerinde transdüser kütlelerinin hiç bir etkisi olmayacaktır. Ancak, bir modun en büyük genlikli noktasına koyulmuşsa o zaman bu mod üzerinde en fazla etkiyi oluşturacaktır. Bir başka deyişle transdüser kütlesi her bir mod için farklı etkiler yaratmaktadır.

Transdüserlerin kütle etkisi özellikle doğru frekans ölçümlerinin istendiği durumlarda önem arz etmektedir. Bir sistem üzerine bağlanan bir transdüser o sistemin dinamik özelliklerini bozmakta ve doğal frekansların kaymasına neden olmaktadır. Bu durum deneysel verilerin doğruluğunu azaltır ve özellikle yapısal

değişim tekniklerinde tahmin edilemeyecek hatalara neden olur. Diğer taraftan incelenen yapı üzerinden bir grup ölçüm alınacağı zaman, transdüser her ölçüm için farklı bir yere taşınacağından dolayı her ölçümde kütle etkisi farklı olacaktır. Bu durumda ölçülen FTF 'ları arasında uyumsuzluklar olacağından modal analiz için global eğri uydurma algoritmaları kullanıldığında doğal frekanslarda da uyumsuzluklar meydana gelecektir.

Günümüzde 'lazer' esasıyla çalışan temassız ölçüm sistemleri yardımıyla kütle tesiri olmaksızın frekanslar daha doğru olarak ölçülebilmektedir. Ancak bu gibi cihazlar çok pahalı olup çok az laboratuarda bulunmaktadır. Deneysel ölçümlerde kullanılan transdüserlerin kütlelerinin incelenen yapı üzerindeki etkisi ihmal edilemeyecek boyutlarda ise bu etkinin FTF 'ları üzerinden kaldırılması gerekir. Bu etkinin boyutu, incelenen yapı üzerinden bir FTF ölçüldükten sonra transdüserin koyulduğu noktaya transdüser ile aynı kütleli ilave bir kütle koyularak FTF ölçümü tekrarlandıktan sonra ölçülen bu FTF 'ları karşılaştırılarak belirlenebilir. Ancak bu etkinin kaldırılması bu tezde de görülebileceği gibi daha karmaşık işlemler gerektirmektedir.

1.5.2 Mesnetleme Etkileri

Modal test ölçümlerinde, test edilen sistemin mesnetlenmesi test düzeneğinin önemli bir parçasıdır. Ölçülen verilerin yapının dinamik özelliklerini doğru olarak yansıtması için sınır koşullarının tam olarak sağlanması ve bu sınır koşullarının deneysel olarak tekrarlanabilmesi gerekir. Laboratuvar ortamında incelenen yapılar çoğunlukla zemin üzerinde (grounded) veya serbest sınır koşullarında test edilirler. Zemin üzerinde test edilen yapılar, civata gibi elemanlarla zemine rijit olarak sabitlenerek mesnet konumunda tüm yönlerdeki hareketleri kısıtlanmaya çalışılır. Ancak bu bağlama elemanları tam rijit olmayıp az da olsa bir esnekliğe sahiptir. Bu durumda mesnet konumlarında tam rijitlik sağlanamaz ve bazı hareketlere de engel olunamaz. Ayrıca civataların sıkılma miktarları da önemli olduğundan testin tekrar edilmesi durumunda aynı sıkımayı sağlamak çoğunlukla mümkün olmaz ve tekrarlanabilirlik zayıflar.

Bir yapıda serbest sınır koşullarını sağlamak nispeten kolaydır. Bir yapının serbest olması demek bu yapının hiçbir yere temas etmediği manasına gelir (uçak ve uzay araçları gibi). Ancak bu koşulu laboratuvar ortamında tam anlamıyla sağlamak

mümkün değildir. Bu sınır koşullarını mümkün olduğunca sağlamak için incelenen yapılar hafif yaylarla veya elastik kordonlarla asılarak, uçak gibi büyük yapılar ise hava yastıkları üzerinde veya teker lastiklerinin havaları indirilerek test edilirler. Ancak bu elastik elemanların yapının doğal frekanslarını ve mod biçimlerini etkilediği bilinmektedir.

Serbest haldeki bir sistem, 3 öteleme ve 3 dönme olmak üzere toplam 6 tane rijit cisim moduna sahiptir ve bunların frekansı sıfırdır. Serbest sınır şartlarını sağlamak üzere elastik olarak mesnetlenen bir yapının rijit cisim frekansları sıfırdan farklı olur ve bazen bir eğilme modu gibi algılanabilir. Gerçek değerinden sapan bu rijit cisim frekansları mesnet yayı ve yapının kütesinden oluşan sistemin doğal frekanslarıdır. Bu nedenle bu frekansları ilgilenilen frekans aralığından mümkün olduğunca uzak tutacak şekilde uygun elastik elemanların seçilmesi gerekir. Elastik olarak mesnetlenen bir yapının rijit cisim frekanslarının, yapının en küçük doğal frekansının %10-20 'sinden büyük olması durumunda bu mesnet elemanlarının yapının birinci ve hatta ikinci doğal frekansları üzerindeki etkisi önemli olabilmektedir. Bu durumda ölçülen frekanslar yapının kendi özellikleri yanında kullanılan elastik elemanın yay katsayısına da bağlı olur [1-4].

Mesnet etkilerini mümkün olduğunca azaltabilmek için çeşitli alternatif yapısal testler önerilmiştir. Çok esnek uzay yapılarında kullanılan aktif ve aktif/pasif süspansiyon sistemleri, küçük taşıma ve askeri uçaklarda kullanılan ağır gazlı süspansiyon sistemleri örnek olarak verilebilir. Çok büyük ve esnek yapılar için kullanılan alternatif bir yöntem ise yapının bir veya daha fazla yerden farklı konfigürasyonlardaki sınır şartlarıyla test edilmesidir. Standart bir modal testte çok alçak veya çok yüksek frekanslardaki modlar incelenebilen frekans bandı dışında kalabilmektedir. Bu durumlarda yapıya kütle veya yaylar eklenerek sistemin dinamiği değiştirilmekte ve frekans bandı dışında kalan bu modlar da incelenebilmektedir. Bu tip bir test “küçük değişimli sınır koşulları” (Perturbed Boundary Conditions-PBC) testi veya “çoklu sınır koşulları” (Multiple Boundary Conditions-MBC) testi olarak bilinmektedir.

Standart bir modal testte incelenen yapının asılmasında kullanılan askı elemanlarının etkilerini azaltmak için askı yayları mümkün olduğu kadar hafif ve esnek seçilirler. Ayrıca yapılar, mümkün olduğu kadar titreşim esnasında hareketsiz kalan, yani

düğüm noktalarına yakın, yerlerden asılmaya çalışılır. Ancak yine de çoğu zaman bu etkilerden kaçınmak mümkün olmamaktadır ve yapısal değişim gibi uygulamalarda sonuçları olumsuz olarak etkilemektedir. Bu gibi durumlarda genelde ihmal edilen bu etkinin ölçülen FTF 'larından kaldırılması gerekir.

1.5.3 Yapı-Sarsıcı Etkileşimi

Sarsıcılar, modal testte bir yapıya kuvvet uygulamak amacıyla en çok kullanılan tahrik sistemlerinden biridir. Bu sarsıcılar test süresince sürekli olarak yapı ile temas halinde oldukları için yapının dinamik davranışlarını etkilemektedirler. Prensipte olarak uygulanan kuvvetin yapıya tek bir doğrultuda iletilmesi arzulanır. Ancak yapının titreşimi sırasındaki eğilme hareketi dolayısıyla istenmeyen yönlerdeki kuvvet veya momentlerin yapıya aktarılması kaçınılmazdır. Bu durumdan dolayı meydana gelecek etkiyi azaltmak için yapı ve sarsıcının birbirine bağlanmasında kuvvet iletim yönünde oldukça rijit, diğer yönlerde ise oldukça esnek olan çubuklar kullanılmaktadır. Ancak bu kuvvet çubuğunun eğilme esnekliği istenmeyen kesme kuvvetleri ve eğilme momentleri oluşturmaktadır ve bunlar kuvvet transdüserini ve yapıyı etkilemektedir. Kuvvet transdüseri yapıya uygulanan gerçek kuvvetin yanında istenmeyen bu kuvvetleri de sezecek ve doğal frekansların, mod biçimlerinin ve neticede FTF 'larının hatalı ölçülmesine neden olacaktır. Ne yazık ki üç yönde kuvvet ölçen transdüserler her zaman bulunmadığı gibi momentlerin ölçülmesi de oldukça zordur. Bu nedenle bu etkiler çoğunlukla ihmal edilmektedir. Ancak yapılan araştırmalar özellikle yapısal birleştirme gibi uygulama alanlarında bu etkilerin dikkate alınması gerektiğini ortaya koymuştur.

1.6 Parazitler

Frekans tepki fonksiyonlarının kalitesini olumsuz olarak etkileyen en önemli faktörlerden biri de gerek çevreden gerekse deney sistemindeki elektronik cihazlardan kaynaklanan ve deneysel verilerin tümünde her zaman var olan parazitlerdir. Modal analiz ve uygulamalarında kullanılan yöntemlerin başarısı verilerdeki parazitlerden olumsuz olarak önemli ölçüde etkilenmektedir. En basit bir titreşim ölçüm sistemi, bir veri toplama cihazı ile yapıya bağlanan bir transdüser (ivme ölçer gibi) ve bunların birbirlerine bağlanmasında kullanılan kablolardan

oluşmaktadır. İstenmeyen ve verilerin kalitesini olumsuz olarak etkileyen parazitler, transdüserden başlayarak veri toplama cihazına kadar her safhada ölçülen verilere katılmaktadırlar. Bir ölçümde muhtemel parazit kaynakları aşağıdaki gibi üç grup altında incelenebilir:

1. Ölçüm elemanlarından kaynaklanan parazitler;
 - Transdüser bağlantıları,
 - Kablolardaki bükümler ve hasarlar,
 - Elektrik kablolarında meydana gelen manyetik alan,
 - Kısa devre akımları,
 - Yükselticilerden kaynaklanan parazitler,
 - 50/60 Hz 'lik besleme gerilimi,
2. Veri toplama cihazından kaynaklanan parazitler;
 - Analog sinyallerin sayısal sinyallere dönüştürülmesi
 - Cihazın dinamik aralığı (sayısal hassasiyet),
3. Çevreden gelen parazitler;
 - Olumsuz deney ortamı (sıcaklık ve nem gibi),
 - Çevredeki radyo frekans dalgaları,
 - Yakın çevrede çalışan diğer cihazlar,
 - Zemindeki titreşimler.

Gerçekte, yukarıda sayılan bu parazit kaynaklarının sadece modal test ölçümleri için değil pratikteki tüm ölçümler için geçerli olduğu açıkça söylenebilir.

Deneysel ölçümlere katılan bu parazitlerin azaltılması ve kaliteli verilerin alınması için dikkat edilmesi gereken bazı hususlar vardır ve bunlar şöyle özetlenebilir:

- Deney ortamının mümkün olduğu kadar çevresel etkilerden arındırılması,
- Kaliteli cihaz ve aletlerin kullanılması,
- İyi yalıtımlı kabloların kullanılması, düzgün bir şekilde bükümsüz olarak tutulması ve bağlantılarının sağlam olması,
- Olabilecek şase akımlarının önlenmesi.

Genel olarak deneysel bir ölçüm için alınabilecek bu fiziksel önlemlerin yanında modal test açısından ölçümde kullanılan analizör ve diğer yardımcı cihazların özelliklerine bağlı olarak alınabilen bazı önlemler de vardır:

- Parazitlerin tahrik ve cevap verilerindeki etkisine uygun olarak H_1 , H_2 ve bunun gibi farklı tipteki FTF hesaplayıcılarının kullanılması,
- Bir noktadan alınan ölçümün tekrarlanarak ortalamalarının alınması ve
- Filtre uygulamaları (alçak, yüksek ve bant geçiren filtreler) örnek olarak sayılabilir.

Deneysel bir ölçümde gerek fiziksel ve gerekse kullanılan cihazların özelliklerine göre alınabilecek bu tedbirlere ve gösterilecek azami itinaya rağmen alınan ölçümlerde parazitlerden tamamen kurtulmak hiçbir zaman mümkün değildir.

Deneysel verilerin verimli bir şekilde kullanılabilmesi ve daha güvenilir analizler için verilerdeki ölçüm hatalarının elenmesi gerekir. Verilerin kalitesini etkileyen faktörler ve bunların verilerden ayıklanması bir çok araştırmacı için ilgi çekici bir konu olmuştur. Bu konuyla ilgili olarak yapılan çalışmaları, ulaşılan sonuçları ve yapılması gerekenleri ortaya koymak bakımından kapsamlı bir literatür araştırması yapılmış ve aşağıda sunulmuştur.

1.7 Literatür Araştırması

Son yıllarda yapısal dinamik modelleme alanında analitik yöntemlerle beraber modal test tekniğinin kullanılması için büyük çabalar harcanmaktadır. Bunun sonucu olarak yapıların dinamik davranışlarının modal test tekniği ile belirlenmesine olan ilgi giderek artmaktadır. Pratikte modal testin yapısından kaynaklanan bazı faktörler nedeniyle modal test ile elde edilen modeller çoğu zaman istenen kalitede olmamaktadır. Bu durum deneysel verilere dayalı analiz sonuçlarının hem güvenilirliğini hem de başarı oranını azaltmaktadır. Bu nedenle araştırmacılar kaliteli bir modal test için yoğun çaba harcamaktadırlar. Bu bölümde, modal testte karşılaşılan problemler ve bu problemlerin çözülmesi için bu güne kadar yapılan çalışmalar özetlenmiş ve irdelenmiştir.

1.7.1 Frekans Tepki Fonksiyonlarının Niteliği ve Kalitesi

Bir ölçüm sistemi mantıklı, sistematik ve bir bütün olarak dizayn edildiğinde geçerli ve belirli toleranslar içerisinde kaliteli veriler elde edilebilir. Doğru kurulmuş ve bilinçli olarak yapılan bir testten elde edilen veriler teorik tahminlerle uyuşmuyorsa o zaman teori tekrar gözden geçirilmelidir. Çünkü, teorik incelemelerde bir sistemin davranışı sınır şartları, malzeme özellikleri ve başlangıç şartları bir takım kabullere dayandırılmaktadır. Oysa deneysel çalışmalar herhangi bir kabul yapılmaksızın doğrudan yapı üzerinde gerçekleştirildiğinden dolayı yapı hakkında daha gerçekçi bilgiler edinilebilir. Deneysel verilerin kalitesi teorik sonuçlardan ziyade kendi yapısı içerisinde kontrol edilmelidir [5].

Deneysel modal analizde karşılaşılan sistematik hatalar Marudachalam ve Wicks [6] tarafından incelenmiştir. Transdüser kütlelerinin iki ucu serbest bir çubuğun doğal frekansları ve mod biçimleri üzerindeki etkileri; analitik, sonlu elemanlar ve deneysel modal analiz ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak incelenmiştir. Deneysel çalışma, sarsıcı ve darbe çekici kullanılarak farklı iki tahrik durumu için gerçekleştirilmiş, cevap ölçümlerinde hem öteleme hem de açısız yöndeki titreşimleri ölçebilen transdüserler kullanılmıştır. Sarsıcı kullanılarak yapılan testlerde her bir FTF ölçümü için ivme ölçer başka bir noktaya taşındığından her defasında etkisi farklı olmaktadır. Bu nedenle bu testlerden ölçülen doğal frekanslar her bir FTF 'nda farklı olabilmektedir. Diğer taraftan sonlu elemanlar çözümünde transdüser kütlelerinin modellenmesi halinde elde edilen doğal frekansların ve mod biçimlerinin çekiç testinden ölçülen FTF 'larının modal analizi ile elde edilenlerle daha iyi bir uyum sergilediği gözlenmiştir. Bu durum; deneysel modal analizde, transdüser kütle etkilerinin dikkate alınması gerektiğinin bir göstergesidir. Ayrıca, test yapısının düşey olarak asılması durumunda ağırlık kuvvetinin sistemin dinamiği üzerinde önemli bir etki oluşturmadığı da gösterilmiştir.

Wicks [7] FTF hesaplamalarında ve modal parametrelerin bulunması için kullanılan eğri uydurma işlemlerinde karşılaşılan hatalardan bahsederek bu hataları % oranlarına göre nitelendirmeye ve bir standart getirmeye çalışmıştır. Modal test ile oluşturulan modellerin kalitesinin kullanılacağı alana göre değiştiğinden bahsetmiştir. Örneğin doğal frekansları belirlemek için modal parametreler \pm %10 hassasiyette biliniyorsa modelin kalitesi uygun kabul edilebilirken bir kontrol sistemi

için hatanın %3 'den az olması istenir. Bunun yanında parametreler eğer bir ters (inverse) problem veya kuvvet belirleme işleminde kullanılacaksa matrislerde meydana gelecek zayıflıktan (ill-conditioning) kaçınmak için modeldeki hatanın %1 'den daha az olması gerektiği belirtilmiştir.

Jung ve Ewins [8] modal testte var olan ve FTF 'larının kalitesini ve dolayısıyla modal parametrelerin doğruluğunu olumsuz yönde etkileyen sistematik hataları; ölçüm hataları, sinyal işleme hataları ve modal analiz hataları olmak üzere üç ana grup altında sınıflandırarak kapsamlı bir şekilde incelemiştir.

Modal test uygulama alanlarından bir çoğu kaliteli FTF 'larına ihtiyaç duymaktadır. Mitchell [9] yapısal değişim amacıyla kullanılacak deneysel modellerin kurulmasında ve yapısal sistemlerin sayısal modellerinin doğrulanmasında (model updating) kullanılacak deneysel yöntemlerin kalitesini etkileyen faktörler üzerine bir inceleme yapmıştır. Modal parametrelerin tahmininde kullanılan FTF 'larının kalitesi (quality), sonlu elemanlar gibi modellerin doğrulanmasında kullanılacak verilerin niteliği (quantity) ve modal parametrelerin alışılmış modal yöntemlerle elde edilemediği (unobtainable) durumları açıklamaya çalışmıştır. Ölçülen verilerdeki parazitler FTF 'larının kalitesini belirlemektedir. FTF 'nun niteliği yapı üzerinde yeterli noktada, bu noktalarda yeterli yönlerde ve yeterli frekans aralığında ölçüm alınması ile belirlenir. Genel olarak bir çok modal testte serbestlik derecesi, bir kaç yüz (genellikle x-y-z yönleri) ile sınırlıdır. Yapısal değişim gibi işlemlerde testlerin tekrar edilmesi gerektiği göz önüne alınırsa bu tür amaçlar için yapılan modal testlerin oldukça zahmetli ve pahalı bir çalışma olduğunu söylemek mümkündür. Yine yapısal değişimde açısal serbestlik derecelerine de ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak günümüzde genel amaçlı ve yaygın olarak açısal yöndeki titreşimleri ölçebilecek bir transdüser mevcut olmadığı gibi pratik olarak moment uygulayacak ve ölçecek aletler de henüz mevcut değildir. Modal parametrelerin belirlenememe (unobtainable) durumu ise yüksek modal yoğunluk (modal density) yani dar bir frekans aralığında birbirine çok yakın modların bulunduğu ve aşırı sönüm olduğu durumlarda ortaya çıkmaktadır. Bu gibi durumlarda, rezonans ile ters rezonans (antiresonance) tepeleri birbirlerine oldukça yakın olduğundan ve rezonans genlikleri aşağı, ters rezonans genlikleri ise yukarı çıktığından FTF 'ları nispeten düz görünürler. Bu durumlarda belirlenememe problemi ortaya çıkmaktadır. Diğer bir

ifadeyle deneysel modal analiz sonuçlarından modelin kurulması mümkün olmamaktadır.

Yapıların sonlu elemanlar modellerinin ölçülmüş FTF 'larıyla düzeltilmesinde de ölçülmüş verilerin kaliteli olması istenir. Ziaei ve Imregun [10] parazit, veri işleme, yapı-sarsıcı etkileşimi ve yapının lineer olmayan davranışları gibi hataları analitik olarak modelleyerek böyle bir uygulamada müsaade edilebilecek hata miktarını değerlendirmeye çalışmışlar ve müsaade edilebilecek hatanın %0.1-0.25 gibi çok küçük değerlerde olabileceği sonucuna varmışlardır.

1.7.2 Transdüser Kütle Etkisi

Kuvvet ve cevapları ölçmek üzere bir yapıya bağlanan transdüserler ölçülen doğal frekansların gerçek değerinden sapmasına neden olmaktadır. Mace [11] modal test amacıyla bir kiriş üzerine yerleştirilen transdüserlerin kütle ve atalet momentlerinin doğal frekanslar ve cevap seviyeleri üzerindeki etkilerini dalga yayılımı (wave propagation) prensibine göre incelemiştir. Alçak frekanslarda transdüserin kütleli ataleti etkili iken yüksek frekanslarda atalet momentinin etkili olduğunu ve transdüserin konumunun da önemli bir faktör olduğunu göstermiştir.

Dossing [12] kütle etkisi dolayısı ile doğal frekanslarda meydana gelen değişim miktarının tahmini için 'sürüş noktası artık yöntemi' (Driving point residue method) önermiştir. Bu teknik modal uzayda formüle edilen değişim teorisine dayanmaktadır. Bir yapının orijinal ve değiştirilmiş doğal frekansları arasındaki oran, eklenen kütle (Δm_i) ve mod biçimine (ϕ_{ir}) bağlı olarak aşağıdaki ifade ile verilmiştir:

$$\frac{\omega_r^2}{\omega_{or}^2} = \frac{1}{\frac{1}{\phi_{ir}^2} + \Delta m_i} \quad (1.4)$$

Burada $1/\phi_{ir}$, i koordinatında r moduyla ilgili efektif dinamik kütle (apparent dynamic mass).

Transdüser kütle yük etkisinin tahrik kuvveti ve cevap ölçümünün aynı noktada yapılması ile elde edilen sürüş noktası (driving point) FTF 'ları üzerinden kaldırılması için Ewins [1] tarafından tanımlanan 'kütle etkisini kaldırma' (mass cancellation) yöntemi uzun zamandan beri bilinmektedir. Transdüser kütle etkisinin kuvvet ile cevap ölçümünün farklı noktalarda yapılmasıyla elde edilen transfer FTF 'ları üzerinden kaldırılması ise halen önemli bir problemdir. Bu problemin çözümü için ilk olarak Decker ve Witfeld [13] bir yöntem sunmuşlardır. Bu yöntemde Klosterman [14] tarafından geliştirilen ve "frekans tepki fonksiyonlarını kullanarak yapısal değişim" işlemi (Structural Modifications Using Frequency Response Functions - SMURF) diye adlandırılan teknik kullanılmıştır ve transdüserin konulduğu yerdeki noktasal FTF 'nun bilinmesi halinde transfer FTF 'larından transdüser kütle etkisinin çıkarılabileceği gösterilmiştir. Ancak transdüser konumundaki noktasal FTF 'larının ölçülmesinin her zaman pratik olamayacağı belirtilmiştir. İhtiyaç duyulan bu noktasal FTF 'nun ölçülmesi yerine FTF matrisinin bir kolonunun ölçüldüğü düşünülerek yaklaşık bir formülle hesabı veya tahrik noktasındaki sürüş noktası FTF 'nun iki farklı transdüser kombinasyonu için ölçülerek elenmesi önerilmektedir. Birinci yöntemde geliştirilen formül sistemin tek serbestlik dereceli bir sistem gibi davrandığı yani modların birbirinden iyice ayrıştığı frekans bandında geçerli olmaktadır ve yakın modlarda hatalar ortaya çıkmaktadır. İkinci yöntemde, yani eleme metodunda formülasyona bağlı olarak ortaya çıkan bir takım hatalar mevcuttur. Bunlardan biri düzeltmenin gerekmediği yerlerde düzeltme yapılmasıdır. Bu durum bir ağırlık fonksiyonu kullanılarak giderilmeye çalışılmıştır. Yapılan nümerik simülasyonda ağırlık fonksiyonu kullanılması halinde nispeten iyi sonuçlar elde edilmesine rağmen FTF 'larında parazit olması durumunda bazı hatalar oluştuğu görülmüştür. Aynı durum deneysel uygulamalarda da özellikle ters-rezonans bölgelerinde söz konusudur.

Silva ve diğ. [15] FTF 'larıyla yapılan yapısal birleştirme (structural coupling) tekniğine dayalı bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu teknikte ilave bir kütle veya ikinci bir transdüser kullanılarak yapılan bir grup ölçüm ve hesaplardan sonra transfer FTF düzeltilmekte ve ayrıca ölçülmeyen diğer bir noktasal FTF da hesapla bulunabilmektedir. Bu ilave avantajdan yararlanan Silva ve diğ. [16] her FTF ölçümünde bir önceki ölçüm koordinatına ilave kütle yerleştirip FTF matrisinin bir kolonunu oluşturduktan sonra ilave edilen tüm kütleleri yapısal ayırma (structural

uncoupling) tekniği ile birer birer kaldırdıkları gibi bu işlemler sonucunda tüm FTF matrisinin oluşturulabileceğini göstermişlerdir. Silva ve diğ. [17] bir sonraki çalışmalarında parazitli FTF 'ları sayısal simülasyonda kullanarak bu yöntemlerinin performansını denemişler ancak istenildiği kadar iyi sonuçlar elde edememişlerdir. Modal analizin ardından yeniden üretilen FTF 'ları elde edildikten sonra yöntemin uygulanması önerilmektedir.

Ashroy [18] SMURF yöntemini kullanarak farklı bir yaklaşım getirmeye çalışmıştır. Önceki yöntemlerde olduğu gibi sürüş noktası FTF 'larının ölçüm gerekliliğini ortadan kaldırmak amacıyla farklı ağırlıkta iki ayrı transdüser ile ölçüm yapılmasını önermektedir. Bu sayede sürüş noktası FTF 'nun da ölçülmeksizin hesaplanabileceği belirtilmektedir. Ancak geliştirilen formülasyonda ters matris işlemi gerekmektedir ve kütle etkisinin küçük olduğu durumlarda tekilliğin ortaya çıkması ihtimali hatalara neden olmaktadır. Ayrıca parazitlerin de sonuçları olumsuz yönde etkilediği görülmüştür. Ashory [19] bir sonraki çalışmasında da incelenen bir yapı üzerinde ivme ölçerin kütle tesirinin niteliğini belirlemek ve düzeltme gerekip gerekmediğine karar vermek amacıyla takip edilebilecek bir strateji önermiştir.

Ölçülen FTF 'ları üzerinde transdüser kütlelerinin sadece doğrusal yönlerde değil açısal yönlerde de etkileri vardır. Bir yapı üzerine uygulanabilen kuvvet ve momente karşılık ötelenme ve dönme hareketleri olduğu göz önüne alınırsa bunlar arasındaki ilişkiler ötelenme/kuvvet, ötelenme/moment, dönme/kuvvet ve dönme/moment fonksiyonları ile ifade edilebilir. Buna göre dönme ve moment ile ilgili fonksiyonlar %75 'lik bir paya sahiptir. Ancak bir sisteme pratik olarak moment uygulanamaması ve dönme yönündeki cevapların ölçülmesindeki zorluklar bunları ihmal etmeye zorlamaktadır [1]. McConnel ve Cappa [20] transdüser kütlelerinin tüm yönlerdeki etkilerinin dikkate alınması gerektiğini gösteren bir çalışma yapmışlardır. Açısal ivmeleri ölçebilen transdüserlerin bulunamaması durumunda birbirine çok yakın iki noktadan alınan ölçümlerle açısal FTF 'larının hesabı için dolaylı bir yöntem sunmuşlardır . Ayrıca kuvvet çubuğunun etkisini de dikkate alarak darbe (impact), ve rastlantısal (random) gibi farklı tahrik tiplerinin FTF 'ları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir.

1.7.3 Mesnetleme Etkileri

Bir yapının serbest sınır şartlarındaki davranışlarını incelemek için yapı genellikle hafif yaylarla veya elastik kordonlarla asılır. Bu elemanların etkileri genellikle ihmal edilmekle beraber özellikle düşük doğal frekanslara sahip esnek yapılarda önemli değişikliklere yol açabilmekte; doğal frekansların olduğundan daha büyük ölçülmesine ve titreşim modlarının da etkilenmesine neden olmaktadır [1-4, 21].

Sistemik hataların önemli olduğu modal test uygulama alanlarından biri yapısal değişim amacıyla teorik modellerin deneysel modellere uydurulmasıdır. Böyle bir uygulama için Lindholm ve West [22] askı elemanlarının katılığının bir çubuğun doğal frekanslarını ve mod biçimlerini nasıl etkilediğini farklı uzunluk ve kalınlıktaki elastik kordonları kullanarak incelemeye çalışmışlardır. Carne ve Dohrmann [23] mesnet şartlarının ölçülen modal parametreler üzerindeki etkilerini incelemişler ve “yay ile mesnetlenmiş sistemin ölçülen frekanslarındaki artışın, rijit cisim mod frekansının karesinin elastik mod frekansına oranının yarısına ($\Delta\omega = \omega_s^2 / 2\omega_m$)” eşit olduğunu göstermişlerdir. Çalışmada mesnetin sönümü de dikkate alınmış ve az sönümlü bir sistemde rijit cisim modu en düşük elastik mod frekansının %10 ‘undan büyük olmaması durumunda bile ölçülen sönümlerin gerçek değerinden uzak olabileceği görülmüştür.

Mesnet etkisinin FTF ‘larından kaldırılması için Ashory [18] bir yöntem geliştirmiştir. Ashory ‘nin geliştirdiği yöntem yapısal düzenleme tekniğine dayanmaktadır ve bir noktadan asılan yapıdaki askı yayının etkisini kaldırmak amacıyla yapı farklı katılığa sahip üç farklı askı yayı ile sırasıyla asılarak bir FTF ölçümü üç defa tekrarlanmaktadır. Bu sayede askı yayının asıldığı noktadaki FTF da hesaplanabilmekle beraber, ölçümün üç defa tekrarlanması yöntemin uygulanabilirliğini zorlaştırmaktadır. Yapının iki ayrı noktadan asılması durumunda ise bu ölçümlerin dokuz defa tekrarlanması gerekmektedir. Bu olumsuzlukların yanında parazitler de yöntemleri etkisiz hale getirmektedir ve pratikte uygulanmasına engel olmaktadır. Bu bakımdan halen pratik bir çözüme ihtiyaç duyulmaktadır.

Munsi ve diğ. ‘de [24] narin bir yapının modal analizinde askı yaylarının etkilerini incelemişlerdir. '8' şeklindeki bir yapı üzerinde yapılan incelemede, ince ve hafif bir askı kordonu kullanılması halinde asma konumlarının doğal frekanslar üzerinde

önemli bir etki oluşturmadığı, ancak, daha kalın bir kordon kullanıldığında sönüm etkisinden dolayı bazı modların kaybolduğu görülmüştür. Bu bakımdan uygun bir kordon seçilerek ve yapı düğüm noktasından veya yakınından asılmak suretiyle bu etkilerin azaltılabileceği belirtilmiştir.

Elastik mesnetler özellikle çok büyük ve esnek yapıları etkilemektedir. Bu tür yapıların doğal frekansları oldukça düşüktür. Alışılmış modal test yöntemleriyle yapıların çok düşük veya çok yüksek modlarının belirlenemediği durumlar da vardır. Bu modların belirlenebilmesi için "küçük değişimli sınır koşulları testi" (Perturbed Boundary Condition test) veya "çoklu sınır koşulları testi" (Multiple Boundary Condition) olarak adlandırılan test yöntemleri uygulanmaktadır [25-30]. Bu yöntemde incelenen yapıya bir veya daha fazla konumda yay veya kütleler eklenir. Örnek olarak çok düşük frekanslardaki modları görebilmek için yapıya yay eklenirken çok yüksek frekanslardaki modları görebilmek için kütleler eklenir. Değişim koordinatları değiştirilerek farklı kombinasyonlar için bir grup FTF ölçülür ve bunlar birlikte analiz edilerek yapının dinamik özellikleri belirlenmeye çalışılır. Bu yönüyle bu tip bir test ile mesnet etkilerinin giderilebildiği söylenebilir.

1.7.4 Yapı -Sarsıcı Etkileşimi

FTF ölçümlerinde karşılaşılan ve incelenen yapının dinamik davranışını etkileyen hatalardan biri de yapı-sarsıcı etkileşimidir. Bir yapının tahriki için yapıya bağlanan sarsıcının yapının dinamiğini nasıl değiştirdiği konusu bir çok araştırmacı için inceleme konusu olmuştur. Bundan 20 yıl kadar önce Mitchell ve Elliot [31] ve Hieber [32] sarsıcıda üretilen kuvvetin yapıya iletilmesinde kullanılan kuvvet çubuklarının dizaynı ve seçimi üzerine çeşitli stratejiler önermişlerdir [20]. Hu ve McConnell [33, 34] kuvvet çubuğunun boyuna titreşimini dikkate alarak kuvvet çubuğu ve transdüser kütesinin FTF genlikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Yapıya iletilen kuvveti ölçmek için kullanılan transdüser genellikle bu çubuğun yapıya gelen tarafına bağlanmaktadır. Ancak incelenen yapı fiziksel olarak küçük olduğu zaman transdüserin etkilerinden kaçınmak için kuvvet transdüserinin kuvvet çubuğunun sarsıcı tarafındaki ucuna bağlanması tercih edilir. Bu durumda özellikle yüksek frekanslarda kuvvet çubuğu FTF 'larını etkilemektedir.

Lee ve Chou [35, 36] FTF ölçümlerinde kuvvet çubuğunun etkisini yapısal birleştirme algoritmasını kullanarak incelemişlerdir. Sarsıcının zemine rijit olarak oturduğu kabul edilerek kuvvet çubuğu ankastre olarak dikkate alınmış ve farklı boyutlar için modellenerek yapının doğal frekanslarındaki değişimleri incelenmiştir. Ewins [1] 'in kuvvet çubuğu çapının 1 mm ve uzunluğunun 5~10 mm seçilmesi önerisinin her zaman geçerli olmadığı sonucuna varılmış ve deneme-yanılma yoluyla yapılacak bir kontrolle en uygun çubuk boyutlarının seçilmesi önerilmiştir.

McConnell ve Varoto [37] titreşim testlerinde yapı-sarsıcı etkileşiminden kaynaklanan kuvvet çubuğunun eğilme rijitliği ile beraber transdüserlerin ataletlerinin FTF 'ları üzerindeki etkilerini sonlu elemanlar yardımıyla belirlemeye çalışmışlardır. McConnel ve diğ. [38] kuvvet çubuğu esnekliğinin bir kirişin FTF 'ları üzerindeki etki seviyesini sayısal simülasyon kullanarak incelemişlerdir. Örnek olarak bir kiriş ankastre-serbest ve basit-serbest olarak iki farklı sınır şartı için modellenmiştir. Kuvvet çubuğu da ankastre-serbest olarak modellenmiş ve yapısal birleştirme tekniği kullanılarak çubuğun FTF 'larındaki değişimler incelenmiştir. Bu incelemede, en büyük hatanın temel doğal frekansta olduğu ve basit mesnetli kirişte sadece bazı modlar etkilenirken ankastre kirişte bütün modların etkilendiği görülmüştür. Kuvvet çubuğu eğildiğinde incelenen yapıda bir yay tesiri oluşturduğundan sadece bu durumlarda yapının rezonans frekanslarının daha büyük ölçüldüğü belirtilmiştir. Ayrıca, farklı uzunluktaki kuvvet çubuklarının etkileri de incelenmeye çalışılmıştır. Uzun çubuk kullanılmasının bazı rezonans tepelerinin çift rezonans gibi gözükmesine neden olduğu görülmüştür. Böyle bir durumla karşılaşıldığında daha sert ve kısa bir çubuk kullanılarak kontrol yapılması önerilmektedir.

Tahrik sisteminin yapının dinamik davranışı üzerindeki etkisi üzerine bir çalışma da Olbrechts ve diğ. [39] tarafından yapılmıştır. Çekiç testi referans olmak şartıyla sarsıcının kuvvet çubuğuyla birlikte ve kuvvet çubuğu olmaksızın doğrudan bağlanması halinde sarsma sisteminin yapının dinamiğini nasıl değiştirdiğini hem deneysel hem de sonlu elemanlarla modelleyerek incelemişlerdir. Çalışmada en çok etkinin sarsıcının doğrudan yapıya bağlandığı ve "atalet sarsıcı" (inertial shaker) olarak adlandırılan durumda ortaya çıktığı görülmüştür. Genel olarak bir yapıya bir atalet eklendiğinde bu yapının rezonans frekanslarının düşmesi beklenirken, belli bir frekansın altındakilerin düştüğü ve diğerlerinin ise büyüdüğü gözlenmiştir. Sonlu

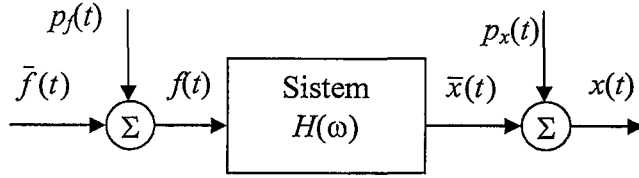
elemanlarla yapılan incelemede ortaya çıkan sonuca göre; atalet sarsıcı yapıya kütle eklediği gibi tüm sistemin katılığını da artırmaktadır. Bu nedenle düşük frekanslarda, kütle etkisi rezonans frekanslarını azaltırken yüksek frekanslarda, katılık etkisi rezonans frekanslarını yükseltmektedir. Buna göre atalet sarsıcı kullanılarak yapılan bir ölçümün sonuçlarının yorumlanmasında dikkatli olunması önerilmiştir.

Yapı-sarsıcı etkileşiminden kaynaklanan diğer bir problem ise, elektrodinamik sarsıcılar kullanıldığında, kuvvetin rezonans frekanslarında bozulmasıdır. Yapı rezonansa girdiğinde sarsıcı ve yapı arasındaki reaksiyon kuvveti küçülmektedir. Bu düşüşten dolayı kuvvet sinyali üzerinde parazit etkileri artmaktadır. Bu problem Tomlinson [40] tarafından incelenmiş ve sarsıcının dinamik özelliklerinden kaynaklanan bu problemin uygun dinamik davranışa sahip sarsıcı seçimi ile önlenileceği sonucuna ulaşılmıştır.

1.7.5 Ölçülmüş Verilerdeki Parazitler

Elektronik cihazlar kullanılarak ölçülen deneysel verilerde parazitlerden kaçınmak mümkün değildir ve bunlar veri kalitesini olumsuz yönde etkilemekle beraber çok hassas analizlerin yapılmasına da olanak vermemektedir. Bu parazitlerin ölçülmüş verilerden ayıklanabilmesi için çeşitli sayısal filtreler geliştirilmiş (alçak geçiren, yüksek geçiren, vs.) ve ölçüm aletlerinde kullanılmak üzere elektronik devreler olarak tasarlanmıştır. Mekaniksel ölçümlerdeki parazit kaynakları çok çeşitli olmakla beraber bunların tam olarak belirlenmesi mümkün değildir. Yine de Fahey ve Wicks [41] tarafından önerildiği gibi ölçümden önce yapılacak basit bir test ile bunlardan bazılarının niteliği hakkında bazı bilgiler edinmek mümkün olabilmektedir. Örnek olarak veri toplama sisteminin ölçüm elemanlarına bağlanan uçları kısa devre edilmek suretiyle yapılacak bir ölçümle veri toplama sisteminden kaynaklanan parazitler hakkında bir fikir edinilebilir. Sonra ivme ölçer ve ilgili diğer elektronik cihazlar sisteme bağlanarak bunlardan kaynaklanan parazitler değerlendirilebilir. Son olarak ivme ölçer test edilecek yapıya tutturulduktan sonra herhangi bir tahrik uygulanmaksızın yapılacak bir ölçümle de çevreden gelen parazitler değerlendirilebilir. Böylece veri toplama cihazı, transdüser ve çevreden gelecek parazitlerin ölçümün kalitesini ne derecede etkileyeceği tahmin edilebilir.

FTF bir yapıdan ölçülen kuvvet ve cevap sinyallerinin Fourier dönüşümlerinden elde edilmektedir. Şekil 1.5 'de görüldüğü gibi transfer fonksiyonu (FTF) $H(\omega)$ olan lineer bir sistemin giriş ve çıkışındaki gerçek sinyaller $\bar{f}(t)$ ve $\bar{x}(t)$ iken ölçülen sinyaller - $f(t)$ ve $x(t)$ - ilave olarak gelen $p_f(t)$ ve $p_x(t)$ parazitlerini de içermektedir [42].



Şekil 1.5 Tek giriş/çıkışlı lineer bir sistem modeli.

Ölçülen verilerdeki parazitlerin etkisini azaltmak için geliştirilen çeşitli FTF hesaplayıcıları vardır. Bunlar arasında en yaygın olarak kullanılanlar H_1 ve H_2 olarak adlandırılan hesaplayıcılardır ve aşağıdaki gibi ifade edilirler [43]:

$$H_1(\omega) = \frac{G_{fx}(\omega)}{G_{ff}(\omega)}, \quad H_2(\omega) = \frac{G_{xx}(\omega)}{G_{xf}(\omega)} \quad (1.5)$$

Burada $G_{ff}(\omega)$ girişin öznel spektrumunu (autospectrum), $G_{xx}(\omega)$ çıkışın öznel spektrumunu ve $G_{fx}(\omega)$ ile $G_{xf}(\omega)$ 'de giriş ve çıkış için çapraz spektrumu (cross spectrum) göstermektedir. Bunlardan H_1 sistemin sadece girişindek parazitleri, H_2 ise çıkışındaki parazitleri en aza indirgeme etkisi taşımaktadır. Ancak giriş ve çıkışta aynı anda parazit olması durumunda FTF 'unda bozulmalar (bias) ortaya çıkabilmektedir. Bunlara alternatif olarak Wicks ve Vold [44] tarafından H_s ve Mitchell ve Deel [45] tarafından H_c hesaplayıcıları önerilmekle beraber H_1 ve H_2 halen en sık kullanılan yöntemlerdir [46]. Mevcut hesaplayıcıların model düzeltmedeki etkileri Ratcliffe ve Lieven [47] tarafından tartışılmıştır. Not olarak belirtilecek olursa H_1 ve H_2 'nin birbiriyle oranıyla hesaplanabilen 'koherans' (coherence), ölçülen FTF 'nun kalitesini belirlemede oldukça faydalı olmaktadır.

$$\gamma^2 = \frac{H_1}{H_2} \quad (1.6)$$

Frekansa bağılı olan koherans, her zaman bir veya birden küçük olabilir. Bu değerin bir olması FTF 'nun kaliteli ölçüldüğünü gösterir, bir değerinden uzaklaşması ise parazit, yapının lineer olmayan davranışları gibi nedenlerle FTF 'nun kalitesinin düştüğünü gösterir.

Ölçülen verilerin analizi 'sayısal işaret işleme' (digital signal processing) alanının bir konusudur ve bu alandaki önemli problemlerden biri de sonlu örneklerden oluşan ve parazit içeren bir zaman sinyalinin frekans spektrumunun doğru olarak elde edilmesi ile ilgilidir. Ölçülen bir $x(k)$ zaman sinyali gerçek veri $\bar{x}(k)$ ile parazitlerin ($p_x(k)$) toplamı olarak yazılabilir:

$$x(k) = \bar{x}(k) + p_x(k) \quad ; \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (1.7)$$

Ölçülen veri içerisindeki gerçek sinyalin,

$$\bar{x}(k) = \sum_{i=0}^{M-1} b_i e^{j\theta_i} e^{j\omega_i k} \quad \text{veya} \quad \bar{x}(k) = \sum_{i=0}^{M-1} b_i \sin(\omega_i k + \theta_i) \quad ; \quad k=0, 1, \dots, N-1 \quad (1.8)$$

biçiminde farklı genlikteki M tane sinüsoidin toplamı ile ifade edilebileceği dikkate alınarak bu sinyalin her bir harmoniğinin b_i , θ_i ve ω_i ile ifade edilen genlik, faz ve frekans parametrelerinin bulunması için bir çok teknik ve algoritmalar geliştirilmiştir [48, 49]. Bu yöntemler arasında modern sayısal analizden bilinen ve özellikle matris rankının belirlenmesinde etkili bir araç olan Tekil Değerlerine Ayrıştırma (TDA) işlemine dayalı tekniklerin oldukça etkili ve yaygın bir şekilde kullanılması ilgi çekicidir. Sonraki bölümlerde detaylı olarak incelenecek olan TDA 'nın verilerin kalitesinin iyileştirilmesi ile ilgili olarak kısa bir literatür incelemesinin burada verilmesi uygun olacaktır. Herhangi bir $[A]$ matrisinin TDA 'sı aşağıdaki ifadeyle verilmektedir [50-53]:

$$[A]_{M \times N} = [U]_{M \times M} [\Sigma]_{M \times N} [V]_{N \times N}^T \quad (1.9)$$

Burada $[U]$ ve $[V]$ sırasıyla sol ve sağ ortogonal matrisler, $[\Sigma]$ ise köşegen tekil değerler matrisidir. TDA 'nın, gerçel kare matrisler için 1870 'lerde Beltrami ve

Jordan tarafından, kompleks kare matrisler için Autonne [54] ve genel dikdörtgen matrisler için de Eckart ve Young [55] tarafından geliştirildiği bilinmektedir [50].

TDA ile parazitli verilerden gerçek verinin çıkarılması prensibi oldukça eski bir tarihe dayanmaktadır. 1936 yılında Eckart ve Young [56] verilen bir matrisi, daha küçük bir rank değerine sahip başka bir matrisle yaklaşık olarak ifade etmek için bir teorem geliştirmişlerdir [57]. Yapılan araştırmaya göre, bu teorem ilk olarak 1982 yılında Tufts ve diğ. [57] tarafından parazitli bir verideki gerçek sinyalin elde edilmesinde kullanılmıştır. TDA daha sonra da gerçek sinyallerin elde edilmesinde kullanılan yöntemlerin iyileştirilmesinde kullanılmıştır [58-60]. Parazitlerin ayıklanmasında temel prensip olan Eckart-Young teoremi Ek B 'de verilmiştir.

Sayısal bir teknik olan TDA tekniğinde son yirmi yıl içerisinde çok önemli gelişmeler olmuş ve günümüzde pek çok alanda kullanıldığı gibi verilerin kalitesinin iyileştirilmesinde de oldukça etkili bir araç olarak kullanılmaktadır. Cadzow [61] bu temel prensibin tekrarlanmasına dayanan iteratif bir yöntem sunmuştur. İteratif yöntemlerde başlangıç değerinin seçimi sonuçları önemli derecede etkilemektedir. Dologlou ve diğ. [62] bu etkileri en aza indirecek bir strateji sunmuşlar ve bunu otomatik bir Manyetik Rezonans Spektroskopunun performansını arttırmak için kullanmışlardır. Benzer bir iteratif yöntem küçük boyutlu kaotik sinyallerdeki parazitlerin azaltılmasında da Shin ve diğ. [63] tarafından kullanılmıştır.

TDA literatürde oldukça geniş bir alanda çok çeşitli amaçlar için kullanılmıştır. Tıp alanında Callaerts ve diğ. [64] hamile bir anneden alınan elektrokardiogram sinyallerinden anne ve cenin bilgilerinin ayrı ayrı elde edilmesi için kullanmışlardır.

De Moor [65] ölçülen verilerin, gerçek veri ve parazitlerden oluştuğunu göz önüne alarak gerçek veri matrisinin bazı kabuller altında TDA tekniği ile elde edilebilirliğini incelemiştir. Gerçek veri ve parazit matrislerinin bazı istatistiksel şartları sağlaması halinde gerçek veri matrisi, TDA tekniği ile beraber minimum varyans yaklaşımı (minimum variance estimation) kullanılarak elde edilmeye çalışılmıştır. Ayrıca bir takım geometrik yorumlarla da yöntem açıklanmaya çalışılmıştır.

Jensen ve diğ. [66] bir konuşma sinyalindeki parazitlerin azaltılması için bölmeli TDA olarak adlandırılan tekniği kullanmışlardır. Burada adı geçen bölmeli TDA

(Quotient SVD) başka literatürlerde genelleştirilmiş TDA olarak da adlandırılmaktadır. Bu çalışmada da veri ve parazit matrisinin bazı şartları sağlaması halinde gerçek veri matrisinin en küçük kareler metodu ve minimum varyans metodu (Bakınız: Ek B) kullanılarak elde edilmesinden bahsedilmiş ve bölmeli TDA tekniği için algoritma verilmiştir. Ayrıca TDA tekniği ile parazit ayıklamada önemli bir parametre olan rank değerinin seçiminin etkisi de incelenmiştir.

TDA tekniği ile ilgili gerek algoritma gerekse uygulama alanı olarak daha bir çok kaynak gösterilebilir. Ancak bundan sonra bu tekniğin asıl ilgi alanı olan yapısal dinamikte analiz sonuçlarının iyileştirilmesi amacıyla kullanılmasına ilişkin olarak yapılan çalışmalardan bahsedilmesi uygun olacaktır.

TDA tekniği yapısal dinamikte bugüne kadar başta tekilliğin söz konusu olduğu en küçük kareler problemlerinin çözümü olmak üzere çeşitli amaçlar için kullanılmış ve son zamanlarda giderek daha geniş bir kullanım alanına sahip olmuştur. Tipik bir modal test, genellikle, modal parametrelerin belirlenmesi ile son bulur. Bu parametrelerin tahmini için gerek zaman alanında ve gerekse frekans alanında kullanılan bir çok teknik vardır. Juang ve Pappa [67] modal parametrelerin belirlenmesinde parazitlerin etkisini incelemiş ve bu parametrelerin daha kaliteli olarak elde edilebilmesi için TDA 'dan faydalanmışlardır. TDA 'nın benzer amaçla kullanımına [68-74] gibi çalışmalar örnek olarak gösterilebilir.

Yapısal değişim alanında kullanılan yöntemlerde ters matris işlemleri ile karşılaşmaktadır. Bilindiği gibi, çok karmaşık yapıların analizinde deneysel çalışmalara uygunluğu bakımından FTF 'larını kullanarak yapısal ayırma (substructuring-uncoupling) veya yapısal birleştirme (coupling) olarak bilinen tekniklerin kullanılması faydalı olmaktadır. Ancak yöntem gereği FTF matrisinin tersinin alınması sırasında mevcut hataların büyümesi nedeniyle bu tekniğin doğruluğu çoğu zaman azalmaktadır. To ve Ewins [75] özellikle yapısal değişimlerde karşılaşılan bu durumları ayrıntılarıyla açıklamaya çalışmışlardır. Bu gibi durumlarda TDA tekniğinin kullanılması oldukça avantajlar sağlamaktadır. [76-80] bu konuyla ilgili kaynaklardan bazılarıdır.

TDA tekniği yapısal dinamikte kuvvet belirleme probleminde [81], sonlu elemanlar modellerinin doğrulanmasında [82] ve test optimizasyonu [83] amacıyla da kullanılmıştır.

Pickrel [84] TDA 'dan faydalanarak modal testten elde edilen verilerin kalitesi üzerine bir inceleme yapmıştır. FTF matrisinin rankının bir başka deyişle modelin derecesinin belirlenmesinde ilgilenilen frekans aralığının, ölçüm sayısının ve sinyal-parazit oranının tekil değerler üzerindeki etkilerini incelemiştir. Ayrıca TDA 'dan elde edilebilen genelleştirilmiş tepki fonksiyonlarının-GTF (Principal Response Functions – PRF) kullanımını da açıklamıştır. Burada şunu belirtmek gerekir ki, FTF 'larına uygulanan TDA 'ile GTF 'larının elde edilmesinden sonraki adım, parazitlerin ayıklanmasıdır. Ancak Pickrel bu ayıklama işini yapmamıştır.

TDA tekniğinin parazit ayıklamadaki başarısı uygun rank değerinin yani sinyal-parazit sınırının uygun olarak belirlenmesine bağlıdır. Bu değer belirlenmesinde genellikle tekil değer grafiklerinden faydalanılmakla birlikte özellikle modelin derecesi bilinmediği zaman bu değer seçilmesi oldukça zor olmaktadır. [85-87] rank değerinin optimum seçimi için yapılmış çalışmalardandır.

1.8 Mevcut Durum ve Araştırma Konuları

FTF ölçümleri sırasında yapıya bağlanan transdüserlerin kütlesi ve mesnet etkileri incelenen yapının doğal frekans, mod biçimi ve sönüm oranı gibi dinamik özelliklerini bozmaktadır. Dolayısı ile ölçülen FTF 'ları da hatalı olmakta ve bu FTF 'larıyla yapılacak analiz sonuçlarının güvenilirliği azalmaktadır.

Bu tez kapsamında yapılan ve yukarıdaki bölümde özetlenen literatür araştırmasında mekanik etkilerden transdüser kütle etkisinin sürüş noktası FTF 'ları üzerinden kaldırılması probleminin Ewins [1] tarafından önerilen kütle kaldırma yöntemiyle çözüldüğü görülmüştür. Ancak kütle etkisinin özellikle transfer FTF 'ları üzerinden kaldırılması ile ilgili olarak, FTF 'larının kullanımı ile yapılan yapısal değişim tekniğine dayalı olarak geliştirilen bir kaç yöntem sunulmuş olmakla birlikte ([14, 17, 18]) halen etkili ve pratik bir yöntem ihtiyacı duyulmaktadır. Öte yandan mesnet etkileri bilinmekle beraber bu etkilerin kaldırılması ile ilgili olarak sadece Ashory [18] tarafından bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntemde bir tane askı yayının etkisini

çıkarmak için aynı FTF ölçümünün üç farklı mesnet konfigürasyonunda (farklı yay katsayısına sahip üç yayla asılarak) tekrarlanması yöntemin pratikte uygulanmasını zorlaştırmaktadır. Bu çalışmanın dışında tutulmakla beraber mekanik hatalardan olan yapı-sarsıcı etkileşimi üzerine çok sayıda çalışma olmasına rağmen test için strateji önerisinden ileriye gidilememiştir. Bu nedenlerle modal testte karşılaşılan mekanik hataların düzeltilebilmesi için halen etkili ve pratik yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır.

Diğer taraftan deneysel ölçümlerin tümünde var olan ve kaçınılması mümkün olmayan parazitler de FTF kalitesini olumsuz yönde etkilemekte ve bir çok uygulamada yöntemlerin başarı oranını azalttığı gibi tamamen etkisiz hale de getirebilmektedir. Literatürde parazitlerin ölçülen elektriksel sinyaller üzerinden kaldırılması için bir çok çalışma olmakla birlikte, modal testte, parazitli FTF 'ları için özel uygulamalara yönelik etkili analiz tekniklerinin geliştirilmesi dışında parazitleri FTF 'larından ayıklayarak tüm analizler için kaliteli veri elde edilmesine yönelik bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu nedenle FTF 'ları üzerindeki parazitlerin ayıklanması da oldukça ilgi çekici bir araştırma konusudur.

1.9 Tezin Amacı

Bu doktora tezi çalışmasındaki amaç, yukarıda bahsedildiği gibi gerek deney ortamından, gerekse kullanılan veri toplama cihazlarından kaynaklanan ve kaynağı tam olarak belirlenemeyen parazitler ile transdüserlerin kütle etkileri ve mesnetleme etkileri gibi sistematik hataları frekans tepki fonksiyonlarından uygun bir şekilde kaldırarak en aza indirmek için yöntemler geliştirmek ve bu sayede test verilerinin kalitesini iyileştirerek sonraki analizler için daha doğru ve güvenilir verilerin elde edilmesini sağlamaktır. Ayrıca geliştirilen yöntemlerin pratikte uygulanabilirliklerini araştırmaktır.

1.10 Tezin Kapsamı

Bu tez çalışmasında ele alınan problemler ve bu problemlerin çözümü için bu güne kadar yapılan çalışmalar bu bölümde incelenmiş ve yapılması gerekenler özetlenmeye çalışılmıştır. FTF 'ları üzerindeki mekanik etkilerin kaldırılması için

bilinen yöntemler ile bunların dezavantajları da genel hatları ile tezin 2. bölümünde özetlenmeye çalışılmıştır.

Tezin 3. bölümünde FTF 'ları üzerindeki sistematik hataların kaldırılması amacıyla geliştirilen genel bir değişim yöntemi sunulmaktadır. Geliştirilen bu yöntemin transdüser kütle etkilerinin ve mesnet etkilerinin FTF 'ları üzerinden kaldırılması amacıyla uygulanmasına ilişkin teori ve simülasyonlar deneysel uygulamalarla birlikte 4. ve 5. bölümlerde verilmektedir.

FTF 'ları üzerindeki parazitlerin ayıklanması için farklı iki yöntem geliştirilmiştir. Bunlardan bir grup ölçülmüş FTF 'nu kullanan yöntem 6. bölümde, sadece bir FTF 'nu hem frekans alanında hem de zaman alanında kullanan yöntem ise 7. bölümde verilmiştir. Sunulan yöntemlerin geçerliliği sayısal simülasyonlarla gösterildiği gibi çeşitli deneysel uygulamalarla da pratikteki performansları araştırılmıştır.

Son olarak elde edilen sonuçların genel bir değerlendirmesi ve ileride yapılabilecek çalışmalar için öneriler tezin 8. bölümünde sunulmuştur.

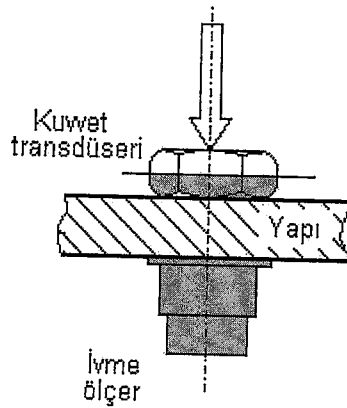
2 FTF 'LARINDAKİ SİSTEMATİK HATALARIN KALDIRILMASI İÇİN MEVCUT YÖNTEMLER

2.1 Giriş

Ölçülen FTF 'ları üzerindeki sistematik hatalar uzun zamandan beri bilinmektedir. Bu etkilerin kaldırılması araştırmacılar için önemli bir inceleme konusu olmuştur ve bunun için birkaç teknik geliştirilmiştir. Bu bölümde mekanik tesirlerin kaldırılması ile ilgili olarak bilinen teknikler genel hatları ile incelenecektir.

2.2 Sürüş Noktası FTF İçin Kütle Etkisini Kaldırma Yöntemi

Sürüş noktası FTF 'ndan transdüser kütle etkisinin kaldırılması problemi çok önceden çözülmüştür [1]. Şekil 2.1 'de bir yapı üzerine bağlanan kuvvet ve ivme transdüserlerinden oluşan sistemde boyalı bölge yapıya etki eden ilave kütleyi temsil etmektedir. Kuvvet transdüserinin yapısı dolayısı ile kütlelerinin sadece bir yarısı yapıya etki etmektedir.



Şekil 2.1 Bir yapı üzerinde aynı noktaya yerleştirilen transdüserler.

Bu ilave kütlenin (m_i), yapının titreşimi sırasında rijit davrandığı kabulü yapılırsa yapıya uygulanan gerçek kuvvet f^* ve transdüserin ölçtüğü kuvvet f arasında bu noktadaki \ddot{x} ivmesine bağlı olarak aşağıdaki gibi bir fark olduğu söylenebilir [1]:

$$f^* = f - m_i \ddot{x} \quad (2.1)$$

Fiziksel olarak, ölçülen kuvvetin bir miktarının bu ilave kütleyle hareket ettirmek için 'kullanıldığı' söylenebilir ve bu durumda yapıya uygulanan gerçek kuvvet; ölçülen kuvvet ile ilave kütlenin atalet kuvveti arasındaki farka eşit olur.

Bu büyüklükler frekans tepki fonksiyonu ile ifade edilmeye çalışılırsa, \ddot{x} ve f büyüklükleri ölçüldüğüne göre ivme tipindeki frekans tepki fonksiyonu $A = \ddot{x} / f$ ve gerçek FTF $A^* = \ddot{x} / f^*$ biçimindedir. Bu halde yapının gerçek FTF; ölçülen FTF ve ilave kütleyle bağlı olarak aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$A^* = \frac{A}{1 - m_i A} \quad (2.2)$$

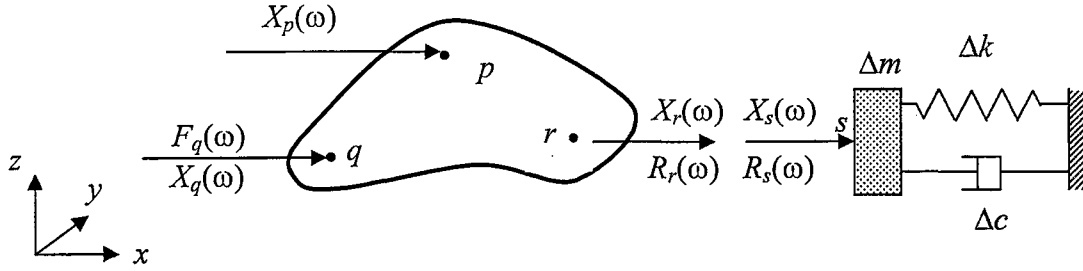
Bu ifade yardımıyla sürüş noktası FTF 'ndaki transdüser kütle etkisi kaldırılabilir ki bu işlem "kütle etkisini kaldırma" (mass cancellation) olarak bilinmektedir [1]. Ancak transfer FTF 'ları ölçülürken ivme ölçer başka bir noktaya taşındığı zaman ivme ölçerin ataleti ile kuvvet aynı noktada olmadığından (2.1) denklemi geçerliliğini yitirmektedir. Sadece kuvvet transdüserinin efektif kütle etkisi bu yöntemle kaldırılabilir, fakat bu yeterli değildir. Bunlara ilave olarak transdüserlerin ataletinin sadece tahrik kuvveti yönünde değil aynı zamanda açılmal yönlerle beraber toplam 6 yönde de etkidiği göz önüne alınmalıdır. Yine de bir çok durumda sadece kuvvet yönündeki etkisinin dikkate alınması yeterli olmaktadır [1].

2.3 Transfer FTF İçin Yöntemler

Daha önce de belirtildiği gibi kuvvet ve cevap transdüserinin farklı konumlarda olması durumunda ölçülen transfer FTF 'ları üzerindeki kütle etkilerinin kaldırılması oldukça zordur. Bu etkinin ölçülen tüm FTF 'larından kaldırılması için yapısal modifikasyon tekniklerinden faydalanılarak birkaç yöntem geliştirilmiştir. Her

yöntemin kendine göre avantaj ve dezavantajları vardır. Bu yöntemler aşağıda kısaca açıklanmaktadır.

2.3.1 Standart SMURF yöntemi



Şekil 2.2 Bir yapının kütle, yay ve sönüm elemanları ile yapısal modifikasyonu

SMURF, Structural Modification Using Frequency Responce Function kelimelerinin kısaltmasıdır ve Klosterman [14] tarafından FTF 'larının kullanımına dayalı olarak geliştirilen bir modifikasyon tekniğidir [13, 15]. Bu teknik ilk olarak Decker ve Witfeld [13] tarafından transdüser kütle etkisinin kaldırılması amacıyla kullanılmıştır. Şekil 2.2 'de görüldüğü gibi iki sistem r ve s noktalarında x doğrultusunda birbirlerine bağlanmaktadır. Sistemin lineer olduğu kabul edilerek, $F_q(\omega)$ ile gösterilen tahrik kuvveti etkisinde birlikte hareket eden sistemin hareketi ile tepki kuvvetleri $R_r(\omega)$ ve $R_s(\omega)$ arasında aşağıdaki bağıntılar yazılabilir:

$$X_p = \alpha_{pq} F_q + \alpha_{pr} R_r \quad (2.3a)$$

$$X_r = \alpha_{rq} F_q + \alpha_{rr} R_r \quad (2.3b)$$

$$X_s = \alpha_{ss} R_s \quad (2.3c)$$

Burada α iki nokta arasındaki dinamik esneklik tipindeki FTF 'dur. Şekildeki sistemde sönüm ve katılık ihmal edilirse ($\Delta c = \Delta k = 0$) bağlama konumundaki FTF,

$$\alpha_{ss} = -\frac{1}{\Delta m \omega^2} \quad (2.4)$$

biçiminde yazılabilir. Bağ şartları ise aşağıdaki gibidir:

$$X_r = X_s \quad (2.5a)$$

$$R_r + R_s = 0 \quad (2.5b)$$

Bilinmeyen bu iki bağ kuvvetinin ve deplasmanının elenmesi ile,

$$X_p = \left(\alpha_{pq} - \frac{\alpha_{rq}\alpha_{pr}}{\alpha_{ss} + \alpha_{rr}} \right) F_q = \alpha_{pq}^* F_q \quad (2.6)$$

eşitliği elde edilir. Burada α_{pq}^* iki sistemin birbirine bağlanması ile elde edilen yeni sistemin FTF 'dur.

Titreşim ölçümlerinde yapıya bağlanan transdüserler ilave sistem olarak düşünülebilir. Transdüser kablolarının sönüm ve esneklikleri ihmal edilip ($\Delta c=0$, $\Delta k=0$) ölçüm noktası ile bağlama noktalarının aynı olduğu ($r=p$) ve dinamik esneklik ile ivme tipindeki FTF arasında $A_{pq} = -\omega^2 \alpha_{pq}$ bağıntısı olduğu göz önüne alınırsa yeni sistem için ivme tipindeki FTF aşağıdaki gibi elde edilebilir [13]:

$$A_{pq}^*(\omega) = A_{pq}(\omega) - \frac{A_{pq}(\omega)A_{pp}(\omega)}{\frac{1}{\Delta m} + A_{pp}(\omega)} \quad (2.7)$$

Burada A_{pq} ölçülen FTF 'dur ve transdüser kütle etkisini içerir. A_{pq}^* ise transdüser kütle etkisi kaldırılmış FTF 'nu yani orijinal sistemin FTF 'nu ifade etmektedir.

(2.7) eşitliğinde görüldüğü gibi bir transfer FTF 'nu düzeltmek için transdüserin bağlandığı noktadaki noktasal FTF 'na da (A_{pp}) ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak sarsıcı kullanılarak yapılan testlerde, kuvveti başka bir konuma taşıyarak ilave ölçümler yapmak pratik olmayabilir. Bu olumsuzluktan kurtulmak için bazı öneriler ve teknikler sunulmuş ancak istenildiği kadar iyi sonuçlar elde edilememiştir. Bu yöntemle ilgili detaylı bilgiler referans [13] 'de bulunabilir.

2.3.2 Farklı Kütleli İki Transdüser İle Ölçüm Tekniği

SMURF üzerine kurulmuş diğer bir yöntem de Ashory [18] tarafından geliştirilen ve iki farklı ağırlıktaki transdüser ile ölçüm yapılmasına dayanan yöntemidir. Ölçümde

kullanılan ivme ölçerlerin kütlelerinin m_1 ve m_2 olduğu düşünülürse her biri için (2.7) denkleminde,

$$A_{pq}^*(\omega) = \frac{A_{pq}(\omega)}{1 + m_1 A_{pp}(\omega)} \quad (2.8a)$$

$$\bar{A}_{pq}^*(\omega) = \frac{A_{pq}(\omega)}{1 + m_2 A_{pp}(\omega)} \quad (2.8b)$$

elde edilebilir ve bu denklemler aşağıdaki gibi matris formunda yazılabilir,

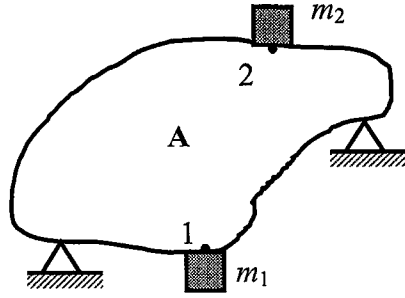
$$\begin{bmatrix} \frac{1}{A_{pq}^*} & -m_1 \\ \frac{1}{\bar{A}_{pq}^*} & -m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_{pq} \\ A_{pp} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix}. \quad (2.9)$$

Yukarıdaki lineer denklem çözülerek de A_{pq} ve A_{pp} bulunabilir. Böylece transfer FTF A_{pq} yanında transdüser konumundaki noktasal FTF A_{pp} 'de ölçülmeden hesapla elde edilebilmektedir. Burada m_1 ve m_2 kütleleri birbirine çok yakın seçildiğinde A_{pq}^* ve \bar{A}_{pq}^* de birbirine yakın olacaktır. Bu nedenle matrisin iki satırı birbirine oldukça bağımlı olacak ve matris tersinin alınmasında zorluk ortaya çıkacaktır. Özellikle verilerdeki parazitler bu yöntemi olumsuz olarak etkilemektedir. Ashory bu yöntemi askı yaylarının etkisinin kaldırılmasında da kullanmıştır.

2.3.3 İlave Kütle Kullanımına Dayalı Teknik

Transdüser kütlelerinin kaldırılması ile ilgili diğer bir yöntem de yapısal birleştirme/ayırma tekniğine bağlı olarak Maia ve diğ. [15, 17] tarafından geliştirilmiştir. Şekil 2.3 'de verilen örnek bir yapı üzerine 1 noktasında bir m_1 kütlesi bağlandıktan sonra yeni sistemin FTF 'ları,

$$\begin{bmatrix} A_{22}^{(1)} & A_{21}^{(1)} \\ A_{12}^{(1)} & A_{11}^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{22} & A_{21} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{Bmatrix} -A_{21} \\ 1/m_1 \end{Bmatrix} (A_{11} + 1/m_1)^{-1} \{A_{12} \quad A_{11}\} \quad (2.10)$$



Şekil 2.3 Transdüseri temsil eden iki kütlelerin bir yapıya bağlanması

biçiminde ifade edilmektedir. Bu teknikte sırasıyla;

- a) m_1 kütlesi bağlı iken 1 koordinatında sürüş noktası FTF $A_{11}^{(1)}$,
- b) m_1 ve m_2 kütleleri bağlı iken 1 ve 2 koordinatları ile ilgili transfer FTF $A_{12}^{(1,2)}$
ve
- c) Aynı şartlarda (m_1 ve m_2 kütleleri bağlı iken) 1 koordinatındaki sürüş noktası FTF $A_{11}^{(1,2)}$ tekrar ölçülür.

Bu ölçümler sırasıyla aşağıdaki denklemlerde kullanılarak transdüser kütle etkisi kaldırılabilir.

$$A_{11} = \frac{A_{11}^{(1)}}{1 - m_1 A_{11}^{(1)}} \quad (2.11a)$$

$$A_{12} = \frac{A_{11}^{(1)} - A_{11}^{(1,2)}}{m_2 (1 - m_1 A_{11}^{(1)}) A_{12}^{(1,2)}} \quad (2.11b)$$

$$A_{22} = \frac{A_{12}^{(1)} - A_{12}^{(1,2)}}{m_2 A_{12}^{(1,2)}} + \frac{m_1}{(1 - m_1 A_{11}^{(1)})} \left(\frac{A_{11}^{(1)} - A_{11}^{(1,2)}}{m_2 A_{12}^{(1,2)}} \right)^2 \quad (2.11c)$$

Bu denklemlerden (2.11c) yardımıyla ölçülmeyen diğer bir sürüş noktası FTF A_{22} 'de hesaplanabilmektedir.

2.4 Açısal FTF 'larının Etkisi

Bir yapı üzerine bağlanan transdüserin kütlesi yanında kütleli atalet momenti de yapıya etki etmektedir. Bu durumu açıklamak üzere test edilen yapının p ve q gibi iki noktası arasındaki ilişki göz önüne alınsın. Giriş noktasında bir F kuvveti ve bir M momenti bulunmaktadır. Çıkış noktası p 'de ise \ddot{x} ve $\ddot{\theta}$ gibi bir doğrusal ve bir açısal ivme vardır. Bunların hepsi vektörel büyüklüklerdir ve her birinin üç bileşeni vardır. Bu altı giriş ve çıkış arasında frekansa bağlı olarak deplasman/kuvvet, deplasman/moment, dönme/kuvvet ve dönme/moment olmak üzere 36 tane bağıntı yazılabilir [20]:

$$\begin{Bmatrix} \{\ddot{x}\} \\ \{\ddot{\theta}\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [A(\omega)] & [B(\omega)] \\ [C(\omega)] & [D(\omega)] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{F\} \\ \{M\} \end{Bmatrix} = [H(\omega)] \begin{Bmatrix} \{F\} \\ \{M\} \end{Bmatrix} \quad (2.12)$$

Köşegenine göre simetrik olan 6x6 boyutundaki FTF matrisi $[H(\omega)]$; $[A(\omega)]$, $[B(\omega)]$, $[C(\omega)]$ ve $[D(\omega)]$ olarak 3x3 boyutunda dört tane alt matristen oluşmaktadır. Buna göre FTF matrisinin %75 'ini dönme ile ilgili FTF 'ları oluşturmaktadır.

2.5 Sonuç ve Değerlendirme

Bu bölümde FTF 'ları üzerindeki kütle tesirlerinin kaldırılması için mevcut yöntemler verilmiştir. Sürüş noktası FTF için açısal yönlerdeki etkiler ihmal edilmesi şartı ile problem çözülmekle beraber transfer FTF 'ları için halen pratik bir yöntem ihtiyacı duyulmaktadır. Transfer FTF 'ları için geliştirilen ve yapısal modifikasyon tekniklerine dayanan yöntemlerin transdüser konumundaki noktasal FTF 'na ihtiyaç duyması önemli bir problemdir. Çekiç ile yapılacak bir testte çekici istenilen konuma taşımak kolay olduğundan bu FTF 'nu ölçmek de kolaydır. Ancak sarsıcı kullanılan bir testte FTF ölçümleri için sarsıcıyı başka konumlara taşımak pratik değildir. Bu olumsuzluğu ortadan kaldırmak için önerilen yaklaşık hesap formülü [13], ikinci bir transdüser ile FTF ölçümünün tekrarlanmasına dayalı teknik [18] ve yardımcı kütle kullanımına dayalı teknik [15, 17] verilerdeki parazitlerden olumsuz olarak oldukça etkilenmekte ve hatalı sonuçlar vermektedirler. Diğer taraftan bu tekniklerde transdüser kütlesinin sadece bir yöndeki etkisi dikkate alınmakla beraber tüm 6 yöndeki etkisinin de kaldırılması gerekmektedir.

3 SİSTEMATİK HATALARIN DÜZELTİLMESİ İÇİN YENİ BİR YÖNTEM

3.1 Giriş

Titreşim deneylerinde yapı üzerine bağlanan transdüserler, yapının mesnetlenmesi için kullanılan elastik elemanlar ve kuvvet uygulamak amacıyla kullanılan sarsıcılar orijinal yapıyı değiştirdiklerinden yapı üzerinde yapılan bir değişim (modification) olarak düşünülebilirler. Bu bakımdan bu etkilerin kaldırılmasında hem literatürde, hem de bu tezde yapısal değişim veya yapısal birleştirme tekniklerinden faydalanılmıştır. Yapısal değişim, bir yapının kütle ve katılık gibi fiziksel parametrelerinde yapılan değişiklikler sonucunda bu yapının dinamik özelliklerinin nasıl etkilendiğinin belirlenmesi olarak tanımlanabilir. Bu sayede bir yapının dinamik özelliklerinin yapılan değişikliklere karşı ne kadar duyarlı olduğu ve optimum tasarımın belirlenmesi kapsamlı ve zahmetli bir deneme-yanılma işlemine gerek kalmaksızın bulunabilmektedir. Literatürde yapısal değişim için gerek analitik gerekse deneysel verilere uygun pek çok farklı yöntem vardır. Öte yandan son zamanlarda bir yapı üzerinde yapılan küçük değişimlerde özellikle lineer olmayan yapıların incelenmesinde matris teorisinden bilinen Sherman-Morrison (SM) formülünden oldukça etkili bir şekilde faydalanılmaya başlanmıştır. Bu çalışmada da SM formülünün bu etkinliği göz önüne alınarak bu yaklaşım FTF 'ları üzerindeki mekanik etkilerin kaldırılması için uygulanmaya çalışılmıştır. Bu bölümde, önce SM formülü yapısal dinamik problemlerinin çözümü için uyarlanmıştır. Sonra, deneysel çalışmalarda FTF ölçümlerinin kısıtlı olduğu göz önüne alınarak sadece aktif koordinatlarla (değişim, kuvvet ve tepki koordinatları) ilgili FTF 'larını kullanan genel bir değişim formülü geliştirilmiştir. Daha sonra da bu formül kütle, yay ve sönüm değişimlerinde kullanılmak üzere düzenlenmiştir ki bunlar daha sonra mekanik etkilerin kaldırılmasında kullanılacaktır.

3.2 Sherman-Morrison (SM) Formülü : Teori

SM formülü, mevcut bir matriste yapılan bir değişiklik ile elde edilen yeni matrisin tersini ilk matrisin tersini ve değişim verilerini kullanarak doğrudan hesaplamaya yarayan bir formüldür. Tekil olmayan bir $[A]$ kare matrisi göz önüne alınırsa, bu matrisin herhangi bir elemanında $\Delta = \{u\} \{v\}^T$ gibi iki vektörün çarpımı şeklinde ifade edilebilen bir değişiklik yapılması sonucu elde edilen değiştirilmiş yeni $[A^*]$ matrisi,

$$[A^*] = [A] + \{u\} \{v\}^T \quad (3.1)$$

biçiminde yazılabilir. Eğer $[A]$ matrisinin tersi $[A]^{-1}$ önceden hesaplanmış veya elde mevcut ise değişiklikten sonra elde edilen yeni matrisin tersi $[A^*]^{-1}$,

$$[A^*]^{-1} = [A]^{-1} - \frac{([A]^{-1} \{u\})(\{v\}^T [A]^{-1})}{1 + \{v\}^T [A]^{-1} \{u\}} \quad (3.2)$$

biçiminde verilen Sherman-Morrison eşitliği ile herhangi bir ters alma işlemine ihtiyaç duyulmaksızın doğrudan ilk matrisin tersi ve yapılan değişiklikler kullanılarak hesaplanabilir [91]. Buradaki değişim matrisi $[\Delta]$ 'nın rankı birdir. Eğer $[\Delta]$ matrisi iki vektörün çarpımı biçiminde ifade edilemiyorsa $[\Delta]$ matrisi, aşağıdaki gibi p tane değişim matrisinin toplamı şeklinde yazılabilir:

$$[\Delta] = [\Delta_1] + [\Delta_2] + [\Delta_3] + \dots + [\Delta_p]. \quad (3.3)$$

Burada $[\Delta_i] = \{u_i\} \{v_i\}^T$ 'dir. Bu durumda her bir değişim için gerekli hesaplamalar arka arkaya yapılarak orijinal matris elde edilebilir.

Diğer taraftan $[\Delta]$, $[U][V]^T$ gibi iki kare matrisin çarpımı şeklinde yazılarak aşağıdaki gibi genelleştirilebilmektedir:

$$[A^*]^{-1} = [A]^{-1} - [A]^{-1}[U]([I] + [V]^T[A]^{-1}[U])[V]^T[A]^{-1}. \quad (3.4)$$

Elde edilen bu genel formül, Sherman-Morrison-Woodbury (SMW) eşitliği olarak bilinmektedir.

SM formülü istatistik, elektriksel ağ sistemleri (network), asimptotik analiz, optimizasyon, kısmi diferansiyel denklemler gibi bir çok alanda kullanılmıştır [92]. Yapısal dinamikte de SM formülü bir matrisin tersini güncellemekten ziyade örnek olarak tipik bir sonlu elemanlar modelinde yapılan değişiklikten sonra çözümü güncellemek (updating) amacıyla kullanılmıştır [93]. Ayrıca, yapısal dinamikte SM formülü lineer olmayan sistemlerin cevaplarının bulunmasında da kullanılmıştır [94]. Sanlitürk ve diğ. [95] türbin kanatlarında kullanılan sürtünmeli bir damperin modellenmesinde ve türbin kanatlarının akortsuzluğunun incelenmesinde [96] bu formülasyondan faydalanmışlardır. Ayrıca lineer ve lineer olmayan analizler için SMW formülüne dayanan hızlı teknikler de geliştirilmiştir [97, 98].

Bu tezde bunlardan farklı olarak bu formül FTF 'ları üzerindeki sistematik hataların kaldırılması için geliştirilecektir.

3.3 Yapısal Değişimde SM Formülünün Kullanılması

Bilindiği gibi N serbestlik dereceli mekanik bir sistemin hareket denklemleri matris formunda aşağıdaki gibi yazılmaktadır:

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{f(t)\}. \quad (3.5)$$

Burada $[M]$, $[C]$ ve $[K]$ sırasıyla $N \times N$ boyutunda kütle, sönüm ve katılık matrisleridir. $\{x(t)\}$ ve $\{f(t)\}$ sırasıyla t zamanıyla değişen N elemanlı genelleştirilmiş koordinatlar vektörü ve genelleştirilmiş kuvvetler vektörüdür. Özel olarak sistemin

$$\{f(t)\} = \{F\}e^{j\omega t} \quad (3.6)$$

biçiminde ω frekansındaki harmonik kuvvetlerle tahrik edildiği kabul edilirse,

$$\{x(t)\} = \{X\}e^{j\omega t} \quad (3.7)$$

biçiminde çözümlerinin bulunduğu düşünülebilir. (3.6) ve (3.7) 'deki $\{F\}$ ve $\{X\}$ zamandan bağımsız kompleks genlik vektörleridir. Bu durumda hareket denklemleri,

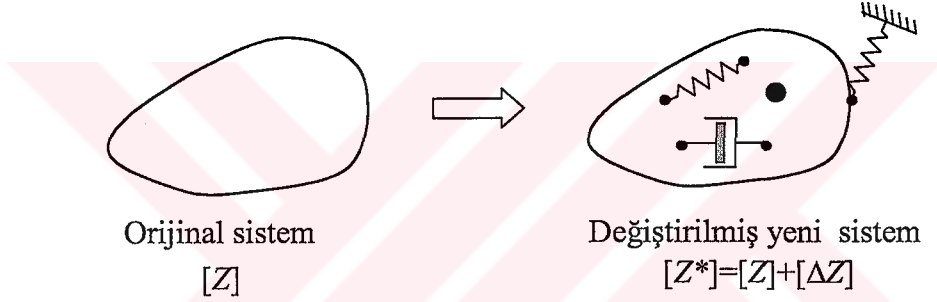
$$([K] - \omega^2[M] + j\omega[C])\{X\}e^{j\omega t} = \{F\}e^{j\omega t} \quad (3.8)$$

biçiminde olur. Buna göre lineer bir sistemin giriş ve çıkışı arasındaki ilişki,

$$[Z]\{X\} = \{F\} \quad (3.9)$$

biçiminde ifade edilebilir. Burada, dinamik direngenlik (dynamic stiffness) veya empedans matrisi olarak adlandırılan $[Z]$ matrisi aşağıdaki gibidir.

$$[Z] = [K] - \omega^2[M] + j\omega[C] \quad (3.10)$$



Şekil 3.1 İki sistemin birleşiminden oluşan yeni sistem

Dinamik direngenliği $[Z]$ ile ifade edilen lineer mekanik bir sisteme Şekil 3.1 'de görüldüğü gibi dinamik direngenliği $[\Delta Z]$ olan ikinci bir mekanik sistem eklendiğinde oluşan "değiştirilmiş" yeni sistemin dinamik direngenliği $[Z^*]$;

$$[Z^*] = [Z] + [\Delta Z] \quad (3.11)$$

olarak yazılabilir. Eğer değişim matrisi yani $[\Delta Z]$;

$$[\Delta Z] = [\Delta K] - \omega^2[\Delta M] + j\omega[\Delta C] = \{u\} \{v\}^T \quad (3.12)$$

biçiminde $\{u\}$ ve $\{v\}$ gibi uygun iki vektörün çarpımı olarak ifade edilebilirse ve dinamik direngenlik ile dinamik esneklik tipindeki FTF arasında,

$$[Z]^{-1} = [\alpha] \quad (3.13)$$

ilişkisi olduğu da hatırlanacak olursa bu halde (değiştirilmiş) birleşik sistemin dinamik esneklik matrisi $[\alpha^*]$ aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$[\alpha^*] = [Z^*]^{-1} = [\alpha] - \frac{([\alpha]\{u\})(\{v^T\}[\alpha])}{1 + \{v^T\}[\alpha]\{u\}}. \quad (3.14)$$

Elde edilen bu eşitlik iki sistemin birleşiminden oluşan yeni sistemin bir başka deyişle değiştirilmiş sistemin dinamik esnekliklerini, orijinal sistemin dinamik esnekliklerini ve yapılan değişimleri kullanarak hesaplayabilmektedir. Değişim matrisinin iki vektör çarpımı biçiminde ifade edilememesi durumunda (3.3) veya (3.4) denklemlerinden faydalanılabilir.

Denklem (3.14) 'de anlaşılacağı gibi dinamik esneklik matrisi $[\alpha]$ incelenen sistemin bütün FTF 'larından oluşmaktadır. Teorik uygulamalarda bu matrisin tümünü oluşturmak mümkün olmakla beraber deneysel uygulamalarda tüm FTF 'larını ölçmek pratik bir yaklaşım değildir ve genellikle FTF matrisinin sadece bir kolonunun veya bir satırının elemanları oluşturulur. FTF matrisinin bir satırını veya bir sütununu kullanarak yapılacak bir modal analizden sonra tüm FTF 'larını elde etmek mümkün olmakla birlikte ölçülmüş verilerdeki mevcut uyumsuzluklar ve sistematik hatalar böyle bir hesaptan sonra elde edilecek FTF 'larının doğruluğuna olan güveni azaltır. Ayrıca bu şekilde oluşturulan FTF 'ları için artık (residual) etkilerini dahil etmek zordur. Bu bakımdan (3.14) ifadesinin deneysel sistemler için kullanılmasının bazı zorlukları vardır. Bununla birlikte bu ifade daha yakından incelendiği zaman sadece değişimden etkilenen FTF 'ları için de yazılabileceği görülebilir. Buna göre FTF matrisinde düzenlemeden etkilenecek aktif ve pasif koordinatlar sırasıyla a ve p indisleri ile gösterilecek olursa değişim matrisi,

$$[\Delta Z] = \begin{Bmatrix} \{u_a\} \\ \{0\} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \{v_a\} \\ \{0\} \end{Bmatrix}^T \quad (3.15)$$

ve (3.14) ifadesi,

$$\begin{bmatrix} \alpha_{aa}^* \\ \alpha_{pa}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_{ap}^* \\ \alpha_{pp}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{aa} \\ \alpha_{pa} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_{ap} \\ \alpha_{pp} \end{bmatrix} - \frac{\left(\begin{bmatrix} \alpha_{aa} \\ \alpha_{pa} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_{ap} \\ \alpha_{pp} \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} \{u_a\} \\ \{0\} \end{Bmatrix} \left(\begin{Bmatrix} \{v_a\} \\ \{0\} \end{Bmatrix}^T \begin{bmatrix} \alpha_{aa} \\ \alpha_{pa} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_{ap} \\ \alpha_{pp} \end{bmatrix} \right)}{1 + \begin{Bmatrix} \{v_a\} \\ \{0\} \end{Bmatrix}^T \begin{bmatrix} \alpha_{aa} \\ \alpha_{pa} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_{ap} \\ \alpha_{pp} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u_a\} \\ \{0\} \end{Bmatrix}}$$

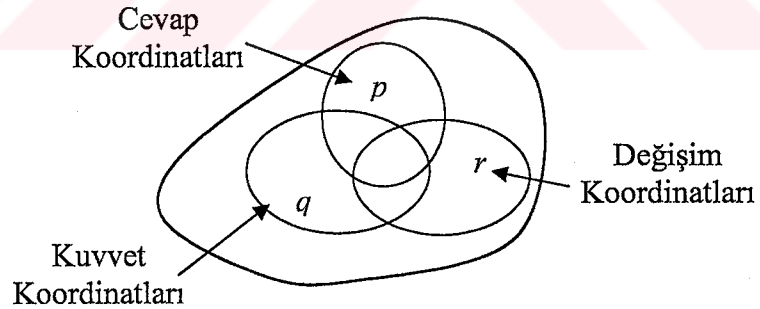
(3.16)

biçiminde aktif ve pasif olarak alt matrislere ayrılabilir. Buradan yeni sistemin FTF matrisi sadece aktif koordinatlara bağlı olarak aşağıdaki gibi yazılabilir [97]:

$$[\alpha_{aa}^*] = [\alpha_{aa}] - \frac{([\alpha_{aa}]\{u_a\})(\{v_a\}^T[\alpha_{aa}])}{1 + \{v_a\}^T[\alpha_{aa}]\{u_a\}}. \quad (3.17)$$

3.4 Genel Bir Değişim Formülünün Geliştirilmesi

Yukarıda bahsedilen aktif koordinatları daha açık bir şekilde yazmak suretiyle herhangi bir FTF üzerinde bir değişim yapmak için genel bir formül elde etmek mümkündür.



Şekil 3.2 Yapısal değişimde aktif koordinatlar.

Yapısal değişim için aktif koordinatlar; herhangi bir FTF için cevap koordinatı p , tahrik koordinatı q ve değişim koordinatı da r ile ifade edilsin (Şekil 3.2). Burada denklemlerin daha anlaşılır olması bakımından aktif koordinatlara uygun olarak herhangi bir FTF 'nu $\alpha_{pq}^{(r)}$ biçiminde yazmak uygun olacaktır. Buna göre (3.17) eşitliği açık olarak aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\begin{bmatrix} \alpha_{pp}^* & \alpha_{pq}^* & \alpha_{pr}^* \\ \alpha_{pq}^* & \alpha_{qq}^* & \alpha_{qr}^* \\ Sim. & & \alpha_{rr}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{pp}^{(r)} & \alpha_{pq}^{(r)} & \alpha_{pr}^{(r)} \\ & \alpha_{qq}^{(r)} & \alpha_{qr}^{(r)} \\ Sim. & & \alpha_{rr}^{(r)} \end{bmatrix} - \quad (3.18)$$

$$\frac{\left(\begin{bmatrix} \alpha_{pp}^{(r)} & \alpha_{pq}^{(r)} & \alpha_{pr}^{(r)} \\ & \alpha_{qq}^{(r)} & \alpha_{qr}^{(r)} \\ Sim. & & \alpha_{rr}^{(r)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ u_r \end{bmatrix} \right) \left(\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ v_r \end{bmatrix} \right)^T \begin{bmatrix} \alpha_{pp}^{(r)} & & Sim. \\ \alpha_{qp}^{(r)} & \alpha_{qq}^{(r)} & \\ \alpha_{rp}^{(r)} & \alpha_{rq}^{(r)} & \alpha_{rr}^{(r)} \end{bmatrix}}{1 + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ v_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_{pp}^{(r)} & & Sim. \\ \alpha_{qp}^{(r)} & \alpha_{qq}^{(r)} & \\ \alpha_{rp}^{(r)} & \alpha_{rq}^{(r)} & \alpha_{rr}^{(r)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ u_r \end{bmatrix}}$$

Basit matris işlemlerinden sonra,

$$\begin{bmatrix} \alpha_{pp}^* & \alpha_{pq}^* & \alpha_{pr}^* \\ \alpha_{pq}^* & \alpha_{qq}^* & \alpha_{qr}^* \\ Sim. & & \alpha_{rr}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{pp}^{(r)} & \alpha_{pq}^{(r)} & \alpha_{pr}^{(r)} \\ & \alpha_{qq}^{(r)} & \alpha_{qr}^{(r)} \\ Sim. & & \alpha_{rr}^{(r)} \end{bmatrix} - \frac{u_r v_r \begin{bmatrix} \alpha_{pr}^{(r)} \\ \alpha_{qr}^{(r)} \\ \alpha_{rr}^{(r)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_{rp}^{(r)} \\ \alpha_{rq}^{(r)} \\ \alpha_{rr}^{(r)} \end{bmatrix}^T}{1 + u_r v_r \alpha_{rr}^{(r)}} \quad (3.19)$$

ve buradan FTF matrisinde α_{pq}^* için,

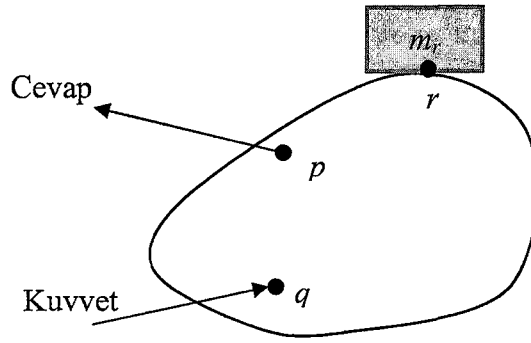
$$\alpha_{pq}^* = \frac{\alpha_{pq}^{(r)} + u_r v_r (\alpha_{rr}^{(r)} \alpha_{pq}^{(r)} - \alpha_{pr}^{(r)} \alpha_{rq}^{(r)})}{1 + u_r v_r \alpha_{rr}^{(r)}} \quad (3.20)$$

elde edilir. Elde edilen bu denklem, FTF ölçümü sırasında aktif koordinatlarla ilgili olarak orijinal sistemin FTF 'larını ve yapılacak değişimi kullanarak yeni sistemin FTF 'larını hesaplamaktadır. Burada şunu da belirtmek gerekir ki FTF frekansa bağlı bir fonksiyon olduğundan (3.20) denklemi her frekans değeri için uygulanır.

Yukarıdaki (3.19) ifadesinde FTF matrisinin her bir elemanı için farklı bir denklem elde edilmekle birlikte (3.20) denkleminde p ve q indislerinin farklı kombinasyonları için aynı denklemlere ulaşılabilir. Örneğin p yerine q yazmak suretiyle sürüş noktası FTF α_{qq}^* için değişim denklemi elde edilebilir.

Genel olarak bir yapı üzerinde yapılacak fiziksel değişimler kütle, yay veya sönüm olabilir. Denklem (3.20) ile verilen FTF değişim denklemleri, bu tip değişimlerin her biri için aşağıda elde edilmiştir.

3.4.1 Kütle Değişimi



şekil 3.3 Bir yapı üzerinde kütle değişimi.

Bir sistem üzerine r koordinatında bir m_r kütlesi eklendiğinde (3.12) denkleminde katılık ve sönüm sıfır alınarak değişim matrisi $[\Delta Z]$ aşağıdaki gibi yazılır:

$$[\Delta Z] = -\omega^2 [\Delta M] = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & & & \vdots \\ 0 & & -\omega^2 m_r & & 0 \\ \vdots & & & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

r . sütun
↓

r . satır ←

Bu matris iki vektörün çarpımı şeklinde aşağıdaki gibi kolayca ifade edilebilir:

$$[\Delta Z] = \begin{Bmatrix} 0 \\ \vdots \\ u_r \\ \vdots \\ 0 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ \vdots \\ v_r \\ \vdots \\ 0 \end{Bmatrix}^T = \begin{Bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ \vdots \\ -\omega^2 m_r \\ \vdots \\ 0 \end{Bmatrix}^T \quad (3.22)$$

Bu durumda,

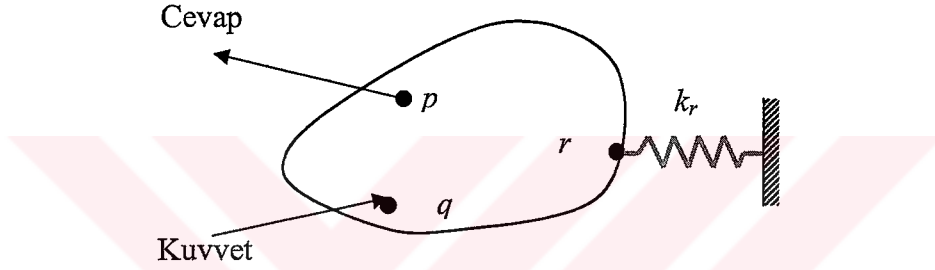
$$u_r=1 \quad \text{ve} \quad v_r=-\omega^2 m_r \quad (3.23)$$

yazılabilir. Bu değerler (3.20) denkleminde yerine yazıldığında,

$$\alpha_{pq}^* = \frac{\alpha_{pq}^{(r)} - \omega^2 m_r (\alpha_{rr}^{(r)} \alpha_{pq}^{(r)} - \alpha_{pr}^{(r)} \alpha_{rq}^{(r)})}{1 - \omega^2 m_r \alpha_{rr}^{(r)}} \quad (3.24)$$

elde edilir ki bu denklem bir sistem üzerinde r konumuna bir noktasal kütle eklenmesi durumunda yeni FTF 'nu vermektedir.

3.4.2 Yay (Katılık) Değişimi



Şekil 3.4 Bir yapı üzerinde yay değişimi.

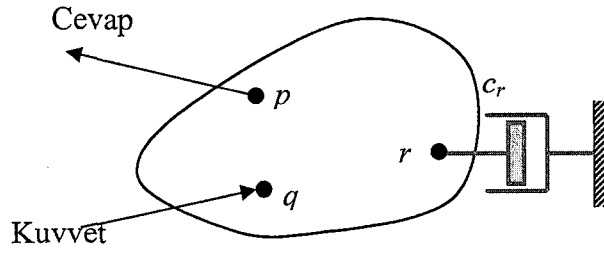
Burada özel olarak Şekil 3.4 'de görüldüğü gibi bir ucu sabit bir yayın r koordinatında sisteme eklenmesi durumunda FTF 'nda meydana gelen değişim hesaplanmaya çalışılacaktır. Bu durumda (3.12) ile verilen $[\Delta Z]$ değişim matrisi sadece ilgili konumdaki katılıktan oluşmaktadır ve kütle değişiminde olduğu gibi u_r ve v_r aşağıdaki gibi bulunur:

$$u_r=1 \quad \text{ve} \quad v_r=k_r \quad (3.25)$$

Değişimden sonraki sistemin FTF ise aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\alpha_{pq}^* = \frac{\alpha_{pq}^{(r)} + k_r (\alpha_{rr}^{(r)} \alpha_{pq}^{(r)} - \alpha_{pr}^{(r)} \alpha_{rq}^{(r)})}{1 + k_r \alpha_{rr}^{(r)}} \quad (3.26)$$

3.4.3 Sönüm Değişimi



Şekil 3.5 Bir yapı üzerinde sönüm değişimi.

Şekil 3.5 'deki gibi sisteme r konumunda bir viskoz sönüm eklenmesi durumunda değişim matrisi sadece sönümden oluşacaktır. Öncekilere benzer olarak,

$$u_r=1 \quad \text{ve} \quad v_r=j\omega c_r \quad (3.27)$$

ve yeni sistemin FTF da aşağıdaki gibi hesaplanabilecektir:

$$\alpha_{pq}^* = \frac{\alpha_{pq}^{(r)} + j\omega c_r (\alpha_{rr}^{(r)} \alpha_{pq}^{(r)} - \alpha_{pr}^{(r)} \alpha_{rq}^{(r)})}{1 + j\omega c_r \alpha_{rr}^{(r)}} \quad (3.28)$$

3.5 Sonuç ve Değerlendirme

SM formülü, yapılarda küçük değişimler yapılması durumunda yeni sistemin FTF 'larının hesaplanmasında oldukça faydalı olmaktadır. Bu bölümde sistematik hataların kaldırılması için bu formül kullanılarak sadece aktif koordinatları kapsayan genel bir değişim formülü geliştirilmiş ve kütle, katılık ve sönüm değişimleri için ayrı ayrı türetilmiştir. Aynı anda bir çok koordinatta (x, y, z, \dots) değişim yapmak gerektiğinde her bir değişim ardışık olarak sırasıyla uygulanabilmektedir. Bu bölümde geliştirilen değişim denklemleri sonraki bölümlerde FTF 'larındaki sistematik hataların kaldırılması amacıyla kullanılacaktır.

4 FTF 'LARINDAKİ TRANSDÜSER KÜTLE ETKİSİNİN KALDIRILMASI

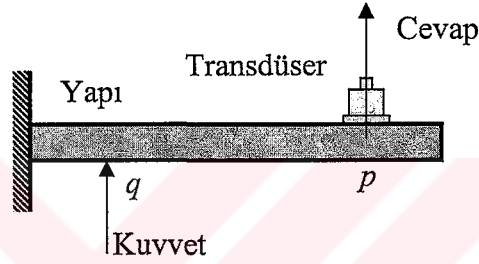
4.1 Giriş

FTF ölçümlerinde karşılaşılan sistematik hatalardan biri transdüserlerin kütle etkileridir. Kuvvet ve cevapları ölçmek için yapıya bağlanan transdüserler yapıya eklenen kütlelerdir ve bunlar yapı üzerindeki konumuna göre yapının dinamik özelliklerini etkileyerek rezonans frekanslarının gerçeğinden farklı olarak ölçülmesine neden olmaktadır. Transdüserlerin her bir ölçüm için yapı üzerinde gezdirilmesi halinde ölçülen her bir FTF üzerindeki etkisi farklı olmakta ve dolayısı ile FTF 'ları arasında uyumsuzluklar meydana gelmektedir. Ölçülen tüm FTF 'ları bir araya getirilerek analiz edildiği zaman veriler arasındaki bu uyumsuzluklar analiz sonuçlarının güvenilirliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu etkinin sürüş noktası FTF 'larında kaldırılması problemi çözülmüş olmakla beraber transfer FTF 'ları için halen etkili ve pratik bir yöntem ihtiyacı duyulmaktadır.

Transdüser kütlesi yapı üzerinde bir değişim (modification) oluşturduğuna göre yapı üzerinde transdüser kütlesi kadar negatif bir değişim yapılarak FTF 'ları üzerindeki transdüser kütle etkisini kaldırmak mümkün görülmektedir. Önceki bölümde Sherman-Morrison formülüne dayalı olarak geliştirilen değişim denklemi burada ölçülen herhangi bir FTF üzerindeki transdüser kütle yük etkisinin kaldırılması amacıyla geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntem, modal teste FTF ölçümü esnasında ivme ölçerler yapı üzerinde sabit bir konumda durması ve gezdirilmesi durumları için uygulanmaya çalışılmış ve kütle etkisinin kaldırılması için yeni bir test tekniği geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntemlerin geçerliliği sayısal simülasyonlarla gösterildiği gibi gerçek deneysel FTF 'larına da uygulanarak pratikteki uygulanabilirlikleri araştırılmıştır.

4.2 Teori

Şekil 4.1 'de örnek olarak verilen bir yapının p ve q noktaları ile ilgili FTF (A_{pq}) ölçülmek istenmektedir. Bu durumda q koordinatına bir kuvvet uygulanmış ve p koordinatındaki cevabı ölçmek için de kütlesi m olan bir transdüser yerleştirilmiştir. Bu durumda ölçülen FTF yapı ile beraber transdüser kütlesinden oluşan sistemin FTF 'dur. Sadece incelenen yapıya ait FTF 'nu elde edebilmek için önceki bölümde sistematik hataların düzeltilmesi için geliştirilen ve kütle değişimi için düzenlenen (3.24) denklemi burada transdüserin kütle etkisini kaldırmak için uyarlanacaktır.



Şekil 4.1 Modal testte FTF ölçümü

Bu ölçümde ivme ölçerin yerleştirildiği cevap ölçüm koordinatı p aynı zamanda değişim koordinatıdır. Buna göre önceden bölüm 3.4.1 'de kütle değişimi için elde edilen,

$$\alpha_{pq}^* = \frac{\alpha_{pq}^{(r)} - \omega^2 m_r (\alpha_{rr}^{(r)} \alpha_{pq}^{(r)} - \alpha_{pr}^{(r)} \alpha_{rq}^{(r)})}{1 - \omega^2 m_r \alpha_{rr}^{(r)}} \quad (4.1)$$

denkleminde ölçüm koordinatı ile değişim koordinatının aynı olduğu ($r=p$) ve transdüser etkisini çıkarmak için değişimin negatif olması gerektiği göz önüne alınırsa aşağıdaki sonuca ulaşmak mümkündür:

$$\alpha_{pq}^* = \frac{\alpha_{pq}^{(p)} + \omega^2 m (\alpha_{pp}^{(p)} \alpha_{pq}^{(p)} - \alpha_{pp}^{(p)} \alpha_{pq}^{(p)})}{1 + \omega^2 m \alpha_{pp}^{(p)}} \quad (4.2)$$

Bu denklem yeniden düzenlendiğinde daha basit formdaki

$$\alpha_{pq}^* = \frac{\alpha_{pq}^{(p)}}{1 + \omega^2 m \alpha_{pp}^{(p)}} \quad (4.3)$$

denklemleri elde edilir ki bu denklemler herhangi bir FTF 'ndan transdüser kütle etkisini çıkarmaktadır. Pratikte çoğu zaman ivme ölçerler kullanılarak ivme tipindeki FTF 'ları ölçülmektedir. Pratik uygulamalara daha uygun olması bakımından reseptans ile ivme tipindeki FTF arasında,

$$A = -\omega^2 \alpha \quad (4.4)$$

bağıntısı kullanılarak (4.3) denklemleri ivme tipindeki FTF cinsinden aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$A_{pq}^* = \frac{A_{pq}^{(p)}}{1 - m A_{pp}^{(p)}} \quad (4.5)$$

Burada $A_{pq}^{(p)}$ ölçülen, yani üzerinde kütle etkisi olan FTF ve A_{pq}^* kütle etkisi kaldırılmış FTF 'dur. $A_{pp}^{(p)}$ ise ivme ölçer konumundaki p koordinatına kuvvet uygulanarak ölçülen noktasal FTF 'dur. Görüldüğü gibi bu denklemlerde, herhangi bir FTF üzerindeki transdüser kütle etkisini kaldırmak için transdüserin bulunduğu koordinattaki noktasal FTF 'na da ihtiyaç duyulmaktadır. Yani, transfer FTF $A_{pq}^{(p)}$ ölçüldükten sonra kuvvet q koordinatından p koordinatına taşınarak noktasal FTF $A_{pp}^{(p)}$ 'nin de ölçülmesi gerekir. Ancak bazı durumlarda; örneğin, sarsıcı kullanılarak yapılan testlerde tahrik sisteminin bir noktadan başka bir noktaya taşınması genellikle pratik değildir.

Standart bir modal test uygulamasında genel olarak FTF matrisinin bir kolonunun veya bir satırının oluşturulması istenir. Burada, pratikte en çok kullanılan ve tahrik mekanizmasına bağlı olarak iki gruba ayrılabilen FTF ölçüm teknikleri üzerinde durulacaktır. Bunlardan biri 'çekiç testi' olarak adlandırılmaktadır. Bu tip bir testte ivme ölçer yapı üzerinde bir noktaya sabitlenir ve çekiç yapı üzerinde istenilen noktalara taşınarak kuvvet uygulanır ve böylece FTF matrisinin bir satırı oluşturulabilir. İkinci tip test ise 'sarsıcı testidir'. Bu tür ölçümlerde, sarsıcı yapı

üzerinde bir noktaya sabitlenir ve ivme ölçer yapı üzerinde çeşitli noktalara taşınarak ölçümler yapılır. Bu test yöntemi kullanılarak FTF matrisinin bir kolonu oluşturulabilmektedir. Darbe çekici kullanılarak yapılan testlerde transdüser tüm FTF ölçümlerinde sabit bir konumda kaldığından değişim koordinatı sabittir. Ancak sarsıcı kullanılarak yapılan testlerde transdüser ölçüm noktalarına taşındığından ölçülen her FTF için değişim koordinatı da değişmektedir. Her iki durumda ivme ölçerlerin etkisinin farklı olduğu açıktır ve (4.5) ile verilen denklemin her iki durum için ölçülen FTF 'larındaki transdüser kütesinin kaldırılmasında nasıl uygulanacağı aşağıda açıklanmaktadır.

4.3 İvme Ölçer Sabit Tutularak FTF 'larının Ölçülmesi (Çekiç Testi)

Genel olarak, darbe çekici kullanılarak yapılan testlerde, ivme ölçer incelenen yapı üzerinde bir konuma sabitlenir ve belirlenen koordinatların tümüne sırasıyla darbe çekici ile kuvvet uygulanarak FTF 'ları ölçülür. Bu ölçümlerden FTF matrisinin bir satırı oluşturulabilir. Bir başka deyişle, transdüser p koordinatında iken ölçülen FTF 'ları; $\{A_{p1} A_{p2} \dots A_{pq} \dots A_{pN}\}$, $q=1, 2, \dots, N$ olmaktadır. Görüldüğü gibi bu durumda cevap koordinatı (p) yani -değişim koordinatı- tüm ölçümlerde sabit kalmaktadır. Burada herhangi bir FTF 'undan transdüser kütle etkisini kaldırmak için geliştirilen ve aşağıda tekrar yazılan (4.5) denkleminin böyle bir testten ölçülen FTF 'larına nasıl uygulanacağı incelenecektir.

$$A_{pq}^* = \frac{A_{pq}^{(p)}}{1 - mA_{pp}^{(p)}} \quad (4.5)$$

Denklem (4.5) 'de görüldüğü gibi ivme ölçer p konumunda iken ölçülen transfer FTF 'undan ($A_{pq}^{(p)}$) kütlesi m olan ivme ölçerin kütle etkisini çıkarmak için ivme ölçerin bağlandığı koordinattaki noktasal FTF 'nu da ($A_{pp}^{(p)}$) ölçmek gerekir. Çekiç kullanılarak yapılan bir deneyde ivme ölçerin bulunduğu konumda noktasal FTF 'nu ölçmek genellikle hem mümkün hem de modal analiz için gereklidir. Bu durumda bu tip bir testte ölçülen tüm FTF 'ları üzerindeki kütle etkisi (4.5) denklemiyle kolaylıkla kaldırılabilir. Daha önce de belirtildiği gibi FTF frekansa bağlı bir fonksiyon olduğu için bu denklem bütün frekanslar için tek tek uygulanır.

Burada geliştirilen (4.5) denkleminde özel olarak kuvvet uygulama koordinatı ile cevap ölçüm koordinatının aynı olduğu göz önüne alınırsa (yani; $p=q$) ivme ölçer koordinatındaki noktasal FTF için düzeltme denklemi aşağıdaki gibi elde edilebilir:

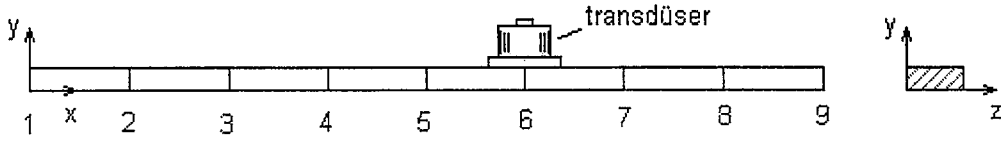
$$A_{pp}^* = \frac{A_{pp}^{(p)}}{1 - mA_{pp}^{(p)}} \quad (4.6)$$

Elde edilen bu denklemin [1] 'de verilen sürüş noktası FTF üzerinden standart kütle kaldırma formülü ile aynı olduğu görülmektedir.

Burada ivme ölçer sabit bir konumda tutulup darbe çekici gezdirilerek ölçülen FTF 'larından ivme ölçerin kütle etkisini kaldırmak ve böylece orijinal sisteme ait FTF 'larını elde etmek için bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemin geçerliliği ve gerçek deneysel verilerdeki performansı aşağıda incelenmiştir.

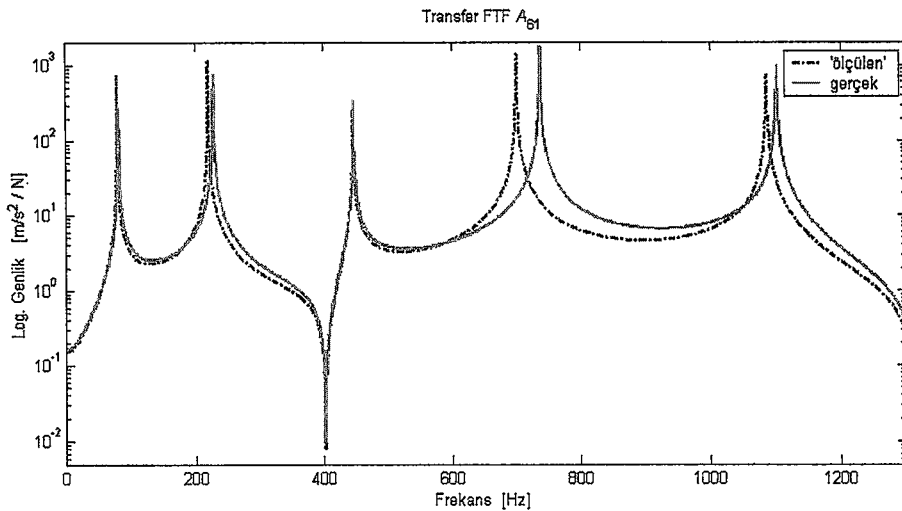
4.3.1 Sayısal Simülasyon

Geliştirilen yöntemin geçerliliği önce sayısal bir simülasyonla gösterilmeye çalışılmıştır. Bunun için Şekil 4.2 'de verilen serbest-serbest sınır koşullarına sahip dikdörtgen kesitli (boyutları $0.8 \times 0.001 \times 0.025 \text{ m}^3$, Elastisite modülü $E=207 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$, birim hacminin kütlesi $\rho=7800 \text{ kg/m}^3$ ve poisson oranı $\nu=0.3$) bir kiriş göz önüne alınmış ve sonlu elemanlar yöntemiyle modellenerek y yönündeki eğilme titreşimleri için denklem (1.3) yardımıyla FTF 'ları hesaplanmıştır. Hesaplanan bu FTF 'ları burada 'gerçek' olarak adlandırılmıştır. Daha sonra kiriş üzerinde 6 nolu konuma transdüser kütesini temsil etmek üzere y yönünde etki eden 100 g 'lık bir kütle eklenerek sistem tekrar modellenmiş ve FTF 'ları yeniden hesaplanmıştır. Üzerinde kütle etkisi olan bu FTF 'ları da 'ölçülen' FTF 'ları olarak adlandırılacaktır. Burada 'ölçülen' FTF 'larına yukarıda geliştirilen teknik ile 100 g 'lık negatif bir kütle değişimi yaptıktan sonra gerçek FTF 'larına ulaşılması amaçlanmaktadır.

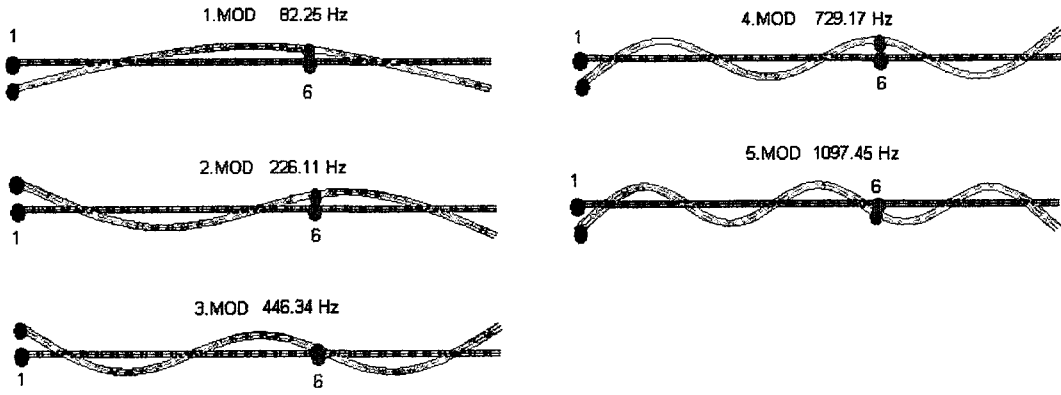


Şekil 4.2 Dikdörtgen kesitli serbest-serbest kiriş.

Böyle bir değişimden sonra elde edilen ve burada 'düzeltilen' olarak adlandırılan FTF 'larının gerçek değerleriyle uyuşması yöntemin geçerliliğini gösterecektir. Burada eklenen kütle için FTF 'larını net bir şekilde etkilemesini sağlamak için bu kütle yeterince büyük seçilmiştir. Çubuğun kütlesi 1.56 kg 'dır ve ilave kütle için yapının kütlesine oranı yaklaşık %6.5 civarındadır. Eklenen bu kütle için çubuğun FTF 'larında nasıl bir etki oluşturduğunu görebilmek için gerçek ve ölçülen transfer FTF A_{61} Şekil 4.3 'de karşılaştırılmıştır. Bu grafikte konum 6 'da y yönünde eklenen 100 g 'lık kütle için beklediği gibi kirişin doğal frekans değerlerini bir miktar düşürdüğü ve değişme miktarının da her bir modda farklı olduğu görülmektedir. Örneğin bu ilave kütle 1. ve 3. modları çok az etkilerken 4. modu oldukça çok etkilemektedir. Hatırlanacağı gibi transdüser bir modun düğüm noktasına koyulmuş ise bu moda etkisi olmayacak ancak bir modun en hareketli bir yerine koyulmuş ise bu moda olan etkisi en fazla olacaktır. Bunu göstermek amacıyla kirişin ilgilendirilen frekans aralığındaki mod biçimleri Şekil 4.4 'de verilmiştir. Burada görüldüğü gibi ilave kütle için koyulduğu 6. nod 3. modda bir düğüm noktasına oldukça yakındır. Dolayısıyla ilave kütle bu modu çok az etkilemektedir.

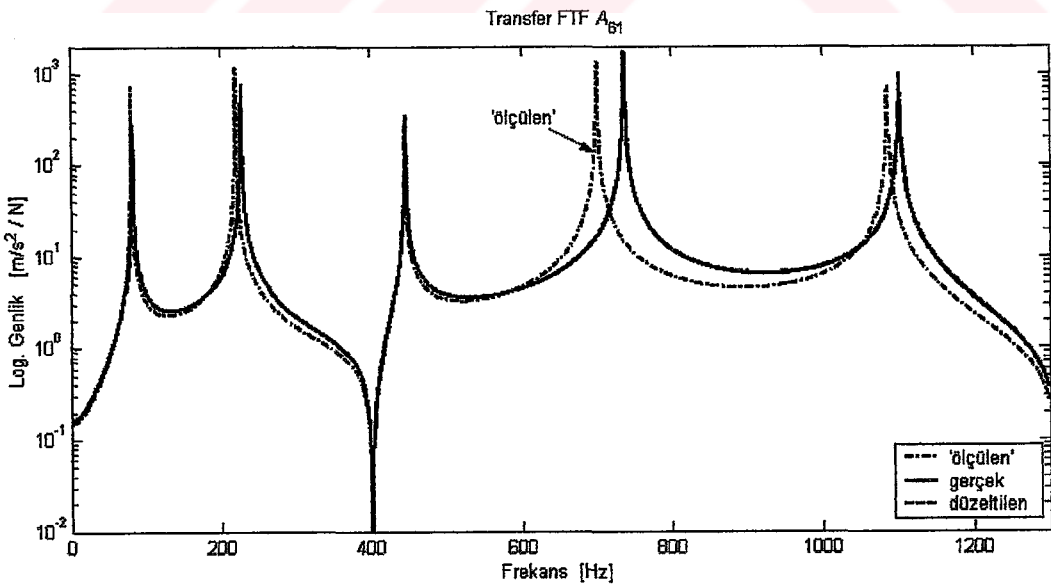


Şekil 4.3 İlave kütleli ('ölçülen') ve ilave kütleli ('gerçek') transfer FTF 'larının karşılaştırılması (A_{61}).

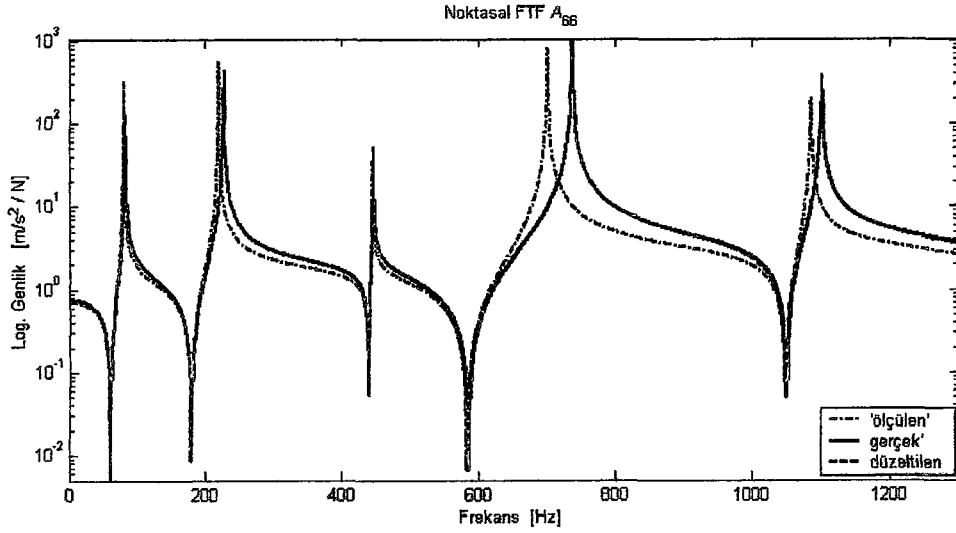


Şekil 4.4 Serbest-serbest kirişin y yönündeki eğilme titreşimlerinin mod biçimleri.

Ölçülen FTF $A_{61}^{(6)}$ üzerindeki transdüser etkisini kaldırmak için (4.5) denklemi her frekans değeri için uygulanmıştır. Transdüser kütle etkisi kaldırıldıktan sonra elde edilen ve burada 'düzeltilen' olarak adlandırılan transfer FTF A_{61} gerçek değeri ile Şekil 4.5 'de karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmada düzeltilen FTF 'nun gerçek değeri ile tamamen uyduğu ve her iki grafiğin üst üste çakıştığı görülmektedir. Bu sonuç geliştirilen yöntemin doğruluğunu açık ve net bir şekilde ortaya koymaktadır. Denklem (4.5) ile transfer FTF A_{61} üzerindeki kütle etkisini kaldırmak için ihtiyaç duyulan noktasal FTF $A_{66}^{(6)}$ üzerindeki kütle etkisi de denklem (4.6) yardımıyla kaldırılmış ve gerçek değeri ile Şekil 4.6 'da karşılaştırılmıştır.

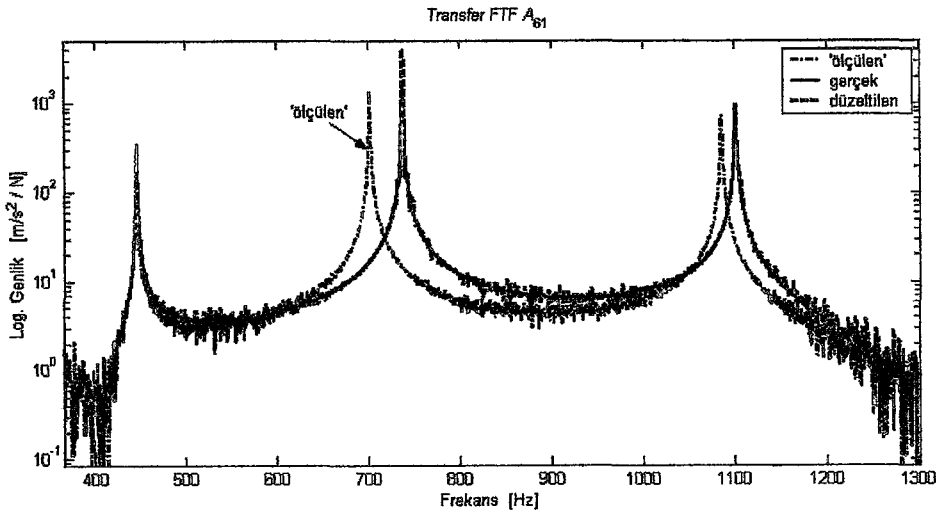


Şekil 4.5 'ölçülen', gerçek ve düzeltilen transfer FTF 'larının karşılaştırılması.

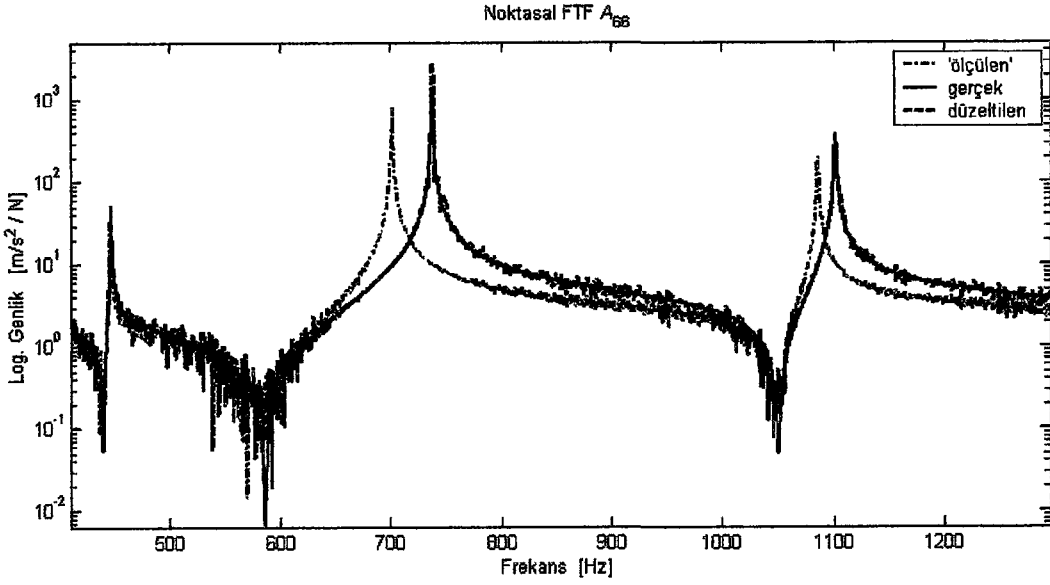


Şekil 4.6 'ölçülen', gerçek ve düzeltilen noktasal FTF 'larının karşılaştırılması (A_{66}).

Bu uygulamada kullanılan FTF 'ları sayısal simülasyonla elde edildiği için hiçbir parazit içermemektedirler. Oysa gerçek FTF 'larının kalitesinin parazitler nedeniyle olumsuz yönde etkilendiği bilinmektedir. Geliştirilen yöntemin FTF 'larında parazit olması durumundaki performansını incelemek amacıyla normal dağılımlı rastlantısal sayılardan üretilen eklemeli tip parazitler (additive white noise) %5 oranında 'ölçülen' FTF 'larına eklenmiş ve yöntem tekrar denenmiştir (parazit tipleri ve yapıları için Ek D 'ye bakınız). Şekil 4.7 ve 4.8 'de sırasıyla transfer ve noktasal FTF 'ları için elde edilen sonuçlar 4-6 modlar civarında verilmiştir. Burada FTF 'larında parazit olması durumunda da yöntemin başarılı olduğu açıkça görülmektedir. Ancak sonuçlar parazit etkilerini de yansıtmaktadır.



Şekil 4.7 Transfer FTF 'larının karşılaştırılması (%5 eklemeli parazit durumu).



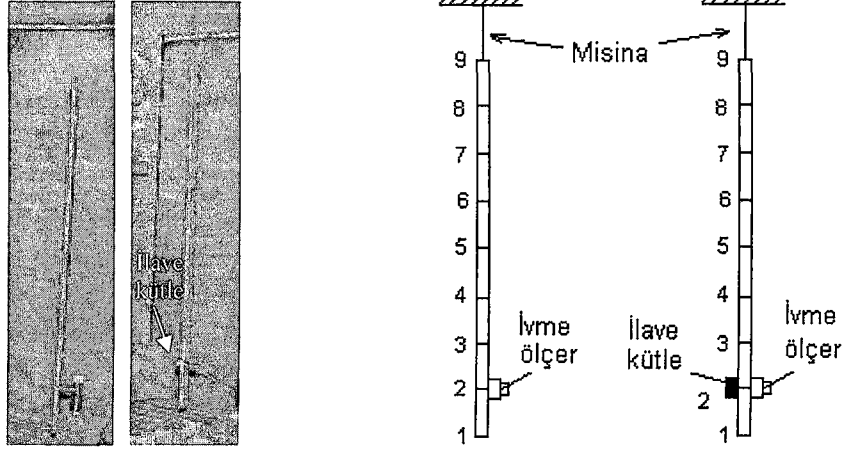
Şekil 4.8 Noktasal FTF 'larının karşılaştırılması (%5 eklemeli parazit durumu).

4.3.2 Deneysel uygulamalar

Ölçülmüş FTF 'larından transdüser kütle etkisini kaldırmak için geliştirilen yöntemin geçerliliği parazitli verileri de kapsayan nümerik simülasyonlarla önceki kısımda gösterilmiştir. Bundan sonraki adım bu yöntemin pratikte uygulanabilirliğinin araştırılmasıdır. Bu amaçla farklı dinamik özelliklere sahip sistemler üzerinde FTF ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümlerde Brüel&Kjaer (B&K) PULSE ölçüm sistemi, B&K 8202 tipi darbe çekici ve B&K 4384 tipi ivme ölçer kullanılmıştır. Yapılan bu deneysel uygulamalar aşağıda verilmiştir.

4.3.2.1 Uygulama 1: Dikdörtgen Kesitli Bir Kiriş

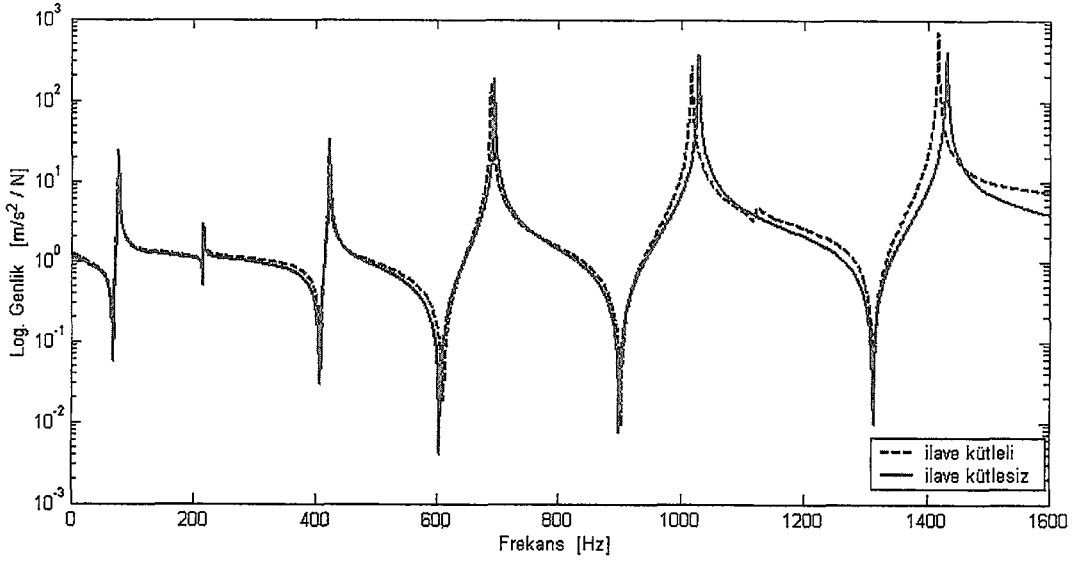
İlk uygulama Şekil 4.9 'da görülen ve boyutları $0.8 \times 0.025 \times 0.01 \text{ m}^3$ ve kütlesi 1.5 kg olan dikdörtgen kesitli çelik bir kiriş üzerinde yapılmıştır. Kiriş bir ucundan ekseni boyunca misina ile asılarak serbest sınır koşulları sağlanmaya çalışılmıştır. Ölçümlerde BK4384 tipi ivme ölçer kullanılmış ve kütle etkisini daha da belirginleştirmek için yapıya mıknatıslı tabla ile tutturulmuştur. İvme ölçerin mıknatıslı tabla ile beraber yapıya getirdiği ilave kütle 29.4 g 'dır. Bu durumda ilave kütle yapı kütlesine oranı yaklaşık olarak %2 'dir. Yapıya kuvvet uygulamak için BK8202 tip darbe çekici kullanılmıştır.



Şekil 4.9 Deneysel uygulama için ilave kütleli ve ilave kütsüz ölçüm sistemleri.

Bu uygulamada karşılaştırma yapabilmek için iki grup FTF ölçümü yapılmıştır. Birinci grup FTF 'ları; Şekil 4.9 'da görüldüğü gibi ivme ölçer yapı üzerinde 2 konumuna tutturulduktan sonra darbe çekici ile sırasıyla 1-9 noktalarına yüzeye dik yönde vurularak elde edilmiştir. İkinci grup FTF 'ları ise ivme ölçerin bulunduğu noktaya transdüser ile aynı kütlede 29.4 g 'lık bir kütle eklendikten sonra bir önceki ölçümler tekrarlanarak elde edilmiştir. Burada ilave kütleli olarak ölçülen ikinci grup FTF 'larındaki 29.4 g 'lık kütle etkisi kaldırıldığında elde edilen FTF 'larının ilave kütsüz olarak ölçülen birinci grup FTF 'ları ile aynı olması beklenir.

Bu ölçümde kullanılan ivme ölçerin incelenen kirişin dinamik yapısını etkileyip etkilemediğini anlamak için ilave kütle ivme ölçer ile aynı kütlede seçilmiştir. Transdüser ve bağlama elemanından oluşan 29.4 g 'lık ilave kütleli yapının FTF 'larını nasıl etkilediğini göstermek için birinci ve ikinci grup (ilave kütleli ve ilave kütsüz olarak ölçülen) FTF 'larından A_{22} Şekil 4.10 'da üst üste çizilerek verilmiştir. Burada 29.4 g 'lık ilave kütleli yapıyı etkilediği ve doğal frekansların ilave kütsüz olana göre daha düşük ölçüldüğü görülmektedir. Her iki durum için ölçülen doğal frekans değerleri Tablo 4.1 'de verilmiştir. İlave kütleli özellikle 3. moddan sonraki doğal frekansları önemli ölçüde etkilediği görülmektedir. En fazla etki %1.12 'lik hata ile 5. modda meydana gelirken 2. modda çok az bir hata meydana gelmektedir. Bu durum ivme ölçerin tutturulduğu noktanın bu mod için düğüm noktasına karşılık geldiğini gösterir.



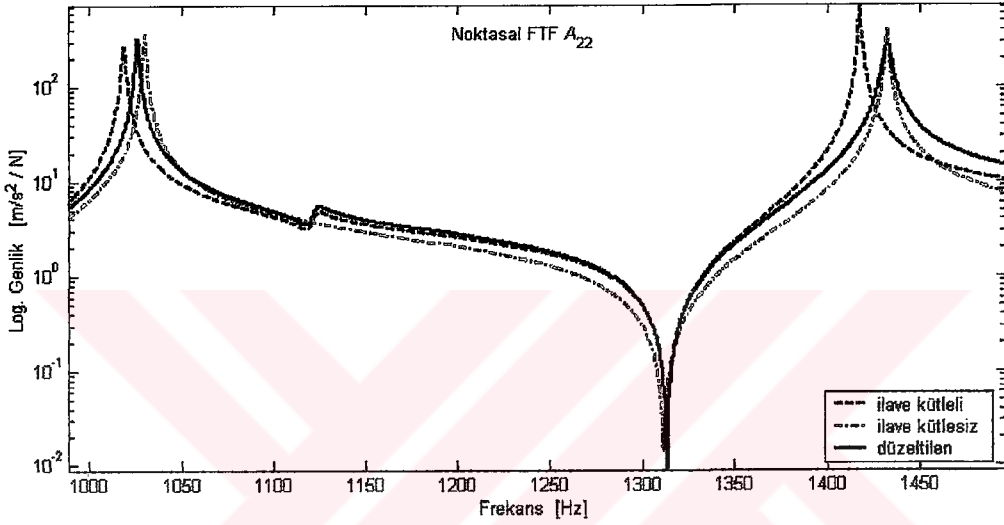
Şekil 4.10 İlave kütleli ve kütsüz olarak ölçülen noktasal FTF 'larının karşılaştırılması.

Tablo 4.1 İlave kütleli ve kütsüz olarak ölçülen doğal frekansların karşılaştırılması.

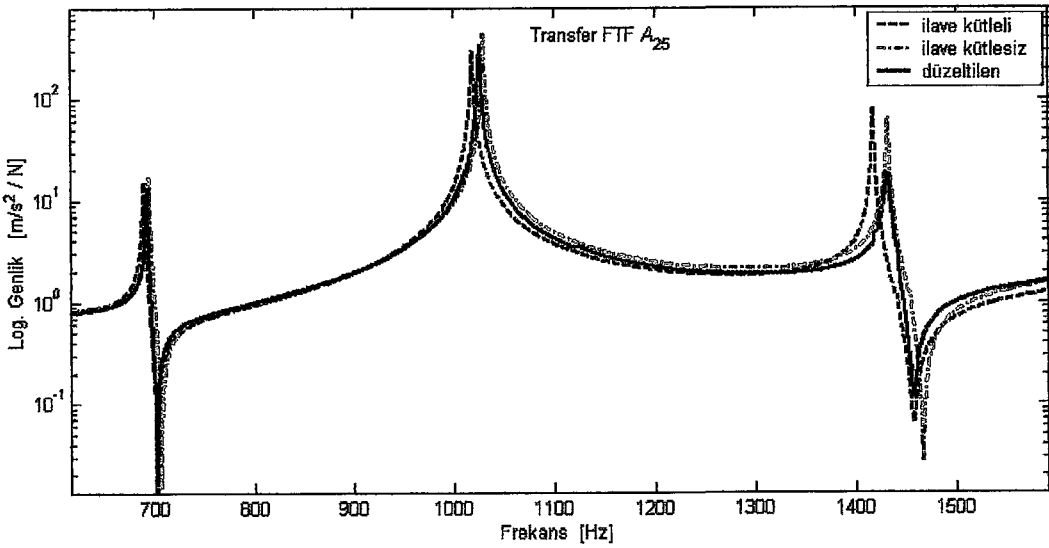
Mod	Doğal frekanslar (Hz)		Fark (Hz)	Hata %
	kütleli	kütsüz		
1	77.7	78.3	0.6	0.77
2	217	217.2	0.2	0.092
3	423	424	1	0.2
4	689.5	695	5.5	0.79
5	1018.5	1030	11.5	1.12
6	1418	1432	14	0.97

İlave kütleli olarak ölçülen FTF 'larına geliştirilen yöntem ile -29.4 g 'lık bir değişim uygulandıktan sonra elde edilen ve 'düzeltelen' olarak adlandırılan FTF 'larının ilave kütleli ve ilave kütsüz olarak ölçülen FTF 'larıyla karşılaştırmaları Şekil 4.11 'de noktasal FTF A_{22} için verilmiştir. Şekil 4.12 'de de asıl ilgi konusu olan transfer FTF A_{25} için karşılaştırmalar yapılmıştır. Yöntemin deneysel verilerdeki kütle etkisini kaldırmadaki başarısını daha açık görmek için bu karşılaştırmalar sadece kütle etkisinin önemli olduğu modlar civarında verilmiştir. 'Düzeltelen' doğal frekansların gerçek değerleriyle karşılaştırmaları da Tablo 4.2 'de verilmiştir. Hem grafik hem de tablodaki karşılaştırmalarda FTF 'larının önemli ölçüde düzeltildiği

açıkça görülmektedir. Bu karşılaştırmalarda özellikle en çok etkinin olduğu modlardan 6. modun doğal frekansının tamamen düzeltildiği görülmektedir. Buna karşın 5. modun frekansı gerçek değerine oldukça yaklaşmakta ve hata %1.12 'den %0.39 seviyesine düşmektedir ki bu %65 'lik bir düzelme sağlanmış demektir. Bunu daha yakından görebilmek için başka bir transfer FTF 'nun karşılaştırması sadece 5. mod civarı için Şekil 4.13 'de verilmiştir. Diğer modlar için de kütle etkisinin yaklaşık %50 oranında kaldırıldığı Tablo 4.2 'ye bakılarak görülebilir.



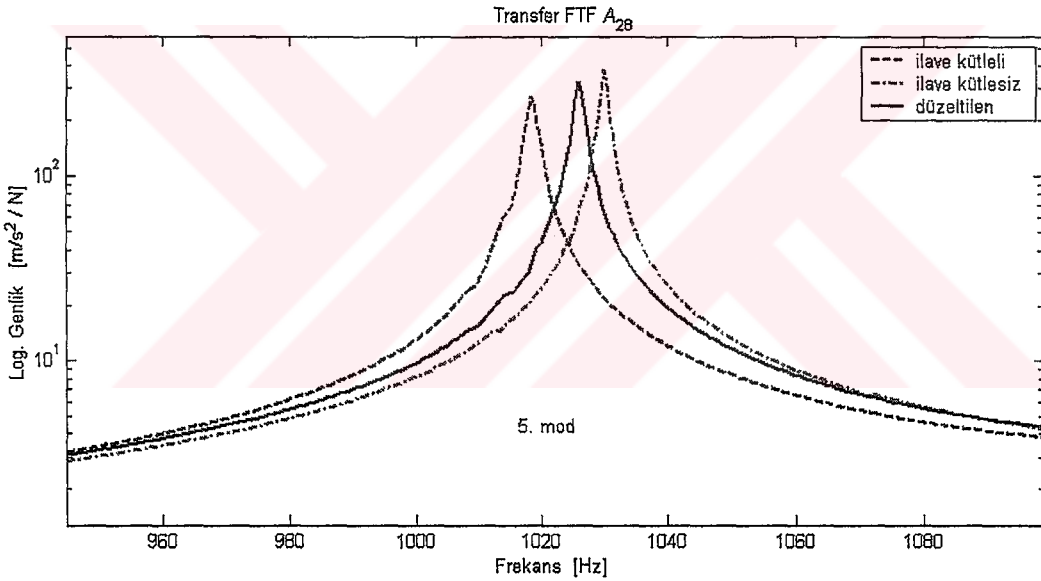
Şekil 4.11 Ölçülen ve düzeltilen noktasal FTF 'larının karşılaştırılması (A_{22}).



Şekil 4.12 Ölçülen ve düzeltilen transfer FTF 'larının karşılaştırılması (A_{25}).

Tablo 4.2 İlave kütesiz olarak ölçülen ve düzeltildikten sonra elde edilen doğal frekansların karşılaştırılması.

Mod	Doğal frekanslar (Hz)		Fark (Hz)	Hata %	Düzelme %
	kütlesiz	düzeltilen			
1	78.3	78	0.3	0.38	50,6
2	217.2	217.1	0.1	0.046	49
3	424	423.5	0.5	0.1	50
4	695	692.5	2.5	0.36	54
5	1030	1026	4	0.39	65
6	1432	1432	0	0	100



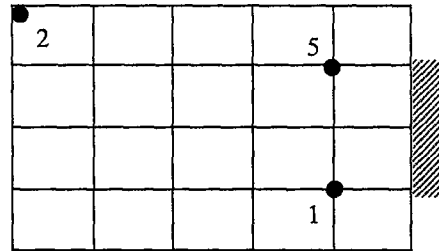
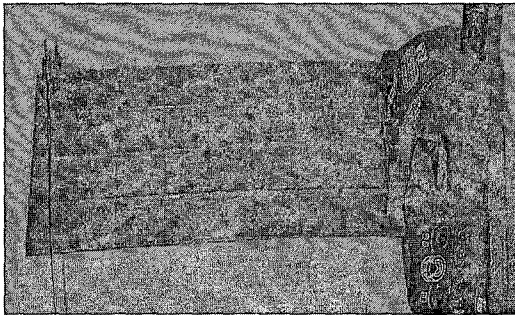
Şekil 4.13 Ölçülen ve düzeltilen transfer FTF 'larının karşılaştırılması (5. mod).

Burada kütle etkisi kaldırıldıktan sonra kalan hatalar üzerine bazı yorumlar yapılabilir. Şöyle ki; burada düzeltme yapılırken transdüser kütesinin sadece bir yöndeki (y) ataleti göz önüne alınmıştır. Oysa gerçekte transdüserin kütesel ataleti yanında kütesel atalet momentinin de etkisi vardır ve bunlar tüm koordinatlarda (x , y , z , θ_x , θ_y ve θ_z) etki etmektedir. Dolayısıyla tek bir koordinatta düzeltme yapılması transdüser kütle etkisini tümüyle kaldırmak için yeterli değildir. Diğer taraftan 6. modda %100 'lük düzelmenin olması bu modda transdüser etkisinin sadece bir yönde olduğunu göstermektedir. Bir başka deyişle bu moddaki titreşim genlikleri bu ölçüm

yönünde daha baskındır. Burada şunu da belirtmek gerekir ki geliştirilen yöntem, tüm yönlerdeki etkilerin kaldırılmasına uygun olmakla beraber, özellikle yapıya pratik olarak moment uygulamanın zor olması ve açısal yönlerdeki cevapların ölçülmesindeki zorluklar bu etkilerin tamamının kaldırılmasını zorlaştırmaktadır. Eğer 6 yöndeki cevaplar ölçülebilirse (4.1) 'denklemindeki m_r kütlesi yerine ilgili koordinattaki kütle (m_x, m_y, m_z) veya kütleli atalet momentleri (J_x, J_y, J_z) ve ilgili FTF 'ları yazılarak tüm kütle etkileri kaldırılabilir. Bu şekilde örnek olarak, önce x yönündeki kütle etkisi kaldırılarak elde edilen FTF 'undan da y yönündeki kütle etkisi kaldırılırsa her iki etki ardışık olarak kaldırılmış olur. Benzer şekilde kalan yönlerdeki kütle etkileri ardışık olarak kaldırılabilir.

4.3.2.2 Uygulama 2: Ankastre Plak

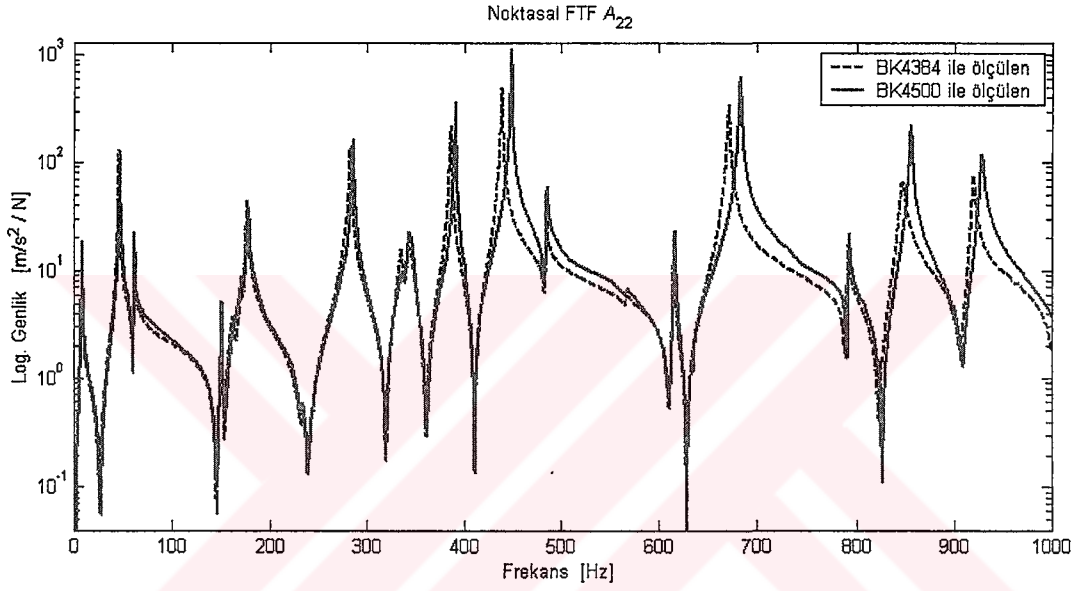
İkinci bir uygulama olarak Şekil 4.14 'de verilen 2.5 kg kütleli bir plak seçilmiştir. Bu plağın bir kenarı mengeneyle bağlanmıştır. Bu uygulamada öncekinden farklı olarak, kütleleri farklı iki ivme ölçer kullanılarak iki grup ölçüm yapılmıştır. Bunlardan biri BK4384 tipi ivme ölçer olup kütlesi, mıknatıslı tablası ile beraber, 29.4 g 'dır. Diğeri ise kütlesi 3.55 g olan BK4500 tipi ivme ölçerdir ve yapıya balmumu ile tutturulmuştur. Burada BK4384 ile ölçülen FTF 'ları 'ölçülen' ve BK4500 ile ölçülen FTF 'ları da 'gerçek' FTF 'larını temsil etmektedir. Buradaki amaç ise BK4384 ile ölçülen FTF 'ları üzerinden iki transdüser arasındaki kütle farkı kadar ($29.4 - 3.55 = 25.85$ g) negatif bir değişim yaparak BK4500 ile ölçülen FTF 'larını elde etmektir.



Şekil 4.14 Bir kenarı ankastre, diğer kenarları serbest bir plak ($50 \times 21 \times 0.3$ cm³)

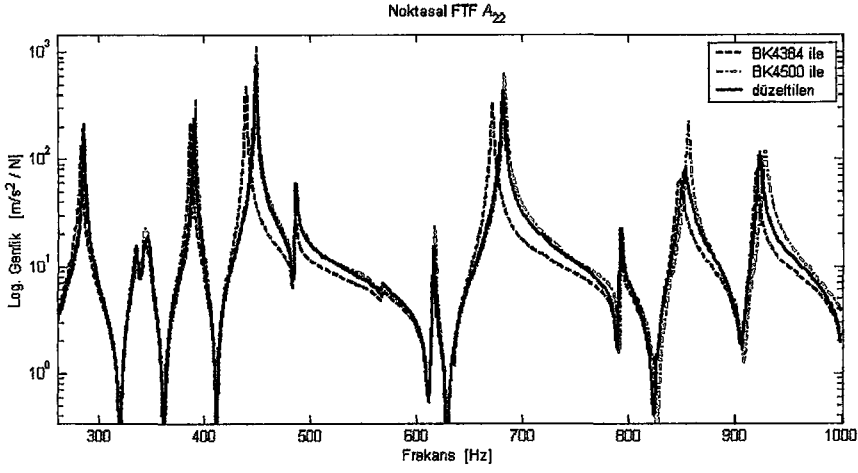
Prensip olarak transdüser yapı üzerinde en hareketli olan noktalara yerleştirilirse yapının dinamik özelliklerini en fazla etkiler. Bu bakımdan bu uygulamada ivme ölçer yapı üzerinde en fazla hareketin beklendiği köşelerden 2 ile numaralandırılan

köşeye sabitlenmiştir. Not olarak belirtilirse, bu tür noktalarda da kuvvet uygulamak oldukça zordur. Çekiç kullanıldığında çift vuruş yapma ihtimali oldukça yüksektir. Bu bakımdan bu tür ölçümlerde oldukça dikkatli olmak gerekir. Şekil 4.15 'de her iki ivme ölçer ile ölçülen noktasal FTF A_{22} verilmiştir. Böyle bir sistemin önceki uygulamadaki serbest çubuğa göre daha yüksek bir modal yoğunluğa, yani dar bir frekans aralığında daha fazla moda sahip olduğu, görülmektedir. Yapısal dinamikte yüksek modal yoğunluklu yapıların analizi diğerlerine göre daha zordur. Yöntemin bu uygulamada başarılı sonuç vermesi güvenilirliği arttıracaktır.

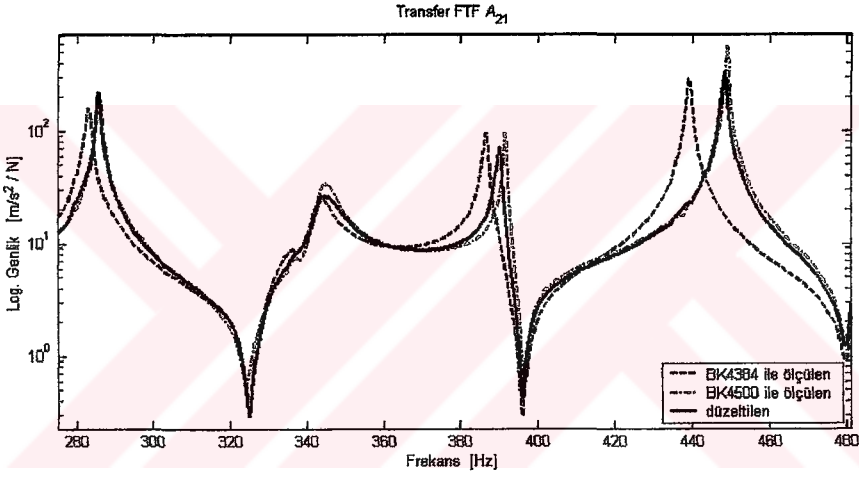


Şekil 4.15 Farklı iki ağırlıktaki transdüser ile ölçülen noktasal FTF 'larının karşılaştırılması (A_{22}).

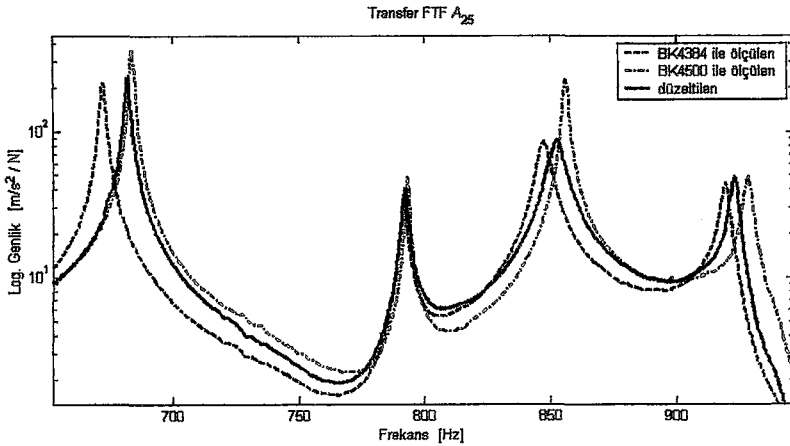
Burada 25.85 g 'lık ilave kütle için yapının kütle oranı %1 kadar olmasına rağmen yapının doğal frekans ve mod biçimlerini etkilediği Şekil 4.15 'de görülmektedir. Yöntem uygulanarak düzeltme yapıldıktan sonra elde edilen noktasal FTF A_{22} , her iki ivme ölçer ile ölçülen FTF 'larıyla Şekil 4.16 'da karşılaştırılmıştır. Transfer FTF 'larından A_{21} ve A_{25} ise sırasıyla Şekil 4.17 'de ve Şekil 4.18 'de karşılaştırılmıştır. Bu grafiklerde yöntemin etkisini daha iyi görebilmek için grafikler belirli frekans aralıkları için verilmiştir. Bu uygulamada da bazı modlar için (örnek olarak Şekil 4.17 'de 390 Hz civarındaki mod) diğer yönlerdeki etkilerden dolayı tam bir uyuma sağlanamamakla birlikte oldukça iyi sonuçlar elde edildiği açıkça görülmektedir.



Şekil 4.16 Farklı iki ağırlıktaki transdüser ile ölçülen ve düzeltilen noktasal FTF 'larının karşılaştırılması (A_{22}).



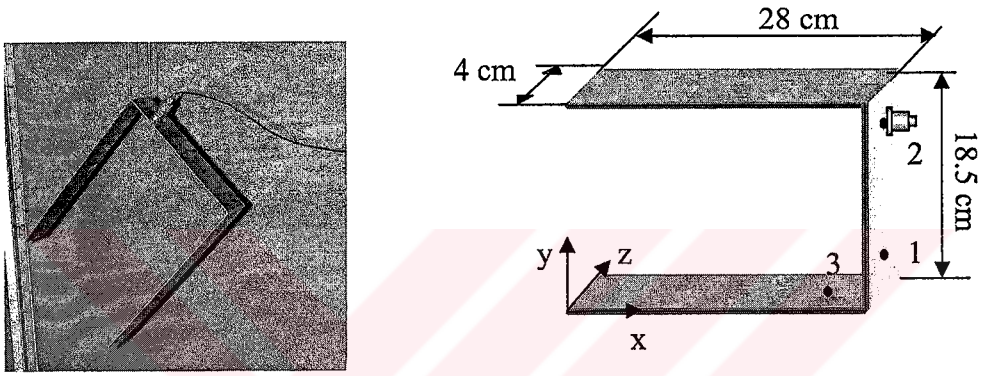
Şekil 4.17 Farklı iki ağırlıktaki transdüser ile ölçülen ve düzeltilen transfer FTF 'larının karşılaştırılması (A_{21}).



Şekil 4.18 Farklı iki ağırlıktaki transdüser ile ölçülen ve düzeltilen transfer FTF 'larının karşılaştırılması (A_{25}).

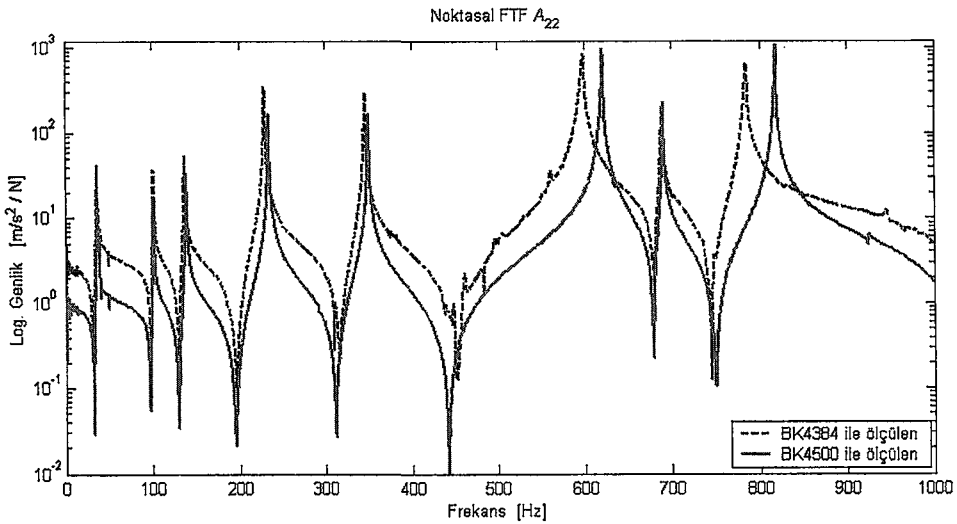
4.3.2.3 Uygulama 3: U-Çerçeve

Transdüser kütle etkisinin kaldırılmasına yönelik başka bir uygulama da Şekil 4.19 'da görülen 480 g kütleli bir U-çerçeve biçimindeki bir yapı üzerinde yapılmıştır. Bu yapı diğer uygulamadakilere göre çok daha hafiftir. Serbest sınır koşullarını sağlamak üzere bu yapı misina ile asılmıştır. Bu uygulamada da bir önceki uygulamada olduğu gibi BK4384 ve BK4500 tipi ivme ölçerler kullanılmıştır ve ilave kütle yapı kütlesine oranı yaklaşık %5.4 'dür. Burada da yine iki grup FTF ölçümü yapılmış ve BK4384 ile ölçülenler 'ölçülen', BK4500 ile ölçülenler de 'gerçek' olarak adlandırılmıştır.



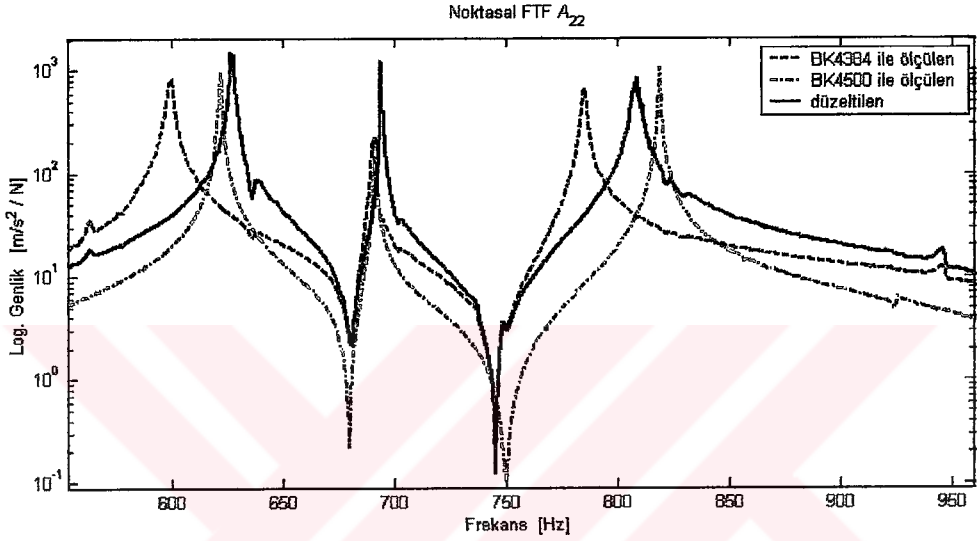
Şekil 4.19 Test edilen yapı (U-çerçeve, sac kalınlığı 2 mm).

Şekil 4.20 'de her iki ivme ölçer ile ölçülen noktasal FTF A_{22} verilmiştir. Böyle bir sistemde doğal frekansların yanında mod biçimlerinin de önemli ölçüde etkilendiği görülmektedir.

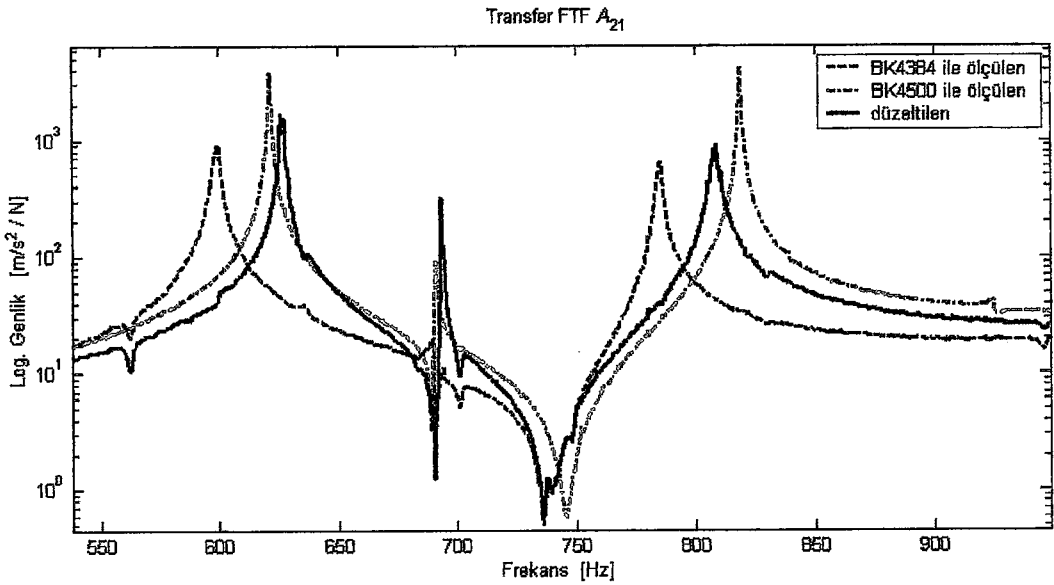


Şekil 4.20 Farklı kütleli iki transdüser ile ölçülen noktasal FTF 'larının karşılaştırılması.

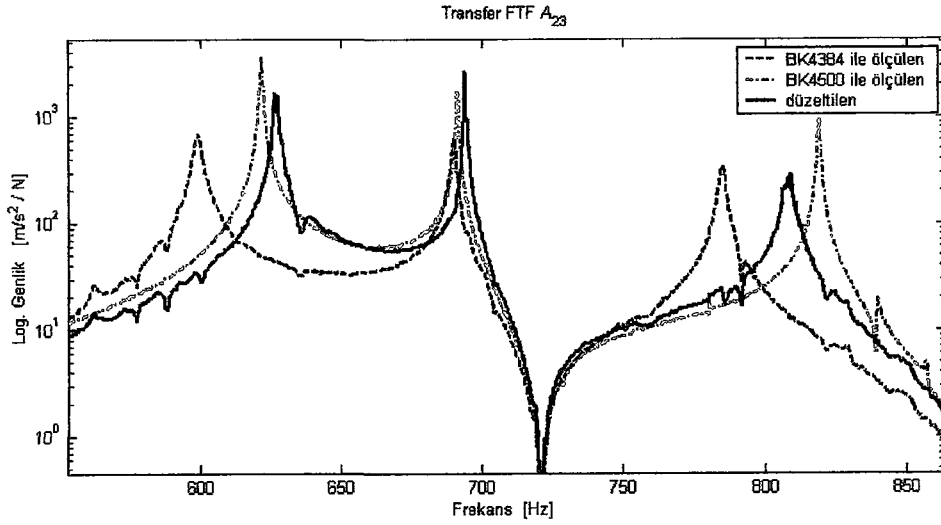
FTF 'ları üzerindeki kütle etkisi kaldırıldıktan sonra elde edilen noktasal FTF A_{22} ölçülen ve gerçek değerleri ile Şekil 4.21 'de karşılaştırılmıştır. İki farklı transfer FTF A_{21} ve A_{23} için elde edilen sonuçlar da sırasıyla Şekil 4.22 ve 4.23 'de karşılaştırılmıştır. Tüm grafikler en çok etkinin olduğu 550-950 Hz frekans aralığında verilmiştir. Bu uygulamada da yine diğer yönlerdeki etkilerden dolayı bazı modlarda tam bir uyuşma olmamakla birlikte gerçek sonuçlara önemli ölçüde yaklaşıldığı açıkça görülmektedir.



Şekil 4.21 Farklı kütleli iki transdüser ile ölçülen ve düzeltilen noktasal FTF 'larının karşılaştırılması (550-950 Hz frekans aralığı).



Şekil 4.22 Farklı kütleli iki transdüser ile ölçülen ve düzeltilen transfer FTF 'larının karşılaştırılması (550-950 Hz frekans aralığı).

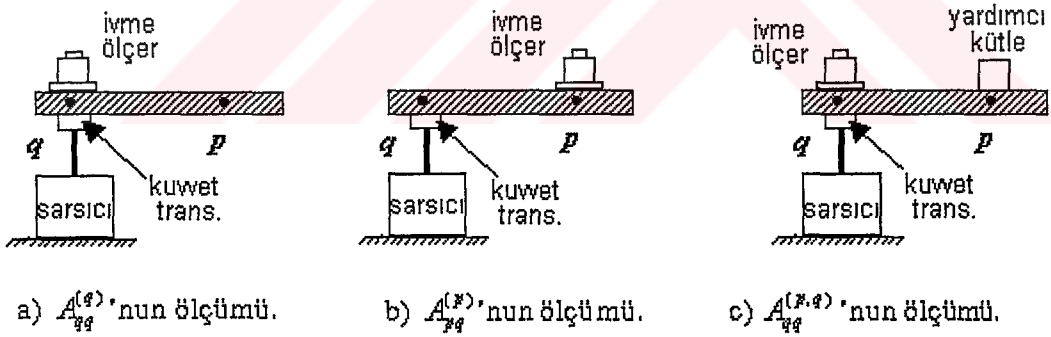


Şekil 4.23 Farklı iki ağırlıktaki transdüser ile ölçülen ve düzeltilen transfer FTF 'larının karşılaştırılması (550-900 Hz frekans aralığı).

4.4 İvme Ölçer Gezdirilerek FTF 'larının Ölçülmesi (Sarsıcı İle Yapılan Deneyler)

FTF ölçümlerinde yapının sarsıcı ile tahrik edilmesi çok kullanılan ölçüm yöntemlerinden biridir. Sadece bir sarsıcı kullanılarak yapılan testlerde yapıya sabit bir koordinattan kuvvet uygulanır ve ivme ölçer yapı üzerinde cevap koordinatlarına taşınarak FTF ölçümleri gerçekleştirilir. Bu ölçümlerden FTF matrisinin bir kolonu oluşturulabilir (örneğin herhangi bir q noktasından kuvvet uygulanarak ölçülen FTF 'ları; $\{A_{1q}(\omega) A_{2q}(\omega) \dots A_{pq}(\omega) \dots A_{Nq}(\omega)\}^T$, $p=1\dots N$, $q=\text{sabit}$). Sarsıcının yapı üzerinde q koordinatına bağlandığı düşünülürse transfer FTF 'larından, örnek olarak, A_{2q} 'yu ölçmek için ivme ölçer 2 koordinatına, A_{3q} 'yu ölçmek için de 3 koordinatına taşınır ve diğer FTF 'larının ölçümü de ivme ölçer ilgili koordinata taşınarak gerçekleştirilir. Çekiç testinden farklı olarak bu tip ölçümlerde ivme ölçer her bir FTF için yapı üzerinde başka bir noktaya taşındığından her defasında değişim koordinatı ve sonuç olarak test edilen yapı değişmektedir. Herhangi bir transfer FTF üzerindeki ivme ölçerin kütle etkisini kaldırmak için geliştirilen (4.5) denkleminde ivme ölçerin bulunduğu koordinattaki noktasal FTF 'nun da ölçülmesi gerekmektedir. Ancak bu tip bir ölçümde sarsıcıyı bağlı bulunduğu yerden ivme ölçerin bulunduğu noktaya taşımak pratikte oldukça zor ve çoğunlukla mümkün değildir.

Burada şunu belirtmek gerekir ki bu olumsuz durum sadece burada geliştirilen yöntemde değil 2. bölümde bahsedildiği gibi başka araştırmacılar tarafından geliştirilen yöntemlerde de ortaya çıkmıştır ve bu araştırmacılar bu olumsuzluktan kurtulmak için çeşitli yaklaşımlar sunmuşlardır. Ancak bilindiği gibi istenildiği kadar iyi sonuçlar elde edilememiştir. Bu çalışmada da bu olumsuzluktan kurtulmak için farklı bir ölçüm prosedürü önerilmektedir: Tekrar hatırlatmak gerekirse buradaki amaç ölçülen herhangi bir transfer FTF $A_{pq}^{(p)}$ üzerindeki transdüser kütle etkisini kaldırmaktır. Bu transfer FTF 'nun ölçümü için sarsıcı ve ivme ölçer pozisyonları Şekil 4.24b 'de görülmektedir. Şekil 4.24a 'da ise sarsıcının bulunduğu koordinatta sürüş noktası FTF 'nun ($A_{qq}^{(q)}$) ölçümü görülmektedir ki bu FTF, standart bir modal analiz için de gereklidir. Bu nedenle ilave bir ölçüm olarak algılanmamalıdır. Burada Şekil 4.24c 'de görüldüğü gibi cevap ölçüm koordinatına (p), ölçümde kullanılan transdüser ile aynı kütlede yardımcı bir kütle (veya ikinci bir ivme ölçer) yerleştirildikten sonra sürüş noktası FTF 'nun ($A_{qq}^{(p,q)}$) tekrar ölçülmesi önerilmektedir. Bu FTF 'nun gösteriminde üs olarak kullanılan (p, q), bu FTF 'unda hem p hem de q koordinatlarında kütle olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.24 Yardımcı kütle kullanılarak yapılan FTF ölçümü

Burada ölçülen FTF 'larından sürüş noktası FTF $A_{qq}^{(q)}$ üzerindeki transdüser kütle etkisi (4.6) denklemi yardımıyla kolaylıkla kaldırılabilir. Transfer FTF $A_{pq}^{(p)}$ üzerindeki kütle etkisi ise (4.5) denklemi kullanılarak kaldırılabilir. Ancak burada ölçülmeyen ve ölçülmesi pratik olmayan noktasal FTF $A_{pp}^{(p)}$ 'ye de ihtiyaç duyulmaktadır. İhtiyaç duyulan bu FTF, burada önerilen teknikle ölçülen üç FTF ($A_{pq}^{(p)}$, $A_{qq}^{(q)}$ ve $A_{qq}^{(p,q)}$) aşağıda açıklanan bir dizi işlemde kullanılarak

hesaplanabilmektedir. Burada yardımcı kütle kullanılarak ölçülen FTF $A_{qq}^{(p,q)}$ üzerinden q konumundaki yardımcı kütle etkisi kaldırılırsa $A_{qq}^{(p)}$ elde edilebilir. Bunun için (4.6) denkleminin uygun olarak yazılan,

$$A_{qq}^{(p)} = \frac{A_{qq}^{(p,q)}}{1 - mA_{qq}^{(p,q)}} \quad (4.7)$$

denkleminde faydalanılabilir. Elde edilen bu FTF 'undan da p koordinatındaki kütle etkisi kaldırılarak A_{qq}^* hesaplanabilir. Bunu yapabilmek için denklem (4.1) 'de önce $p=q$ ve sonra $r=p$ yazılarak ve reseptans ile ivme tipindeki FTF arasındaki (4.4) bağıntısı da dikkate alınarak aşağıdaki denkleme ulaşılabilir:

$$A_{qq}^* = \frac{A_{qq}^{(p)} - m(A_{pp}^{(p)} A_{pq}^{(p)} - A_{qp}^{(p)} A_{pq}^{(p)})}{1 - mA_{pp}^{(p)}} \quad (4.8)$$

Burada A_{qq}^* denklem (4.6) ve $A_{qq}^{(p)}$ denklem (4.7) yardımıyla hesaplanmıştır. $A_{pq}^{(p)}$ ise ölçülen FTF 'dur (Şekil 4.24b). (4.8) denkleminde Maxwell teoremi ($A_{pq}^{(p)} = A_{qp}^{(p)}$) de kullanılarak p koordinatındaki noktasal FTF $A_{pp}^{(p)}$ aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$A_{pp}^{(p)} = \frac{A_{qq}^{(p)} - A_{qq}^* + m(A_{pq}^{(p)})^2}{m(A_{qq}^{(p)} - A_{qq}^*)} \quad (4.9)$$

Denklem (4.9) daha açık olarak aşağıdaki gibi de yazılabilir:

$$A_{pp}^{(p)} = \frac{1}{m} + \frac{(A_{pq}^{(p)})^2}{(A_{qq}^{(p)} - A_{qq}^*)} \quad (4.10)$$

Böylece, transfer FTF $A_{pq}^{(p)}$ üzerindeki kütle etkisini kaldırmak için kullanılacak (4.5) denkleminde ihtiyaç duyulan noktasal FTF $A_{pp}^{(p)}$ yukarıda belirtilen bir dizi işlemle sonra hesaplanmış olur. Ayrıca bu FTF ($A_{pp}^{(p)}$) 'den p koordinatındaki kütle etkisini kaldırmak için (4.6) denkleminde $q=p$ yazılarak,

$$A_{pp}^* = \frac{A_{pp}^{(p)}}{1 - mA_{pp}^{(p)}} \quad (4.11)$$

elde edilir. Tipik olarak sarsıcı kullanılarak yapılan ölçümlerden FTF matrisinin bir kolonunun ölçüldüğü düşünülecek olursa (4.11) denklemi yardımıyla FTF matrisinin köşegen elemanları da oluşturulmuş olur ki bu da yöntemin getirdiği ilave bir faydadır. Burada yapılan tüm işlemler sonucunda transdüser kütle etkisi kaldırılmış üç tane FTF (A_{qq}^* , A_{pq}^* ve A_{pp}^*) elde edilmektedir.

İvme ölçerin gezdirilmesi suretiyle ölçülen FTF 'ları üzerindeki transdüser kütle etkisini kaldırmak için yardımcı kütle kullanımına dayanan ve yukarıda açıklanan yöntem aşağıdaki gibi özetlenebilir:

A. Ölçümler:

- i). İvme ölçer q noktasına yerleştirilerek sürüş noktası FTF $A_{qq}^{(q)}$ ölçülür (Şekil 4.24a),
- ii). İvme ölçer herhangi bir p noktasına taşınarak transfer FTF $A_{pq}^{(p)}$ ölçülür ki bu düzeltilmesi problem olan FTF 'dur (Şekil 4.24b),
- iii). İvme ölçer q noktasına taşınır ve ivme ölçer ile aynı kütleye sahip yardımcı bir kütle veya ikinci bir ivme ölçer p noktasına bağlanarak sürüş noktası FTF $A_{qq}^{(p,q)}$ tekrar ölçülür (Şekil 4.24c).

B. Hesaplamalar:

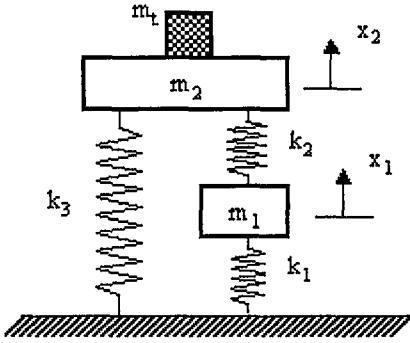
- i). Denklem (4.6) yardımıyla A_{qq}^* ,
- ii). Denklem (4.7) 'den $A_{qq}^{(p)}$,
- iii). Denklem (4.9) veya (4.10) 'dan $A_{pp}^{(p)}$,
- iv). Denklem (4.5) 'den A_{pq}^* ve son olarak
- v). Denklem (4.11) 'den A_{pp}^* hesaplanır.

Burada şunu belirtmek gerekir ki, (4.5) denkleminde noktasal FTF 'na ihtiyaç duyulması, transdüser kütle etkisinin kaldırılması için literatürde geliştirilen diğer yöntemlerde de söz konusudur. İhtiyaç duyulan FTF 'nun ölçülmeden hesapla bulunabilmesi için önerilen ve yardımcı bir kütle kullanılarak ilave bir ölçümün yapılmasına dayanan tekniğe benzer bir teknik Silva ve diğ. [15] tarafından da önerilmiştir. Ancak burada önerilen tekniğin onlarinkine göre çok önemli bir avantajı vardır. [15] 'de önerilen teknikte, biri transfer FTF diğeri sürüş noktası FTF olmak üzere iki FTF ölçümünde yardımcı kütle kullanılırken burada önerilen teknikte sadece sürüş noktası FTF 'nun ölçümünde yardımcı kütle kullanılmaktadır. Ölçümde kullanılacak ivme ölçerden başka ilave kütlelerin yapıda oluşturacağı etkiler de göz önüne alındığında bu oldukça önemli bir avantajdır. Ayrıca mevcut teknolojik olanaklarla (açısal yönlerdeki cevapların ölçülmesindeki zorluklar gibi nedenlerle) kütle etkilerinin bütün yönlerde kaldırılmasının zor olması burada sunulan tekniği daha da avantajlı yapmaktadır.

4.4.1 Sayısal Simülasyon

Alışık olunduğu gibi yukarıda sarsıcı kullanılarak yapılan ölçümlerden elde edilen transfer FTF 'larındaki transdüser kütle etkisini kaldırmak için geliştirilen yöntemin geçerliliği ve pratikte uygulanabilirliği simülasyonlarla incelenecektir. Simülasyon için Şekil 4.25 'de görülen iki serbestlik dereceli basit bir sistem göz önüne alındı. Buradaki m_t kütlesi transdüser kütlelerini temsil etmektedir ve FTF ölçümüne uygun olarak x_1 veya x_2 koordinatlarına yerleştirilebilir. Başlangıçta bu kütle olmaksızın sistemin gerçek FTF 'larını temsil eden ivme tipindeki FTF 'ları (A_{11} , $A_{12}=A_{21}$ ve A_{22}) hesaplanmıştır. Tahrik kuvvetinin x_1 koordinatından uygulandığı düşünülürse sarsıcı kullanılarak yapılan bir teste ivme ölçer sırasıyla x_1 ve x_2 koordinatlarına yerleştirilerek $A_{11}^{(1)}$ ile $A_{21}^{(2)}$ ölçülebilir. Bu "ölçülen" FTF 'larını simule etmek için m_t kütlelerinin x_1 koordinatında olduğu düşünülerek $A_{11}^{(1)}$ ve x_2 koordinatında olduğu düşünülerek de $A_{21}^{(2)}$ sayısal olarak hesaplanmıştır. Yardımcı kütle kullanılarak "ölçülen" FTF $A_{11}^{(1,2)}$ ise iki m_t kütlelerinin aynı anda hem x_1 ve hem de x_2 koordinatlarında olduğu düşünülerek hesaplanmıştır. Bu simülasyondaki amaç "ölçülen" FTF 'ları $A_{11}^{(1)}$ ve $A_{21}^{(2)}$ üzerindeki kütle etkilerini kaldırarak gerçek FTF

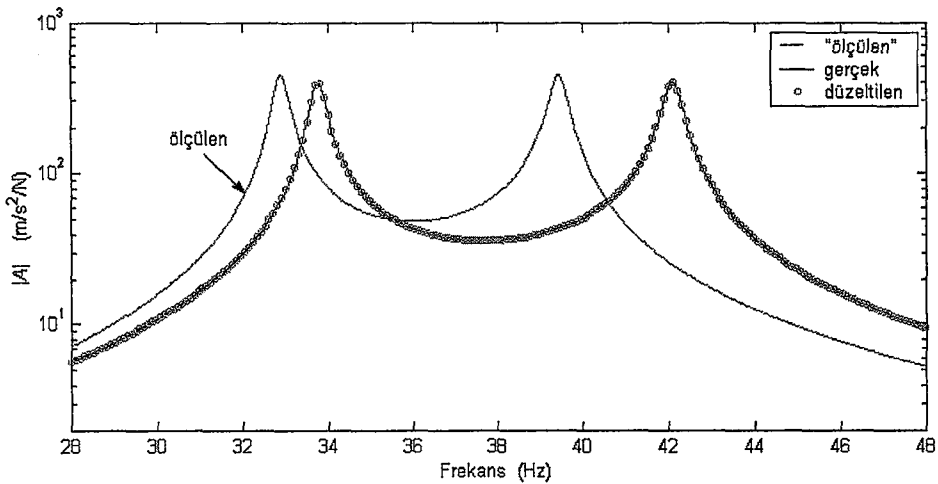
'larına (A_{11} ve A_{21}) ulaşmaktır. Ayrıca önerilen tekniğin avantajı olarak ölçülmeden hesaplanan noktasal FTF 'nun (A_{22}) doğruluğu incelenecektir.



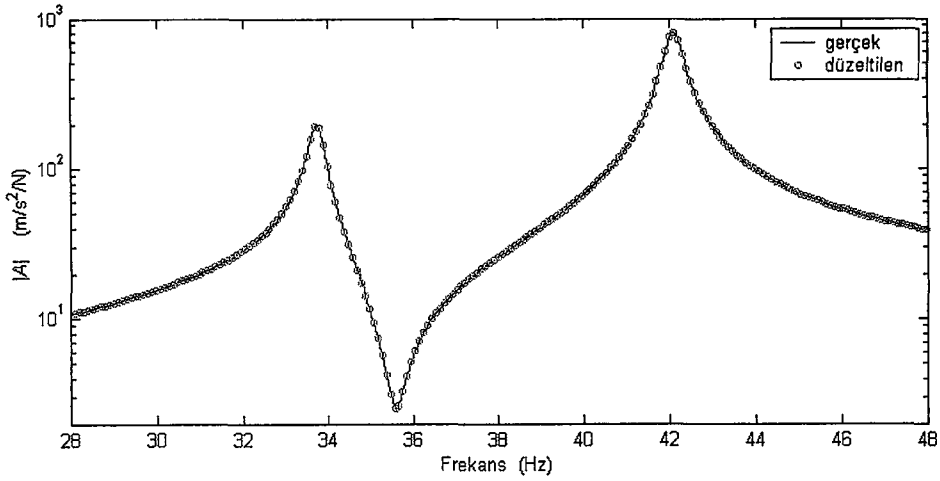
Sistem parametreleri	
$k_1 = 4 \text{ kN/m}$	$m_1 = 0.1 \text{ kg}$
$k_2 = 1 \text{ kN/m}$	$m_2 = 0.1 \text{ kg}$
$k_3 = 5.5 \text{ kN/m}$	$m_t = 0.02 \text{ kg}$

Şekil 4.25 İki serbestlik dereceli bir mekanik sistem.

Yukarıda ivme ölçerin gezdirilmesi durumu için açıklanan yöntem uygulanarak FTF 'ları üzerindeki kütle etkisi kaldırılmaya çalışılmıştır. Sürüş noktası FTF 'undan kütle etkisinin kaldırılmasında problem olmadığından bununla ilgili sonuçlar verilmeksizin sadece asıl problemi teşkil eden transfer FTF A_{21} için elde edilen sonuçlar Şekil 4.26 'da verilmiştir. Görüldüğü gibi düzeltilen FTF gerçek değeri ile tamamen uyuşmaktadır. Diğer taraftan yöntemin avantajı olarak ölçülmeden hesaplanabilen noktasal FTF A_{22} 'nin de gerçek değeri ile aynı olduğu Şekil 4.27 'de gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre burada önerilen teknik ile ivme ölçerin gezdirilmesiyle ölçülen FTF 'larındaki kütle etkisinin kaldırılabileceği görülmektedir.

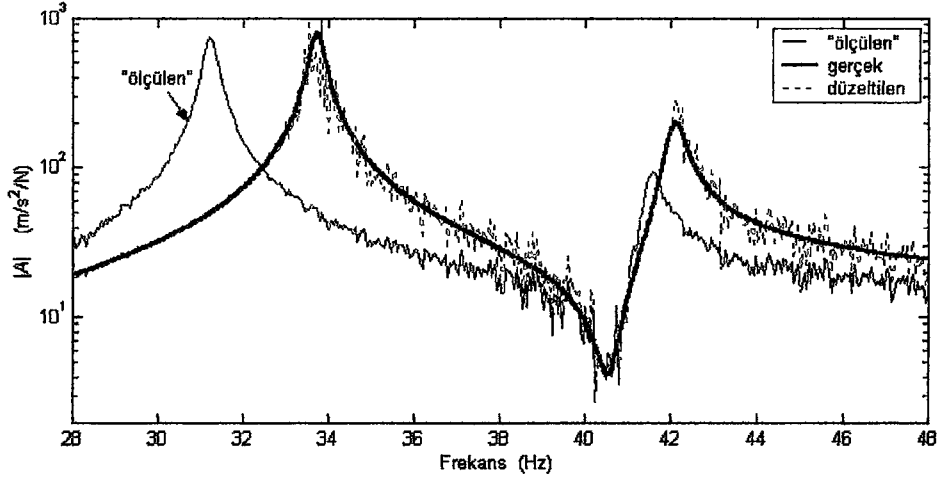


Şekil 4.26 "Ölçülen", düzeltilen ve gerçek transfer FTF A_{21} .

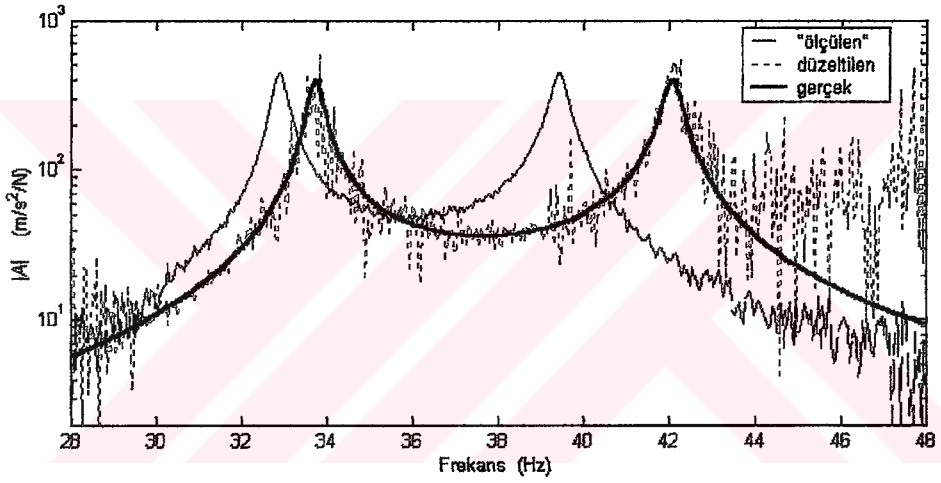


Şekil 4.27 Ölçülmeden hesaplanabilen noktasal FTF A_{22} .

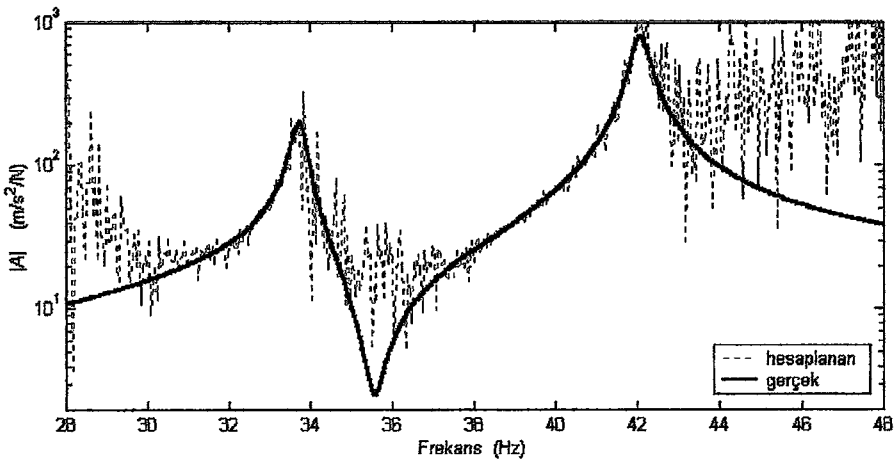
Deneysel ölçümlerde her zaman parazitlerin olacağı göz önüne alınarak yöntemin parazitlere karşı duyarlılığı da incelenmelidir. Bunun için %5 oranında eklemeli tip parazitler ölçülen FTF 'larına eklenerek yöntemin performansı denenmiştir. Elde edilen noktasal ve transfer FTF 'ları A_{11} ve A_{21} sırasıyla Şekil 4.28 ve 4.29 ' da, ölçülmeden fakat hesapla elde edilen noktasal FTF A_{22} ise Şekil 4.30 'da verilmiştir. Yöntem ile kütle etkisi kaldırıldıktan sonra FTF 'larındaki rezonans tepeleri gerçek değerlerine kaymasına rağmen mevcut parazit miktarı artarak FTF 'nun yapısını bozmaktadır. Bu sonuçlardan, geliştirilen yöntemin parazitlere karşı duyarlı olduğu görülmektedir. Parazitler ölçülmeksizin hesapla bulunan noktasal FTF ve bundan faydalanılarak hesaplanan transfer FTF 'nu etkilemektedir. Şekil 4.30 'da görüldüğü gibi özellikle ters-rezonanslar gibi FTF genliklerinin küçük olduğu frekanslarda parazitler daha etkili olmaktadır. Bunun nedeni denklem (4.10) yakından incelenerek açıklanabilir: Görüldüğü gibi bu denklemin paydasında $(A_{qq}^p - A_{qq}^*)$ farkı bulunmaktadır. Kolayca anlaşılacağı gibi bu iki FTF aynı q noktasındaki sürüş noktası FTF 'larıdır. Bunlardan A_{qq}^p kütle tesirini içeren ve A_{qq}^* gerçek noktasal FTF 'larını göstermektedir. FTF üzerindeki kütle etkisinin az olduğu durumlarda bu fark, sifira yaklaşacak ve denklem (4.10) 'un paydası, verilerdeki en küçük değişimlere ve dolayısıyla da parazitlere karşı duyarlı olacaktır. Bu sonuç ölçülmüş FTF 'larındaki parazitlerin ayıklanması gerekliliğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.28 "Ölçülen", düzeltilen ve gerçek noktasal FTF A_{11} (%5 eklemeli parazit).

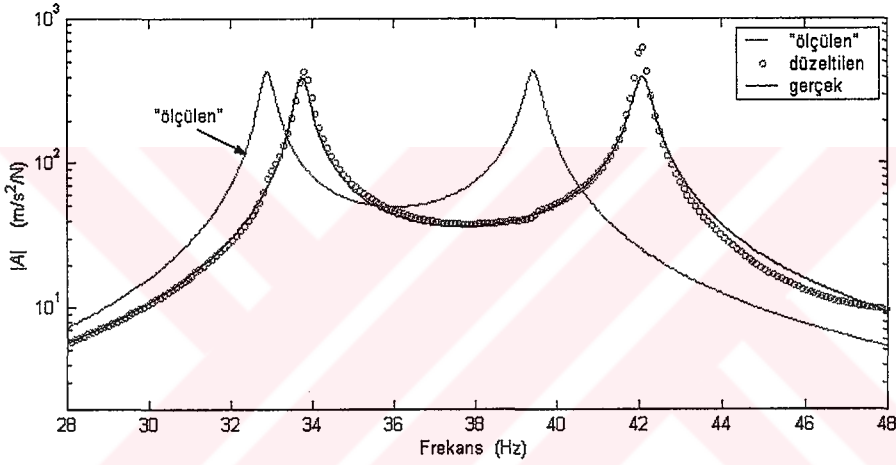


Şekil 4.29 "Ölçülen", düzeltilen ve gerçek transfer FTF A_{21} (%5 eklemeli parazit).

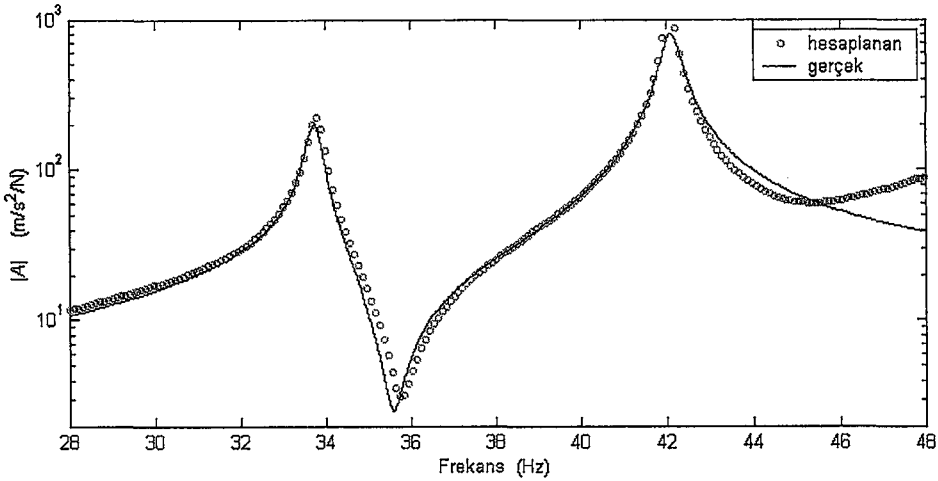


Şekil 4.30 Ölçülmeden hesaplanabilen noktasal FTF A_{22} (%5 eklemeli parazit).

Verilerdeki parazitlerden kaynaklanan bu olumsuzluklardan kurtulmanın bir yolu, ölçülen FTF 'larını modal analiz ile yeniden daha temiz olarak türettikten sonra kütle tesirini kaldırmaktır. Buna dayanarak bu uygulamada ölçülen FTF 'larıyla modal analiz yapılmış ve eğri uydurularak bu FTF 'ları yeniden daha düzgün olarak türetilmiştir. Türetilen bu FTF 'larından kütle etkisi kaldırıldıktan sonra elde edilen sonuçların gerçek değerleriyle uyum içerisinde oldukları Şekil 4.31 ve 4.32 'de verilen transfer FTF ve hesapla bulunan noktasal FTF grafiklerinde görülmektedir. Burada sunulan yöntemin pratikte uygulanabilirliğini incelemek üzere deneysel bir ön çalışma da yapılmıştır. Ancak, sonuçları burada verilmemekle birlikte, parazit etkilerinin bu yöntemin pratikte kullanılmasına engel olduğu görülmüştür.



Şekil 4.31 "Ölçülen*", düzeltilen ve gerçek transfer FTF A_{21} (* : eğri uydurulmuş).



Şekil 4.32 Ölçülmeden hesaplanabilen noktasal FTF A_{22} .

4.5 Sonuç ve Değerlendirme

Titreşim ölçümlerinde yapı üzerine bağlanan transdüserlerin kütleleri incelenen yapının dinamik davranışlarını etkileyerek doğal frekansların ve mod biçimlerinin gerçeğinden farklı olmasına ve dolayısı ile FTF 'larının hatalı ölçülmesine neden olmaktadır. Bu çalışmada ölçülen FTF 'ları üzerindeki transdüser kütle etkilerinin kaldırılması amacıyla Sherman-Morrison formülüne dayalı olarak yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntemde ivme ölçerin bağlandığı koordinattaki sürüş noktası FTF 'nun mevcut olması halinde ölçülen tüm FTF 'larından kütle etkisi kaldırılabilir. Ancak bazı durumlarda transdüser konumundaki noktasal FTF 'larının ölçülmesi pratik olmamaktadır. Bu durum göz önünde bulundurularak FTF ölçümlerinde sıkça kullanılan iki farklı test durumu için yöntem uygulanmaya çalışılmıştır.

Bu test biçimlerinden biri çekiç testidir. Bu tür testlerde genellikle ivme ölçer sabit bir konumda tutulmakta ve darbe çekici ile istenilen koordinatlara kuvvet uygulanmaktadır. Bu durumda transdüser konumundaki noktasal FTF 'nun ölçülmesi genellikle mümkün olmakla beraber modal analiz için de gereklidir. Sunulan yöntemin geçerliliği önce sayısal simülasyonlarla gösterilmiş, sonra da farklı yapılardan ölçülen FTF 'larıyla uygulamalar yapılmıştır. Bu uygulamalarda bazı modlarda %100 düzelme sağlanırken bazı modlarda tam bir düzelme gerçekleşmediği görülmüştür. Burada transdüser kütlelerinin sadece ölçüm yönünde etkisi göz önüne alınarak FTF 'undan kaldırılmıştır. Oysa transdüserin kütleli ataletleri yanında kütleli atalet momentlerinin de etkisi vardır ve bunlar toplam 6 yönde etki oluşturmaktadır. Dolayısı ile tam bir düzeltme sağlayabilmek için tüm 6 yöndeki etkinin de göz önüne alınması gerekmektedir. Ancak pratikte özellikle moment uygulamadaki ve açısal ivmelerin ölçülmesindeki zorluklar nedeniyle bu etkilerin tümünün kaldırılması oldukça zordur. Gelecekte teknoloji buna olanak sağlarsa bu etkilerin de geliştirilen yöntemle kaldırılması mümkündür. Bunun için geliştirilen yöntem ardışık olarak uygulanabilir. Bir başka deyişle ölçülen bir FTF 'undan 6 yöndeki kütle etkisi kaldırılmak istenirse bir koordinattaki etki çıkarıldıktan sonra elde edilen FTF 'undan ikinci koordinattaki etki çıkarılabilir. Bu şekilde kalan diğer etkiler de çıkarılmak suretiyle gerçek FTF elde edilebilir. Burada dikkat edilmesi gereken şey her değişimde o koordinata ait kütle özelliğinin dikkate

alınmasıdır. Örneğin açısal etki çıkarılacaksa kullanılacak denklemlerde kütle yerine kütleli atalet momentinin kullanılması gerekir.

FTF ölçümlerinde sık kullanılan tekniklerden biri de sarsıcı kullanılarak yapılan testlerdir. Bu testlerde sarsıcı sabit bir konuma yerleştirilmekte ve FTF ölçümleri için ivme ölçer yapı üzerinde gezdirilmektedir. Bu durumda ihtiyaç duyulan noktasal FTF 'nun ölçülmesi için sarsıcının ivme ölçerin gezdirildiği konumlara taşınması pratik olmadığı gibi çoğu zaman da mümkün değildir. Bu zorluğu ortadan kaldırmak için burada yardımcı kütle kullanımına dayalı bir teknik önerilmiştir. Bu teknikle; i) sürüş noktası FTF ölçülür, ii) transfer FTF ölçülür, iii) ivme ölçer yerine aynı kütlede bir yardımcı kütle yerleştirilerek veya ikinci bir ivme ölçer kullanılarak sürüş noktası FTF tekrar ölçülür. Ölçülen bu FTF 'ları kullanılarak bir takım işlemlerden sonra ihtiyaç duyulan noktasal FTF hesapla bulunmakta ve ölçülen tüm FTF 'larından kütle etkisi kaldırılabilir. Benzer bir teknik [15] 'de de önerilmiştir. Ancak burada önerilen tekniğin oldukça önemli avantajları vardır. [15] 'de önerilen teknikle ilave kütle kullanılarak iki FTF ölçülmektedir. Burada önerilen teknikle ise sadece bir FTF yardımcı kütle kullanılarak ölçülmektedir. Transdüser kütlesi yanında bu ilave kütle de yapıyı 6 yönde etkilediği ve bu etkilerin tüm yönlerde kaldırılmasının zor olduğu göz önüne alınırsa bu önemli bir avantajdır. Burada sunulan yöntemin geçerliliğini göstermek için yapılan sayısal simülasyonda başarılı sonuçlar elde edilmesine rağmen yöntemin verilerdeki parazitlere karşı oldukça duyarlı olduğu görülmüştür. Bu durumda ölçülen FTF 'ları ile modal analiz yapılarak daha düzgün FTF 'ları elde edildikten sonra yöntem uygulanabilir. Ancak parazitli verilerle modal analiz yapmanın zorluğu da göz ardı edilmemelidir. Burada verilmemekle birlikte, yöntemin pratikte uygulanabilirliğini incelemek üzere deneysel çalışmalar yapılmış ancak parazitlerin bu tekniğin pratikte uygulanmasına engel olduğu görülmüştür. Bu nedenle bu tür bir testten elde edilen FTF 'larındaki kütle etkisini kaldırmak için yine de daha pratik ve etkili bir yöntem ihtiyacı duyulmaktadır. Ayrıca burada parazitlerin yöntemi olumsuz yönde etkilemesi parazitlerin ölçülen FTF 'larından ayıklanması gerektiğini bir kez daha ortaya koymaktadır ki bu problem bu doktora tez çalışmasının önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Bu problem daha sonraki bölümlerde ele alınacaktır.

5 FTF 'LARINDAKİ MESNET ETKİLERİNİN KALDIRILMASI

5.1 Giriş

Bir yapının deneysel yöntemlerle dinamik özelliklerinin belirlenmesinde yapının sınır koşullarının sağlanması önemli bir konudur. Pratikte yapılar çoğunlukla ya serbest sınır koşullarında ya da doğrudan zemin üzerinde test edilmektedirler. Ancak bu sınır koşullarının sağlanması oldukça zordur. Zemin üzerinde test edilen yapılar zemine bağlandığı yerlerden belirli koordinatlardaki hareketleri sınırlayacak biçimde cıvata gibi bağlantı elemanlarıyla zemine rijit olarak bağlanırlar. Ancak bağlantı elemanlarının esnekliği istenilen rijitliğin tam olarak sağlanmasını zorlaştırmaktadır. Ayrıca testlerde sınır koşullarının tekrarlanabilirliği de önemlidir. Cıvata bağlantılarının sıkılma miktarları sistemin yapısını etkilediğinden test tekrarlanmak istendiğinde aynı sınır şartlarının tekrarlanması zordur.

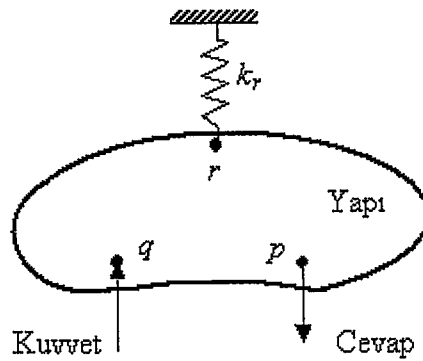
Bir yapının serbest olması, yapının hiçbir şeye temas etmeden havada asılı durması demektir ve yeryüzünde bunu gerçekleştirmek mümkün değildir. Ancak yapılar çok hafif elastik kordonlarla asılarak serbest sınır koşulları mümkün olduğunca sağlanmaya çalışılır. Uçak gibi büyük yapılar ise varsa teker lastiklerinin havaları indirildikten sonra veya hava yastıkları üzerinde test edilmektedirler. Ancak bu yöntemlerle serbest sınır şartlarını tam anlamıyla sağlamak mümkün değildir. Kullanılan bu mesnet elemanları esneklikleri dolayısıyla tutturuldukları koordinatlarda yapıya ilave yaylar olarak etki etmekte ve yapının dinamik özelliklerini önemli ölçüde değiştirebilmektedirler. Hatta bazen bunlar ilave sönüm etkisi de yaratabilmektedirler. Bu mesnet elemanlarının etkisi ile rijit cisim frekansları sıfırdan büyük ölçülmekte ve elastik bir modmuş gibi algılanabilmektedir. Sıfırdan uzaklaşan bu rijit mod frekanslarının yapının en küçük elastik moduna karşılık gelen doğal frekansının %10 'undan daha büyük olması halinde yapının diğer modlardaki değişimler de önemli olabilmektedir. Bu etkinin azaltılması için mesnet konumları yapının titreşim modlarının düğüm noktalarına gelecek biçimde

seçilirler. Ancak birkaç veya daha fazla mod içeren frekans aralığında ölçüm yapılması gerektiğinde bunu da tam olarak sağlamak mümkün değildir. Bir moddaki bir düğüm noktası başka bir modda en hareketli nokta olabilir veya bu noktalar yapı olarak mesnetleme için uygun olmayabilir. Ayrıca düğüm noktalarını belirleyebilmek için yapının sonlu elemanlar gibi doğrulanmamış çözümlerinin de mevcut olması gerekir. Deney öncesi doğrulanmış model de mevcut değildir.

Serbest sınır şartlarını sağlamak amacıyla kullanılan mesnet elemanları sistemin dinamik özelliklerini önemli derecede etkiliyorsa sistemin gerçek özelliklerini elde edebilmek için bu mesnet etkilerinin FTF 'larından çıkarılması gerekir. Ancak bu etkinin kaldırılması ile ilgili henüz pratik ve etkili bir yöntem yoktur. Bu bölümde bu etkilerin FTF 'larından kaldırılması için yeni bir yöntem sunulmaktadır. Bu yöntem FTF 'larından kütle etkisinin kaldırılmasına yönelik olarak geliştirilen yöntemin bir uzantısı niteliğindedir.

5.2 Teori

FTF ölçümlerinde bir yapının mesnetlenmesi için kullanılan elastik elemanların, yapıda öncelikle bir yay değişimine neden olduğu düşünülebilir. O halde ölçülen FTF 'ları üzerinde yapılacak negatif bir yay değişimi ile mesnet etkisi kaldırılabilir ve orijinal yapıya ait gerçek FTF 'ları elde edilebilir. Bu amaçla önceden Sherman-Morrison formülüne dayalı olarak geliştirilen ve transdüser kütlelerinin kaldırılmasında da kullanılan teknik burada mesnet etkilerinin kaldırılması için geliştirilecektir.



Şekil 5.1 FTF ölçümü için incelenen yapının bir yayla asılması.

Basit olarak bir testte, Şekil 5.1 'de görüldüğü gibi incelenen yapı, yay ile temsil edilen elastik bir kordon kullanılarak asılabilir. Şekilde p, q cevap ve kuvvet ölçüm koordinatları olmak üzere r konumunda bir ucu sabit olan bir yay değişimi söz konusudur. Ölçülen FTF 'ları üzerinde yapılacak negatif bir yay ($-k$) değişimi ile sistemin gerçek FTF 'larının elde edilebileceği açıktır. Bu halde (3.26) denklemi,

$$\alpha_{pq}^* = \frac{\alpha_{pq}^{(r)} - k(\alpha_{rr}^{(r)} \alpha_{pq}^{(r)} - \alpha_{pr}^{(r)} \alpha_{rq}^{(r)})}{1 - k\alpha_{rr}^{(r)}} \quad (5.1)$$

biçiminde yazılabilir. İvme ölçer kullanılarak yapılan ölçümlere uygunluğu bakımından bu denklem ivme tipindeki FTF olarak aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$A_{pq}^* = \frac{\omega^2 A_{pq}^{(r)} + k(A_{rr}^{(r)} A_{pq}^{(r)} - A_{pr}^{(r)} A_{rq}^{(r)})}{\omega^2 + kA_{rr}^{(r)}} \quad (5.2)$$

veya daha basit olarak:

$$A_{pq}^* = A_{pq}^{(r)} - \frac{kA_{pr}^{(r)} A_{rq}^{(r)}}{\omega^2 + kA_{rr}^{(r)}}. \quad (5.3)$$

Bu denkleme göre; sistem r koordinatında bir yayla asılı iken, ölçülen transfer FTF $A_{pq}^{(r)}$ üzerinde negatif bir yay ($-k$) değişimi yaparak gerçek FTF A_{pq}^* 'yu elde etmek için, yayın bağlı olduğu r koordinatındaki noktasal FTF ($A_{rr}^{(r)}$) ve ayrıca değişim koordinatı ile tahrik ve cevap koordinatları arasındaki transfer FTF 'larının da ($A_{pr}^{(r)}$ ve $A_{rq}^{(r)}$) ölçülmesi gerekmektedir. Ayrıca herhangi bir p noktasından ölçülen sürüş noktası FTF üzerindeki yay tesirini kaldırmak için (5.3) denkleminde $q=p$ yazılarak ve $A_{pr}=A_{rp}$ eşitliği de göz önüne alınarak aşağıdaki denkleme ulaşılabilir:

$$A_{pp}^* = A_{pp}^{(r)} - \frac{k(A_{pr}^{(r)})^2}{\omega^2 + kA_{rr}^{(r)}}. \quad (5.4)$$

Diğer taraftan ilave olarak ölçülen üç FTF üzerindeki yay etkilerinin de kaldırılması istenebilir. Bunun için (5.3) denkleminde aşağıdaki denklemler elde edilebilir:

$$p=q=r \text{ için } A_{rr}^* = \frac{\omega^2 A_{rr}^{(r)}}{\omega^2 + kA_{rr}^{(r)}}, \quad (5.5)$$

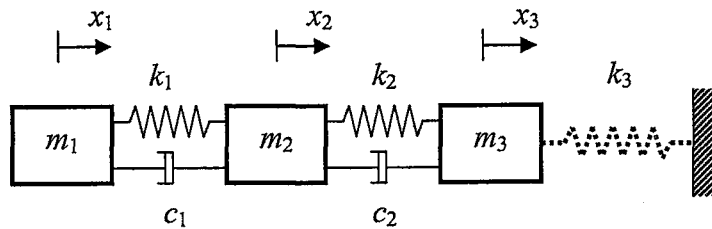
$$q=r \text{ için } A_{pr}^* = \frac{\omega^2 A_{pr}^{(r)}}{\omega^2 + kA_{rr}^{(r)}}, \quad (5.6)$$

$$p=r \text{ için } A_{rq}^* = \frac{\omega^2 A_{rq}^{(r)}}{\omega^2 + kA_{rr}^{(r)}}. \quad (5.7)$$

Burada sistemin tek bir yayla asıldığı dikkate alınmakla beraber deneysel uygulamaların çoğunda incelenen sistemin asılmasında iki veya daha fazla elastik eleman kullanılabilir. Bu durum daha sonraki bölümlerde ele alınmıştır.

5.2.1 Sayısal Simülasyon

Burada sunulan yöntemin geçerliliğini göstermek amacıyla örnek olarak Şekil 5.2 'de gösterilen üç serbestlik dereceli mekanik bir sistem göz önüne alınmıştır. Önce askı yayını temsil eden k_3 yayı sisteme dahil edilerek sistemin FTF 'ları hesaplanmış ve bunlar "ölçülen" FTF 'ları olarak adlandırılmıştır. Sonra ikinci bir grup FTF 'da k_3 yayı yok iken hesaplanmıştır ki bunlar da serbest haldeki orijinal sistemin gerçek FTF 'larını temsil etmektedir. Bu simülasyonda "ölçülen" FTF 'ları üzerinde $-k_3$ kadar bir değişim yapılarak elde edilen FTF 'larının gerçek FTF 'ları ile olan uyumluluğu incelenecektir.



Şekil 5.2 Bir yayla mesnetli üç serbestlik dereceli mekanik bir sistem ($m_1=m_3=0.0039$ kg, $m_2=0.0078$ kg, $k_1=k_2= 2$ N/m, $k_3= 4$ N/m, $c_1=c_2=0.0002$ N/m/s).

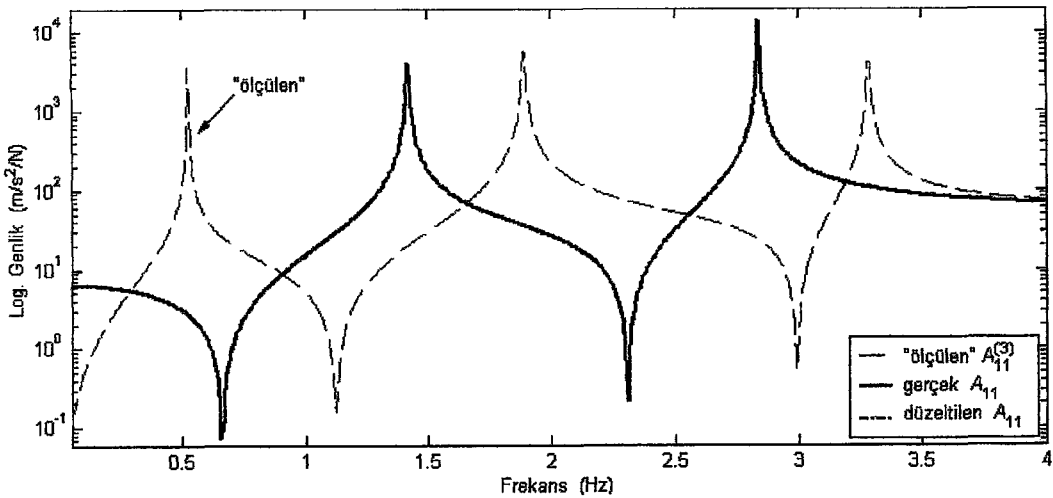
İncelenen sistemde "ölçülen" transfer FTF $A_{12}^{(3)}$ üzerindeki k_3 askı yayının etkisinin kaldırılması için (5.3) denkleminde $p=1$, $q=2$ ve $r=3$ yazılarak,

$$A_{12}^* = A_{12}^{(3)} - \frac{k_3 A_{13}^{(3)} A_{32}^{(3)}}{\omega^2 + k_3 A_{33}^{(3)}} \quad (5.8)$$

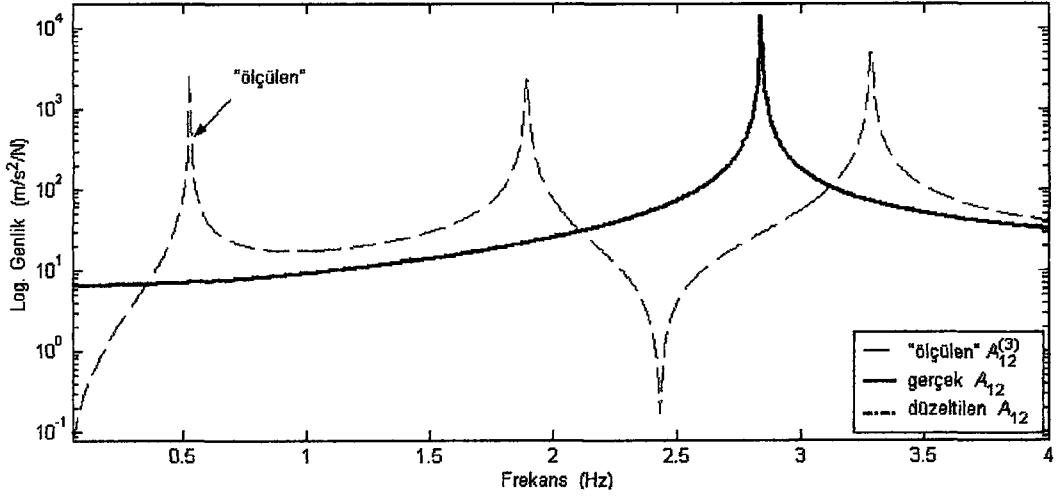
denklemini ve noktasal FTF $A_{11}^{(3)}$ için de (5.4) denkleminde $p=q=1$ yazılarak,

$$A_{11}^* = A_{11}^{(3)} - \frac{k_3 (A_{13}^{(3)})^2}{\omega^2 + k_3 A_{33}^{(3)}} \quad (5.9)$$

elde edilebilir. Denklem (5.8) ve (5.9) kullanılarak $A_{11}^{(3)}$ ve $A_{12}^{(3)}$ üzerinden yay etkisi kaldırılmış ve bu iki FTF için "ölçülen", düzeltilen ve gerçek FTF 'ları Şekil 5.3 ve 5.4 'de karşılaştırılmıştır. Bu şekillerde görüldüğü gibi k_3 yayının kullanılması serbest durumdaki doğal frekansların bir miktar ötelenmesine ve sıfır olan rijit cisim mod frekansının da elastik bir doğal frekansmış gibi gözükmeye neden olmaktadır. Sunulan yöntem ile değişim yapıldıktan sonra elde edilen FTF 'larının serbest sınır şartı durumundaki gerçek FTF 'ları ile tamamen uyduğu her iki şekilde de açıkça görülmektedir ki bu sonuç yöntemin FTF 'larından mesnet etkilerinin kaldırılması için kullanılabileceğini göstermektedir..

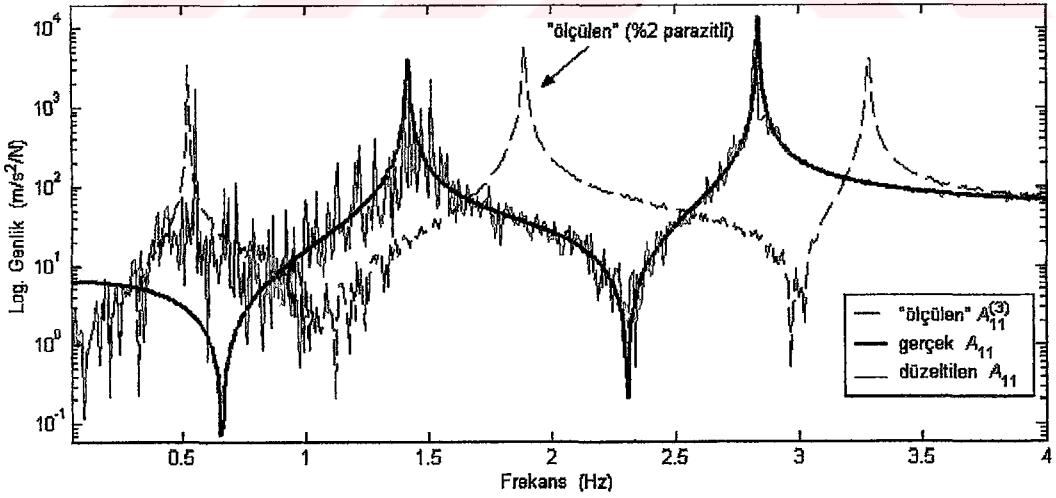


Şekil 5.3 "Ölçülen", düzeltilen ve gerçek FTF A_{11} .

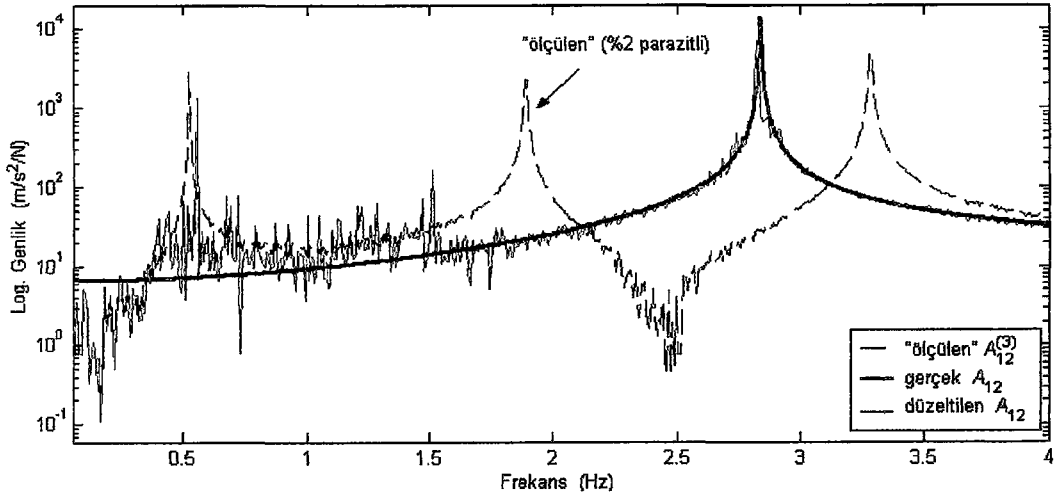


Şekil 5.4 "Ölçülen", düzeltilen ve gerçek FTF A_{12} .

Gerçek sistemlerden ölçülen FTF 'larında her zaman parazit olacağı göz önüne alınarak "ölçülen" FTF 'larına %2 oranında eklemeli tip parazit ilave edilmiş ve yöntemin performansı incelenmiştir. Bu durumda elde edilen FTF 'ları da Şekil 5.5 ve 5.6 'da karşılaştırılmıştır. Burada doğal frekans değerleri düzeltilmekle beraber parazitlerin yöntemin performansını olumsuz yönde etkilediği ve düzeltilen FTF 'larında parazitlerin arttığı görülmektedir.



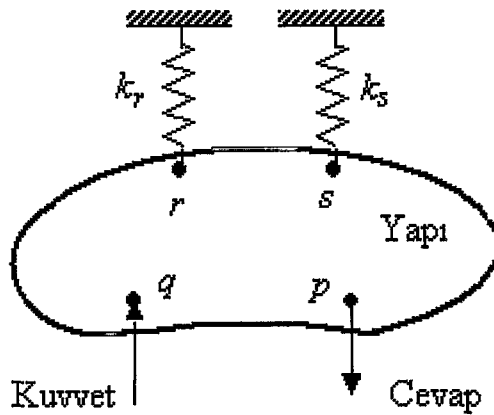
Şekil 5.5 "Ölçülen", düzeltilen ve gerçek FTF A_{11} (%2 parazitli durum).



Şekil 5.6 "Ölçülen", düzeltilen ve gerçek FTF A_{12} (%2 parazitli durum).

5.3 Yapının İki Veya Daha Fazla Elastik Eleman İle Mesnetlenmesi Durumu

Deneysel uygulamaların çoğunda incelenen sistemin mesnetlenmesinde iki veya daha fazla sayıda elastik eleman kullanılabilir. Bu durumda geliştirilen yöntem ile, kullanılan yay sayısı kadar ardışık olarak değişimler yapılarak ve her defasında bir yayın etkisi kaldırılmak suretiyle gerçek FTF 'ları elde edilebilir. Bu bölümde önerilen yöntemin sergilenmesi bakımından sistemin iki elastik elemanla asılması durumu göz önüne alınacaktır. Daha fazla sayıda mesnet elemanı kullanılması halinde de bu yöntem kolaylıkla genelleştirilebilir.



Şekil 5.7 FTF ölçümü için incelenen yapının iki yayla asılması.

Şekil 5.7 'de görüldüğü gibi r ve s koordinatlarından iki farklı yay ile asılı sistemin herhangi iki p ve q noktaları arasında ölçülen ve $A_{pq}^{(r,s)}$ ile gösterilen transfer FTF göz önüne alınsın. Bu durumda gerçek FTF, örneğin, önce r koordinatında k_r değişimi ve sonra s koordinatında k_s değişimi yapılarak elde edilebilir. Buna göre önce $A_{pq}^{(r,s)}$ üzerinden r koordinatındaki k_r etkisi kaldırılarak $A_{pq}^{(s)}$ elde edilebilir. Bunun için (5.3) denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$A_{pq}^{(s)} = A_{pq}^{(r,s)} - \frac{k_r A_{pr}^{(r,s)} A_{rq}^{(r,s)}}{\omega^2 + k_r A_{rr}^{(r,s)}} \quad (5.10)$$

Bu denklemde görüldüğü gibi $A_{pq}^{(r,s)}$ ' den başka $A_{pr}^{(r,s)}$, $A_{rq}^{(r,s)}$ ve $A_{rr}^{(r,s)}$ 'ye de ihtiyaç duyulmaktadır. Dikkat edilirse bunlar, değişim koordinatı ile ilgili noktasal ve transfer FTF 'larıdır. Bu değişimden sonra $A_{pq}^{(s)}$ için s koordinatında k_s yay değişimi yapılarak gerçek FTF A_{pq}^* aşağıdaki gibi elde edilebilir:

$$A_{pq}^* = A_{pq}^{(s)} - \frac{k_s A_{ps}^{(s)} A_{sq}^{(s)}}{\omega^2 + k_s A_{ss}^{(s)}} \quad (5.11)$$

Ancak bu denklemde de, değişim koordinatı s ile ilgili FTF 'ları; $A_{ps}^{(s)}$, $A_{sq}^{(s)}$ ve $A_{ss}^{(s)}$ 'in de ölçülmesi ve (5.11) denkleminde kullanılabilmesi için de r koordinatındaki k_r yay etkisinin bu FTF 'larından kaldırılması gerekir. Bunun için (5.10) denklemine benzer olarak aşağıdaki denklemler yazılabilir:

$$A_{ps}^{(s)} = A_{ps}^{(r,s)} - \frac{k_r A_{pr}^{(r,s)} A_{rs}^{(r,s)}}{\omega^2 + k_r A_{rr}^{(r,s)}} \quad (5.12)$$

$$A_{sq}^{(s)} = A_{sq}^{(r,s)} - \frac{k_r A_{sr}^{(r,s)} A_{rq}^{(r,s)}}{\omega^2 + k_r A_{rr}^{(r,s)}} \quad (5.13)$$

$$A_{ss}^{(s)} = A_{ss}^{(r,s)} - \frac{k_r (A_{rs}^{(r,s)})^2}{\omega^2 + k_r A_{rr}^{(r,s)}} \quad (5.14)$$

Diğer taraftan (5.12) denklemde de değişim koordinatları r ve s arasındaki transfer FTF ($A_{rs}^{(r,s)}$) 'ye de ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle bu FTF 'nun da ölçülmesi gerekir. Sonuç olarak yay katsayıları k_r ve k_s olan iki yay ile asılı bir yapı üzerinden

ölçülen herhangi bir transfer FTF $A_{pq}^{(r,s)}$ üzerinden bu askı yaylarının tesirlerini kaldırmak için değişim koordinatları ile ilgili olan yedi tane FTF 'nun da ($A_{pr}^{(r,s)}$, $A_{rq}^{(r,s)}$, $A_{rr}^{(r,s)}$, $A_{ps}^{(r,s)}$, $A_{sq}^{(r,s)}$, $A_{ss}^{(r,s)}$ ve $A_{rs}^{(r,s)}$) ölçülmesi gerekmektedir. (5.10), (5.12)-(5.14) denklemleri yardımıyla ilgili FTF 'larından k_r yayının etkisi kaldırıldıktan sonra bunlar (5.11) denkleminde kullanılarak gerçek transfer FTF (A_{pq}^*) elde edilebilir.

Gerek duyulduğu takdirde ilave olarak ölçülen FTF 'larından da askı yaylarının etkileri kaldırılabilir. (5.12)-(5.14) 'denklemlerinde $A_{ps}^{(r,s)}$, $A_{sq}^{(r,s)}$ ve $A_{ss}^{(r,s)}$ FTF 'larından r koordinatındaki k_r yayının etkisi kaldırılarak $A_{ps}^{(s)}$, $A_{sq}^{(s)}$ ve $A_{ss}^{(s)}$ elde edilmiştir. Şimdi bu FTF 'larına k_r değişimi yapılarak bunlarla ilgili gerçek FTF 'ları elde edilebilir. Bunun için (5.5)-(5.7) denklemlerine benzer olarak aşağıdaki denklemler elde edilebilir:

$$A_{ss}^* = \frac{\omega^2 A_{ss}^{(s)}}{\omega^2 + k_s A_{ss}^{(s)}} \quad (5.15)$$

$$A_{ps}^* = \frac{\omega^2 A_{ps}^{(s)}}{\omega^2 + k_s A_{ss}^{(s)}} \quad (5.16)$$

$$A_{sq}^* = \frac{\omega^2 A_{sq}^{(s)}}{\omega^2 + k_s A_{ss}^{(s)}} \quad (5.17)$$

Diğer taraftan; $A_{pr}^{(r,s)}$, $A_{rq}^{(r,s)}$, $A_{rr}^{(r,s)}$ ve $A_{rs}^{(r,s)}$ FTF 'ları için de k_r ve k_s değişimleri ardışık olarak uygulanarak bunlarla ilgili gerçek FTF 'ları elde edilebilir. Bu durumda önce k_r değişimi için (5.3) denkleminde,

$$q=r \text{ için} \quad A_{pr}^{(s)} = \frac{\omega^2 A_{pr}^{(r,s)}}{\omega^2 + k_r A_{rr}^{(r,s)}} \quad (5.18)$$

$$q=r \text{ ve } p=q \text{ için} \quad A_{qr}^{(s)} = \frac{\omega^2 A_{qr}^{(r,s)}}{\omega^2 + k_r A_{rr}^{(r,s)}} \quad (5.19)$$

$$p=q=r \text{ için} \quad A_{rr}^{(s)} = \frac{\omega^2 A_{rr}^{(r,s)}}{\omega^2 + k_r A_{rr}^{(r,s)}} \quad (5.20)$$

$$p=r \text{ ve } q=s \text{ için} \quad A_{rs}^{(s)} = \frac{\omega^2 A_{rs}^{(r,s)}}{\omega^2 + k_r A_{rr}^{(r,s)}} \quad (5.21)$$

ve ardından k_s değişimi için (5.3) denkleminde,

$$r=s \text{ ve } q=r \text{ için} \quad A_{pr}^* = A_{pr}^{(s)} - \frac{k_s A_{ps}^{(s)} A_{sr}^{(s)}}{\omega^2 + k_s A_{ss}^{(s)}} \quad (5.22)$$

$$r=s, q=r \text{ ve } p=q \text{ için} \quad A_{qr}^* = A_{qr}^{(s)} - \frac{k_s A_{qs}^{(s)} A_{sr}^{(s)}}{\omega^2 + k_s A_{ss}^{(s)}} \quad (5.23)$$

$$r=s \text{ ve } p=q=r \text{ için} \quad A_{rr}^* = A_{rr}^{(s)} - \frac{k_s (A_{rs}^{(s)})^2}{\omega^2 + k_s A_{ss}^{(s)}} \quad (5.24)$$

$$r=s, p=r \text{ ve } q=s \text{ için} \quad A_{rs}^* = \frac{\omega^2 A_{rs}^{(s)}}{\omega^2 + k_r A_{ss}^{(s)}} \quad (5.25)$$

denklemleri elde edilebilir. Böylece iki yay ile mesnetli bir sistemden ölçülen toplam sekiz tane FTF üzerindeki yay etkileri kaldırılmış olur.

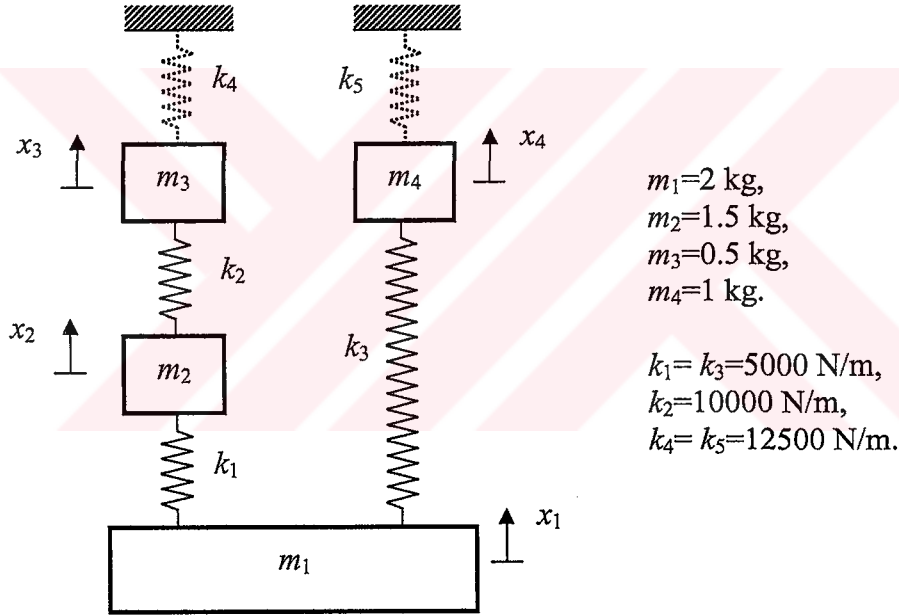
Burada iki yay türü elemanla mesnetlenen bir sistemden ölçülen toplam 8 tane FTF 'undan mesnet etkilerinin kaldırılabilmesi için (5.10)-(5.25) denklemleri ile verilen bir dizi işlemin yapılması gerektiği görülmektedir. Ancak bu yaklaşım özellikle ikiden daha fazla sayıda mesnet elemanının kullanılması durumunda bazı karmaşıklılıklara neden olabilir. Bu bakımdan bu işlemlerin yerine denklem (3.17) ile verilen ve sadece aktif koordinatlarla ilgi değişim denkleminin kullanılması daha sistematik bir yaklaşım olabilir. Buna göre burada kullanılan toplam 8 tane FTF 'undan, FTF matrisinin simetrik özelliği de kullanılarak aşağıda verilen FTF matrisini oluşturmak mümkündür:

$$[\alpha] = -\frac{1}{\omega^2} \begin{bmatrix} 0 & A_{pq}^{(r,s)} & A_{pr}^{(r,s)} & A_{ps}^{(r,s)} \\ A_{qp}^{(r,s)} & 0 & A_{qr}^{(r,s)} & A_{qs}^{(r,s)} \\ A_{rp}^{(r,s)} & A_{rq}^{(r,s)} & A_{rr}^{(r,s)} & A_{rs}^{(r,s)} \\ A_{sp}^{(r,s)} & A_{sq}^{(r,s)} & A_{sr}^{(r,s)} & A_{ss}^{(r,s)} \end{bmatrix} \quad (5.26)$$

Bu matriste ölçülmeyen ve gerek duyulmayan FTF 'larının yerine sıfır yazılmıştır. Ayrıca denklem (4.17) ile verilen aktif koordinatlarla ilgili değişim denkleminin uygun olması bakımından FTF matrisi reseptans cinsinden yazılmıştır.

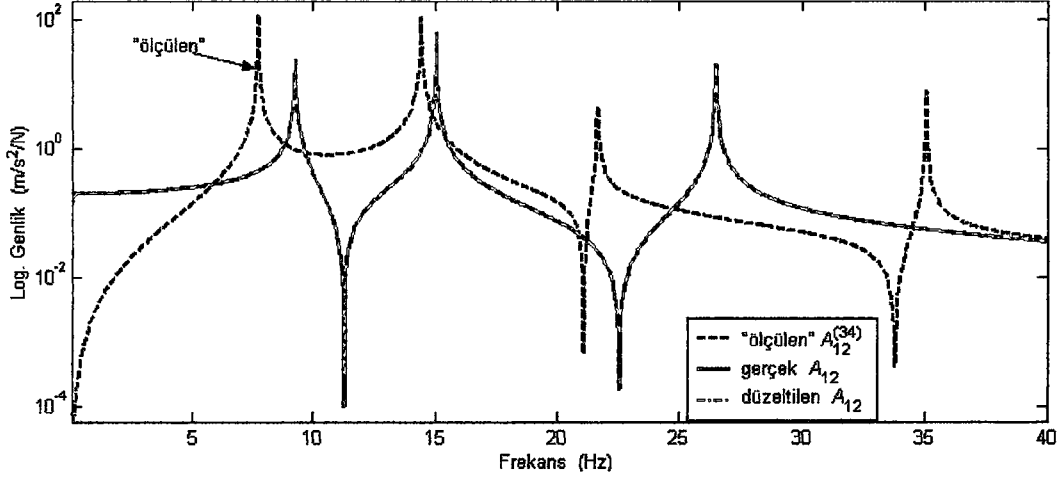
5.3.1 Sayısal Simülasyon

İki yayla mesnetli bir sistemden ölçülen FTF 'larından mesnet etkilerinin kaldırılması için önerilen yöntemin geçerliliğini ortaya koymak amacıyla Şekil 5.8 'de görülen 4 serbestlik dereceli bir kütle-yay sistemi ele alınmıştır. Şekilde x_3 ve x_4 koordinatlarındaki k_4 ve k_5 yayları askı yaylarını temsil etmektedir ve orijinal sisteme olan etkilerini belirginleştirmek için oldukça büyük seçilmişlerdir. Bu uygulamadaki amaç k_4 ve k_5 yayları sisteme bağlı iken "ölçülen" FTF $A_{12}^{(3,4)}$ üzerinden bu yayların etkilerini kaldırmaktır. Bunun için ilave olarak $A_{13}^{(3,4)}$, $A_{14}^{(3,4)}$, $A_{23}^{(3,4)}$, $A_{24}^{(3,4)}$, $A_{33}^{(3,4)}$, $A_{34}^{(3,4)}$ ve $A_{44}^{(3,4)}$ FTF 'larının ölçülmesi gerekir ki bunlar FTF matrisinde değişim koordinatlarına karşılık gelen 3. ve 4. kolonları oluşturmaktadır.

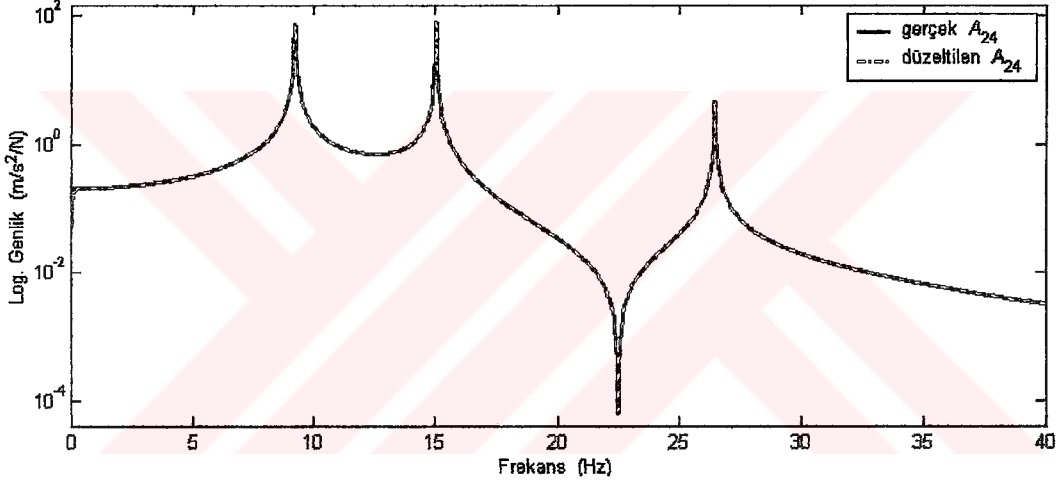


Şekil 5.8 İki yayla mesnetli mekanik bir sistem.

Mesnet etkiler önerilen yöntem ile kaldırıldıktan sonra elde edilen FTF 'larından A_{12} ve A_{24} için sonuçlar sırasıyla Şekil 5.9 ve 5.10 'da karşılaştırılmıştır. Şekil 5.9 'da askı yaylarının rijit cisim modu frekansı da dahil olmak üzere tüm rezonans frekanslarını yüksek frekanslara doğru ötelediği görülmektedir. Ancak mesnet etkileri kaldırıldıktan sonra "düzeltilen" olarak adlandırılan FTF 'larındaki rezonans frekanslarının gerçek değerleriyle çakıştığı açıkça görülmektedir. Bu sonuç yöntemin teorik olarak doğruluğunu açıkça göstermektedir.

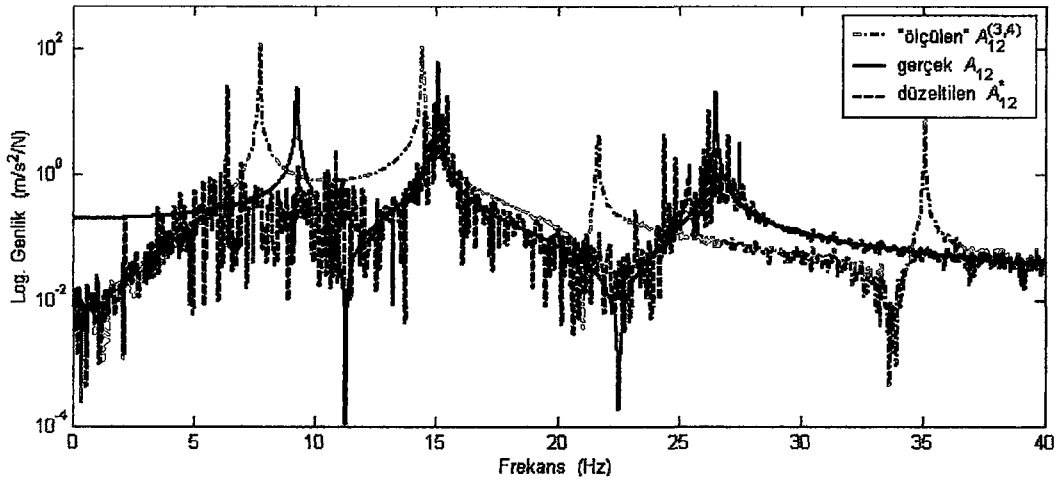


Şekil 5.9 "Ölçülen", düzeltilen ve gerçek FTF A_{12} .

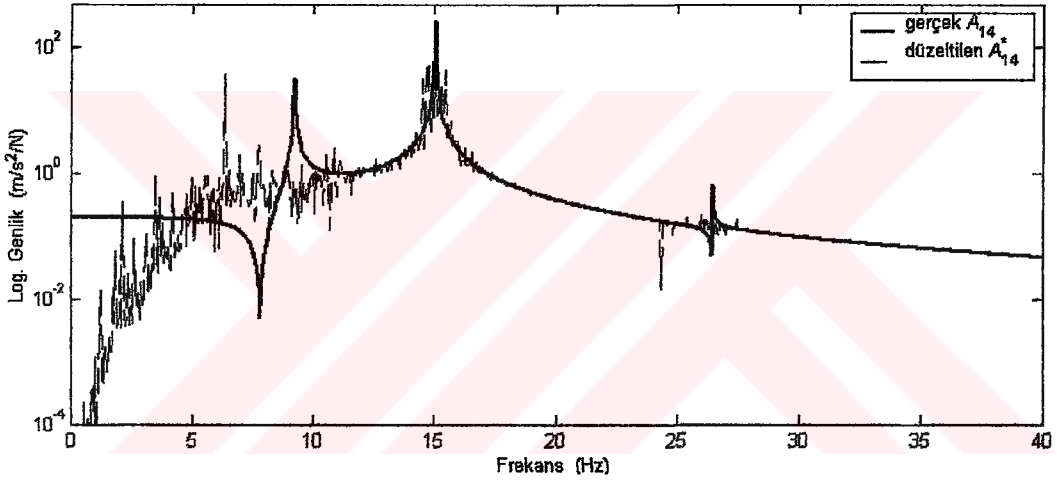


Şekil 5.10 "Ölçülen", düzeltilen ve gerçek transfer FTF A_{24} .

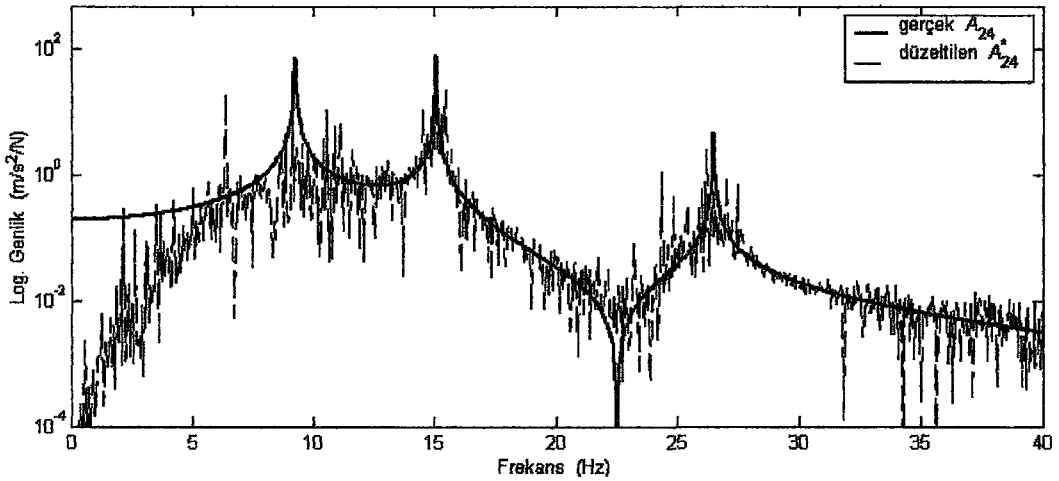
Yöntemin parazitlere karşı duyarlılığını görmek amacıyla da "ölçülen" FTF 'larına %1 oranında parazit eklenmiş ve yöntem uygulanmıştır. Bu durum için elde edilen sonuçlar da Şekil 5.11-13 'de verilmiştir. Görüldüğü gibi %1 oranındaki bir parazit seviyesi bile sonuçları olumsuz yönde etkilemektedir. Düzeltilen FTF 'larında rezonans frekansları gerçek değerlerine doğru kaymakla birlikte parazit seviyesi daha da artmakta ve FTF 'nun yapısı oldukça bozulmaktadır. Gerçek sistemlerden ölçülen FTF 'larının her zaman parazit içereceği dikkate alınırsa yöntemin pratikte uygulanabilirliği hakkında önemli şüpheler oluşmaktadır. Bu durumda ölçülen FTF 'ları üzerindeki parazitlerin ayıklanması gerektiği bir kez daha ortaya çıkmaktadır.



Şekil 5.11 "Ölçülen", düzeltilen ve gerçek transfer FTF A_{12} (%1 parazitli).



Şekil 5.12 Düzeltilen ve gerçek transfer FTF A_{14} (%1 parazitli).



Şekil 5.13 Düzeltilen ve gerçek transfer FTF A_{24} (%1 parazitli).

5.4 Sonuç ve Değerlendirme

Pratikte FTF ölçümleri çoğu zaman serbest sınır koşullarında yapılmaktadır ve bu sınır koşulunu sağlamak için yapılar hafif ve esnek kordonlarla asılmaktadırlar. Çok büyük yapılar ise esnek zeminler üstünde test edilmektedirler. Serbest sınır koşullarının sağlanması amacıyla kullanılan bu esnek elemanlar yapıda bir yay değişimi oluşturmakta ve yapının rijit cisim mod frekansı sıfırdan farklı olarak ölçülmektedir. Bu rijit cisim mod frekansının yapının en küçük eğilme modunun frekansının %10 'undan büyük olması durumunda yapının diğer doğal frekanslarının etkilenmesi de muhtemeldir. Kullanılan mesnet elemanının bir yapının dinamik özelliklerini etkileyip etkilemediğini anlamak için yapı üzerinde bir FTF ölçüldükten sonra yapı, kullanılan mesnet elemanından iki kat daha rijit bir mesnet elemanı ile asılarak aynı FTF tekrar ölçülebilir. Ölçülen bu iki FTF karşılaştırıldığında herhangi bir modda önemli bir değişim var ise bu mesnet etkisinin önemli olduğunu gösterir ve incelenen yapının gerçek dinamik özelliklerinin belirlenebilmesi için bu etkinin ölçülen FTF 'larından kaldırılması gerekir.

Bu bölümde Sherman-Morrison formülüne dayalı olarak geliştirilen değişim tekniği ölçülen FTF 'ları üzerindeki askı yaylarının etkilerinin kaldırılması amacıyla kullanılmıştır. Prensipte olarak mesnet noktalarındaki noktasal FTF 'ları ile cevap ve tahrik noktalarının mesnet noktalarıyla ilgili transfer FTF 'larının ölçülmesi şartıyla tüm FTF 'ları üzerindeki mesnet etkileri kaldırılabilir.

İncelenen sistemin en basit halde bir konumdan asıldığı varsayıldığında ölçülen herhangi bir FTF 'undaki askı yayının etkisini kaldırmak için ilave olarak iki FTF 'nun daha ölçülmesi gerekmektedir. İki konumdan asılı bir sistem için ise ilave olarak yedi tane FTF 'nun ölçülmesi gerekmektedir ve ölçülen bu transfer FTF 'ları üzerindeki askı yaylarının etkisi ardışık olarak yapılacak iki değişim ile kaldırılabilir. Bu değişimler (5.10)-(5.25) denklemleri ile verilen bir dizi işlem sonucunda gerçekleştirilmektedir. Ancak bu yaklaşım özellikle ikiden daha fazla sayıda mesnet elemanının kullanılması durumunda bazı karmaşıklıklara neden olabilir. Bu bakımdan bu işlemlerin yerine denklem (3.17) ile verilen ve sadece aktif koordinatlarla ilgili değişim denkleminin kullanılması daha sistematik bir yaklaşım olmaktadır.

Yapılan nümerik simülasyonlarda yöntemin başarılı olduğu ancak verilerdeki parazitlerden olumsuz yönde etkilendiği görülmüştür. Bu durum yöntemin pratikte uygulanabilirliği hakkında şüpheler oluşturmaktadır. Mesnet etkileri özellikle uçak ve uzay teleskopları gibi çok büyük ve esnek yapıların incelenmesi durumunda belirgin olarak ortaya çıkmaktadır. Böyle bir test düzeneğinin kurulması için laboratuvar olanaklarının yetersiz olması nedeni ile bu yöntemin deneysel uygulaması yapılamamıştır. Böyle bir çalışma ilerisi için önerilen araştırmalardan birini teşkil etmektedir.

Kullanılan mesnet elemanları yapı üzerinde yay etkisi oluşturmakla beraber bazen sönüm etkileri de oluşturabilmektedir. Böyle bir durum ile karşılaşıldığında bu sönüm etkileri Bölüm 3 'de geliştirilen (3.28) denklemi veya aktif koordinatlarla ilgili değişim denklemi (3.17) kullanılarak kaldırılabilir.

Son olarak şunu belirtmek gerekir ki transdüser kütle etkisi ve mesnet etkilerinin kaldırılması için burada önerilen yöntemlerin teorik olarak kullanılabilceği görülmekle birlikte verilerdeki parazitlerin yöntemlerin başarısını olumsuz yönde etkilediği görülmüştür. Verilerdeki parazitler sadece burada geliştirilen yöntemleri değil mekanik etkilerin kaldırılması için literatürde sunulan yöntemlerin tümünü ve diğer modal analiz uygulamalarını olumsuz yönde etkilemekte ve bu yöntemlerin pratikte uygulanabilirliklerini zorlaştırmakta ve hatta olanaksız kılmaktadır. Bu durum parazitlerin olumsuz etkisini ve ölçülmüş verilerden ayıklanması gereğini bir kez daha ortaya koymaktadır. Bu çalışmanın önemli bir kısmını teşkil eden FTF 'larındaki parazitlerin ayıklanması konusu bundan sonraki bölümlerde ele alınmıştır.

6 ÖLÇÜLMÜŞ BİR GRUP FTF 'UNDAN PARAZİTLERİN AYIKLANMASI

6.1 Giriş

Parazitler, deneysel ölçümlerin tümünde her zaman var olan ve verilerin kalitesini olumsuz yönde etkileyen önemli bir faktördür. Titreşim testlerinden ölçülmüş FTF 'larının kalitesi de parazitlerden oldukça etkilenmektedir. Bu FTF 'ları yapısal değişim, yapısal birleştirme, kuvvet belirleme gibi özellikle ters matris işlemlerini içeren uygulama alanlarında kullanılmak istendiğinde matris zayıflığı (ill-condition) nedeni ile matrislerin terslerinin alınmasında önemli zorluklar ortaya çıkmaktadır. Diğer taraftan FTF 'larındaki mekanik etkilerin kaldırılması için literatürde ve bu çalışmada geliştirilen yöntemler de parazitlerden olumsuz yönde etkilenmektedir. Teorik olarak mükemmel çalışan yöntemlerin, bu çalışmada da görüldüğü gibi, parazitler nedeniyle pratikte uygulanabilirlikleri oldukça zorlaşmakta ve hatta mümkün olmamaktadır. Ölçülmüş verilerle yapılacak analizlerin güvenilirliğini arttırmak ve deneysel uygulamalara yönelik olarak geliştirilen yöntemlerin pratikte uygulanabilirliğini kolaylaştırmak için parazitlerin bu verilerden ayıklanması önemlidir.

Deneysel verilerdeki parazitlerin ayıklanması, bu doktora tez çalışmasının önemli bir bölümünü teşkil etmektedir. Bu doğrultuda, titreşim testlerinden elde edilen FTF 'ları üzerindeki parazitlerin ayıklanması için matris teorisinden bilinen ve veri kalitesinin iyileştirilmesinde etkili bir şekilde kullanılan Tekil Değerlerine Ayrıştırma (TDA) tekniğine dayalı olarak yöntemler geliştirilmiştir. Bu bölümde TDA tekniği ile ilgili temel teorik bilgilerden sonra FTF 'ları üzerindeki parazitlerin ayıklanması için geliştirilen bir yöntem sunulmuştur. Yöntem hem sayısal simülasyonlarla hem de gerçek deneysel veriler kullanılarak irdelenmiştir. Bir sonraki bölümde de FTF 'larındaki parazitlerin ayıklanması için geliştirilen başka bir yöntem sunulacaktır.

6.2 Teori : Tekil Değerlerine Ayrıştırma – TDA

Satır ve sütunlarının sayısı M ve N olan herhangi bir $[A]$ matrisi, aşağıdaki gibi üç matrisin çarpımı şeklinde ifade edilebilir [50-53]:

$$[A]_{M \times N} = [U]_{M \times M} [\Sigma]_{M \times N} [V]_{N \times N}^T \quad (6.1)$$

Burada $[U]$ ve $[V]$ sırasıyla sol ve sağ ortogonal matrislerdir. Yani aşağıda verilen özellikleri sağlamaktadır:

$$[U]^T [U] = [U][U]^T = [I] \quad [U]^T = [U]^{-1} \quad (6.2)$$

$$[V]^T [V] = [V][V]^T = [I] \quad [V]^T = [V]^{-1}$$

$[U]$ ve $[V]$ matrisleri sırasıyla $[A][A]^T$ ve $[A]^T[A]$ çarpımlarının öz vektörleridir. Burada, $[I]$ birim matris ve $[\]^T$ matris transpozunu göstermektedir. $[\Sigma]$ köşegen tekil değerler matrisidir ve her zaman gerçeldir. $M > N$ olmak üzere $[\Sigma]$ açık olarak aşağıdaki gibi yazılır:

$$[\Sigma]_{M \times N} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_2 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \ddots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_r & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \ddots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & \sigma_N \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

Tekil değerler genellikle köşegen üzerinde sol üst köşeden başlanarak genliklerine göre büyükten küçüğe doğru sıralanırlar; $(\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_r \dots \geq \sigma_N)$. Denklem (6.1) ile verilen ayırma işlemi “Tekil Değerlerine Ayrıştırma” (Singular Value Decomposition - SVD) olarak adlandırılır ve bu çalışmada kısaca TDA olarak yazılacaktır.

Deneysel uygulamalarda, M bir ölçümde alınan örnek sayısı (sampling) ve N ise kanal sayısı olarak düşünülebilir. Böyle durumlarda genellikle $M > N$ 'dir. $M < N$ olması durumunda formülasyon geçerli olmakla beraber σ_M 'den sonraki tekil değerler ile $[U]$ matrisinin karşılık gelen satır ve sütunları sıfır olacaktır. Diğer taraftan $[A]$ matrisinin kompleks olması durumunda (6.1) ve (6.2) denklemlerinde $[\]^T$ işareti yerine kompleks eşleniğin transpozunu gösteren Hermityen matris işareti $[\]^H$ kullanılacaktır. $[A]$ veri matrisi kompleks olsa bile tekil değerler matrisi gerçel kalmaktadır.

Eğer bir matris tekil ise en son tekil değerlerinden en az birinin sıfır olması beklenir. Ancak pratik uygulamalarda sıfır olması beklenen bu tekil değerler çok küçük genliklerde olup bir ε hassasiyet sayısının altında kalmaktadırlar. Bu halde $[A]$ matrisi için tekile yakındır denir. ε sayısından büyük olan elemanların sayısı, r , $[A]$ matrisinin rankını belirtir. Rank değeri bu matrisin birbirinden bağımsız satırlarının veya sütunlarının sayısını belirtir. Büyük ve küçük genlikli tekil değerler aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\begin{aligned} \sigma_i &> \varepsilon & i = 1, \dots, r \\ \sigma_i &\leq \varepsilon & i = r + 1, \dots, N \end{aligned} \quad (6.4)$$

Belirlenen bu rank değerine uygun olarak $[U]$, $[\Sigma]$ ve $[V]$ matrisleri aşağıdaki gibi alt matrisler formunda yazılabilirler:

$$[U]_{M \times M} = [[U_r]_{M \times r} \quad [U_0]_{M \times (M-r)}] \quad (6.5a)$$

$$[V]_{N \times N} = [[V_r]_{N \times r} \quad [V_0]_{N \times (N-r)}] \quad (6.5b)$$

$$[\Sigma]_{M \times N} = \begin{bmatrix} [\Sigma_r] & 0 \\ 0 & [\Sigma_0] \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6.5c)$$

Buna uygun olarak $[A]$ matrisi,

$$[A]_{M \times N} = \begin{bmatrix} [U_r] & [U_0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Sigma_r] & 0 \\ 0 & [\Sigma_0] \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [V_r] & [V_0] \end{bmatrix}^T \quad (6.6)$$

biçiminde tekrar yazılabilir. Tekil değerler matrisinde $[\Sigma_r]$ alt matrisi, r tane büyük genlikli tekil değeri içermektedir ve bunlar gerçek veri uzayını oluşturmaktadır. Kalan $N-r$ tane sıfır veya sıfıra çok yakın tekil değerler de $[\Sigma_0]$ alt matrisini oluşturmaktadır. Küçük genlikli tekil değerlerin, TDA işlemi sırasındaki sayısal hassasiyet hatalarından, gerçek deneysel verilerden oluşan bir $[A]$ matrisi söz konusu olduğunda da verilerdeki parazitlerden kaynaklandığı söylenebilir. Buna göre $[U_r]$ ile $[V_r]$ gerçek veri uzayını, $[U_0]$ ile $[V_0]$ ise sıfır uzayını oluşturur. Deneysel verilerde bu sıfır uzayında parazitler olacağı için buraya parazit uzayı da denilmektedir [53].

6.3 Verilerdeki Parazitlerin TDA İle Ayıklanması Tekniği

Deneysel olarak ölçülmüş bir veri, gerçek veri ve çeşitli yollarla verilere katılan parazitlerin birleşiminden oluşmaktadır. Bu halde ölçülmüş veri matrisi $[A]$, gerçek veri matrisi $[\bar{A}]$ ve parazitleri temsil eden $[P]$ matrisinin toplamı olarak yazılabilir:

$$[A] = [\bar{A}] + [P]. \quad (6.7)$$

Ölçülmüş verilerden oluşan böyle bir $[A]$ matrisi göz önüne alındığında, TDA işleminden sonra sıfır olması beklenen tekil değerler, verilerdeki parazitlerden dolayı sıfırdan uzaklaşmakta, ancak bir ε sayısının da altında kalmaktadır. O halde (6.6) denkleminde ε sayısından küçük olan tekil değerler ile $[U]$ ve $[V]$ matrislerinde bunlara karşılık gelen vektörler sıfırlanarak veya sadece $[U_r]$, $[\Sigma_r]$ ve $[V_r]$ matrisleri göz önüne alınarak gerçek veri matrisi $[\bar{A}]$ yaklaşık olarak aşağıdaki gibi elde edilebilir:

$$[\bar{A}] = [U_r][\Sigma_r][V_r]^T \quad (6.8)$$

Bu işlem, TDA ile veriler üzerindeki parazitlerin ayıklanmasına ilişkin temel fikri oluşturmaktadır (Eckard-Young teoremi, bakınız: Ek B).

(6.8) denklemini aşağıdaki biçimlerde de ifade etmek mümkündür:

$$[\bar{A}] = [U_r][U_r]^T[A] = [A][V_r][V_r]^T \quad (6.9)$$

Burada $[U_r][U_r]^T$ ve $[V_r][V_r]^T$, $[\bar{A}]$ 'yı elde etmek için doğrudan veri matrisi $[A]$ 'ya uygulanan bir filtredir. $[U_r]$ ve $[V_r]$ doğrudan veriden elde edildiği için de denklem (6.9) bir data-adaptive Wiener filtre olarak yorumlanır [58].

Burada dikkat edilmesi gereken en önemli husus, r değerinin uygun seçilmesi yani gerçek veri ve parazit arasındaki sınırın belirlenmesidir. Bu değer olması gerekenden küçük seçilmesi, verideki gerçek bilgilerin kaybedilmesine neden olabilir. Bu r değerinin seçilmesinde, pratik olarak tekil değerlerin grafiksel çizimlerinden faydalanılmaktadır. Bu amaçla bütün tekil değerler en büyük genlikli olan birinci tekil değere bölünerek normalize edilir ve logaritmik ekseninde çizilir. Bu normalize değerlerin sıfıra yaklaştığı ve genliğinde önemli bir değişimin olmadığı konumda uygun rank seçimi yapılabilir. Uygulanabilecek diğer bir yöntem ise her bir tekil değer bir öncekine bölünüp normalize edilerek grafiğinin çizilmesidir. Bu çizimde her oran değerinin yaklaşık bir olması beklenir. Bu genliğin ani düşüş gösterdiği konum rank değeri olarak seçilebilir [21]. İncelenen veri için uygun rank değeri bu yöntemlerden biriyle belirlendikten sonra Sinyal-Parazit oranı da aşağıdaki ifade ile hesaplanabilir [52, 65, 84].

$$\text{sinyal - parazit oranı} = \sum_{i=1}^r \sigma_i / \sum_{i=r+1}^N \sigma_i \quad (6.10)$$

Yukarıda verilen TDA tekniği literatürde ölçülmüş verilerin kalitesinin iyileştirilmesinde geniş bir şekilde kullanılmıştır. Yapısal dinamikte de verilerin kalitesinin incelenmesi ve belirli modal test uygulama alanları için kaliteli yöntemlerin geliştirilmesi amacıyla bu teknikten faydalanılmıştır [67-84]. Pickrel [84] ölçülmüş bir grup FTF 'undan oluşturulmuş veri matrisine TDA tekniğini uygulayarak FTF 'larının kalitesini incelemiş ancak parazitleri ayıklamaya çalışmamıştır. Burada Pickrel 'in çalışmasının doğal genişlemesi olarak FTF 'larındaki parazitlerin ayıklanması için TDA tekniği kullanılarak yeni bir yöntem geliştirilmiştir.

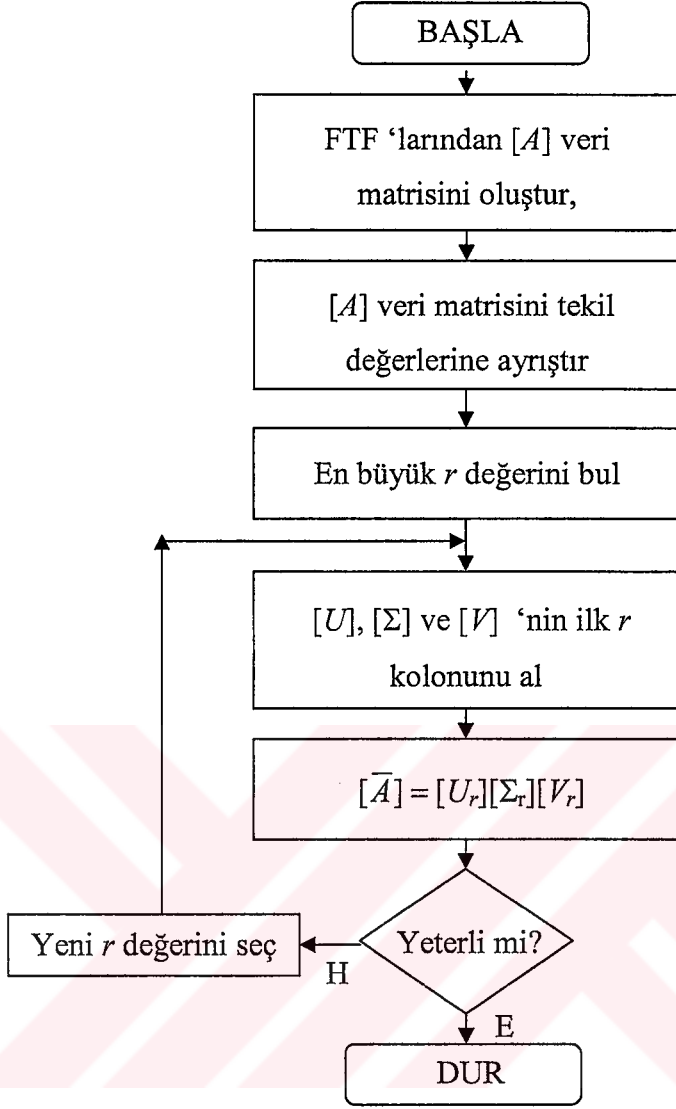
6.4 Frekans Tepki Fonksiyonlarındaki Parazitlerin Ayıklanması

Pek çok çalışmada, özellikle modal test uygulamalarında, incelenen yapı üzerinde çeşitli noktalarda çok sayıda FTF ölçülmektedir. Yukarıda verilen TDA 'ya dayalı yöntemin kullanılabilmesi için öncelikle yapılan bu ölçümler bir araya getirilerek $[A]$ veri matrisinin oluşturulması gerekir. Pratikteki bir çok uygulamada da deneysel ölçümlerden $M \times N$ boyutunda bir $[A]$ matrisi oluşturulabilir. Burada N kanal veya ölçüm sayısı, M ise her bir ölçümde alınan örnek sayısı yani verinin uzunluğudur ve çoğu zaman $M > N$ 'dir. FTF verilerine TDA tekniğini uygulayabilmek için ölçülen her bir FTF, veri matrisinin bir kolonunu oluşturacak şekilde aşağıdaki gibi bir araya getirilerek $[A]$ matrisi oluşturulabilir:

$$[A]_{M \times N} = \left[\begin{array}{c|c|c|c|c} \left. \begin{array}{c} H_{11}(\omega_1) \\ H_{11}(\omega_2) \\ \vdots \\ \vdots \\ H_{11}(\omega_M) \end{array} \right\} & \left. \begin{array}{c} H_{12}(\omega_1) \\ H_{12}(\omega_2) \\ \vdots \\ \vdots \\ H_{12}(\omega_M) \end{array} \right\} & \dots & \left. \begin{array}{c} H_{pq}(\omega_1) \\ H_{pq}(\omega_2) \\ \vdots \\ \vdots \\ H_{pq}(\omega_M) \end{array} \right\} & \dots \end{array} \right] \quad (6.11)$$

Burada $\{H_{pq}\}$ bir FTF vektörü olmak üzere q kuvvet uygulama konumunu ve p cevap ölçüm konumunu göstermektedir. M bir ölçümde alınan örnek veya frekans sayısı, N ise ölçülen FTF sayısıdır. Bu şekilde oluşturulan FTF matrisine yukarıda açıklanan parazit ayıklama tekniği uygulanabilir.

TDA 'ya dayalı yöntem ile FTF 'larındaki parazitlerin ayıklanması için akış diyagramı Şekil 6.1 'de verilmiştir. Bu tekniğin başarılı bir şekilde uygulanmasındaki en önemli parametre uygun rank değerinin seçimidir. Bu nedenle akış diyagramında bir kontrol ünitesi vardır. Bu algoritmanın pratikte kolayca uygulanabilmesi için MATLAB kullanılarak interaktif bir yazılım hazırlanmıştır (Ek C).



Şekil 6.1 TDA tekniği ile FTF 'larındaki parazitlerin ayıklanması için akış diyagramı.

Aşağıda bu teknik ile FTF 'ları üzerindeki parazitlerin ayıklanması sayısal simülasyonlarla ve deneysel verilerle kullanılarak detaylı olarak irdelenecektir. Ancak daha önce FTF verilerinden denklem (6.11) 'deki gibi oluşturulan $[A]$ matrisi tekil değerlerine ayrıştırıldıktan sonra hesaplanabilen ve Genelleştirilmiş Tepki Fonksiyonu (GTF) (Principal Response Function (PRF)) olarak adlandırılan ve modal analizde önemli yararları olan bir fonksiyon daha vardır. Bu fonksiyonun özellikleri aşağıda incelenmiştir.

6.5 Genelleştirilmiş Tepki Fonksiyonu

FTF 'larından oluşan $[A]_{M \times N}$ matrisi TDA işlemi ile üç ayrı matrisin çarpımı olarak ifade edildikten sonra aşağıdaki gibi yeni bir GTF matrisi oluşturulabilir:

$$[U]_{M \times M} [\Sigma]_{M \times N} = [A]_{M \times N} [V]_{N \times N} = [G]_{M \times N} . \quad (6.12)$$

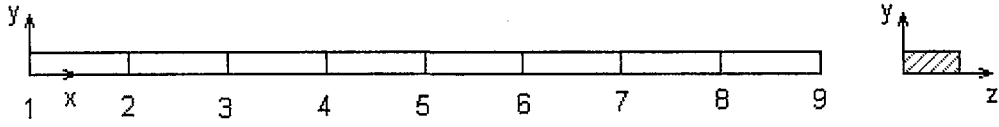
FTF 'larının bu şekilde GTF 'larına dönüştürülmesi orijinal koordinat sisteminin yeni bir koordinat sistemine dönüşümü olarak yorumlanabilir. GTF 'ları ortogonal vektörlerdir ve orijinal FTF 'ları ile benzer özelliklere sahip olmakla beraber bazı avantajlar da sağlamaktadır. Her bir GTF temel olarak gerçek FTF 'larının özel bir kombinasyonudur. Buna bağlı olarak her bir GTF, bu FTF 'larındaki öz değerler gibi önemli bilgileri içermektedir. Yani GTF 'larının modal analizinden her bir modun öz değer özelliklerini bulmak mümkündür [1, 3, 84]. Parazitlerin ayıklanması için geliştirilen yöntem sayısal simülasyonlarla incelenirken ortaya çıkacak bazı olayların açıklanabilmesi için yeri geldiğinde GTF 'larından yararlanılacaktır.

Bunun yanında TDA, özel olarak modal analizde bazı fiziksel önemlere sahiptir ve bunlar şöyle özetlenebilir [1, 84]:

FTF 'larından oluşan bir $[A]$ matrisi tekil değerlerine ayrıştırıldıktan sonra,

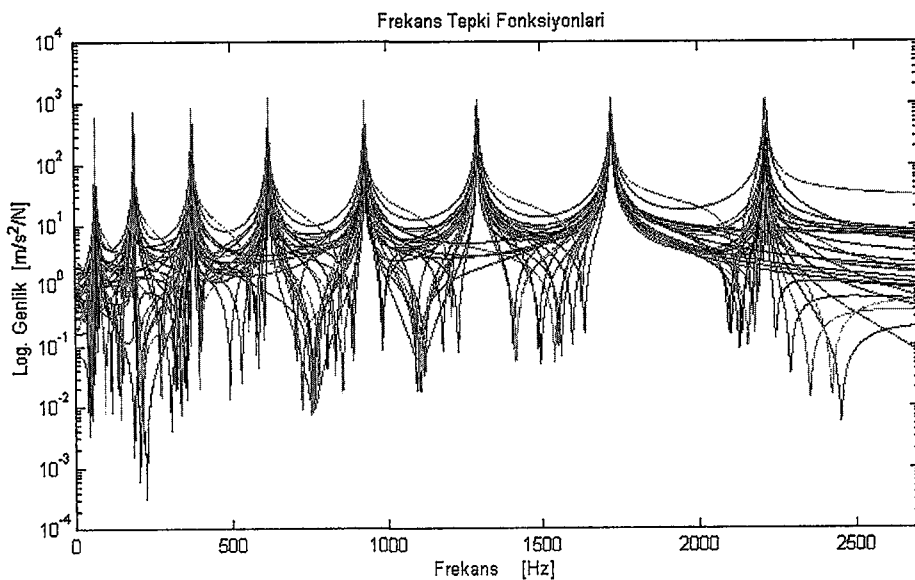
- $[U]$ 'nun kolonları, incelenen yapıya ait normal modların lineer kombinasyonlarından oluşmakta ve frekans dağılımını göstermektedir.
- Tekil değerler matrisi $[\Sigma]$, $[U]$ 'nun kolonları için ağırlık katsayılarını kapsamaktadır. Bir başka deyişle genlik dağılımını göstermektedir.
- $[V]$ matrisi ise, bu vektörlerin $[A]$ matrisi içinde nasıl birleştiğini bir başka deyişle uzaysal dağılımını göstermektedir.
- Sıfırdan farklı olan tekil değerlerin sayısı, yani $[A]$ matrisinin rankı, incelenen frekans aralığında etkisi hissedilen mod sayısına eşittir.

6.6 Sayısal Simülasyon



Şekil 6.2 Sayısal simülasyon için seçilen dikdörtgen kesitli serbest-serbest kiriş.

FTF 'ları üzerindeki parazitlerin ayıklanması için geliştirilen yöntemin geçerliliğini göstermek ve performansını incelemek amacıyla Şekil 6.2 'de gösterilen serbest-serbest sınır şartlarına sahip dikdörtgen kesitli bir kiriş ele alınmıştır. Kirişin boyutları; $0.8 \times 0.001 \times 0.025 \text{ m}^3$ ve mekanik özellikleri; Elastisite modülü $E=207 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$, yoğunluğu $\rho=7800 \text{ kg/m}^3$ ve poisson oranı $\nu=0.3$ olarak seçildi. FINES yazılımı kullanılarak kirişin sonlu elemanlar modeli oluşturuldu ve 0-2700 Hz frekans aralığındaki doğal frekansları ile mod biçimleri hesaplandı. Kirişin y yönündeki titreşimleri göz önüne alınarak kiriş üzerinde seçilen 9 nokta için toplam $9 \times 9=81$ tane FTF 0-2700 Hz aralığında $N=2048$ frekans değeri için hesaplanmış ve bunlar Şekil 6.3 'de gösterilmiştir. Kirişin 0-2700 Hz frekans aralığında rijit cisim modu haricinde toplam 8 modu olduğu görülmektedir. Yöntemin uygulanmasında önemli olan parametreler bu örnek üzerinde aşağıda ayrı başlıklar altında irdelenecektir.

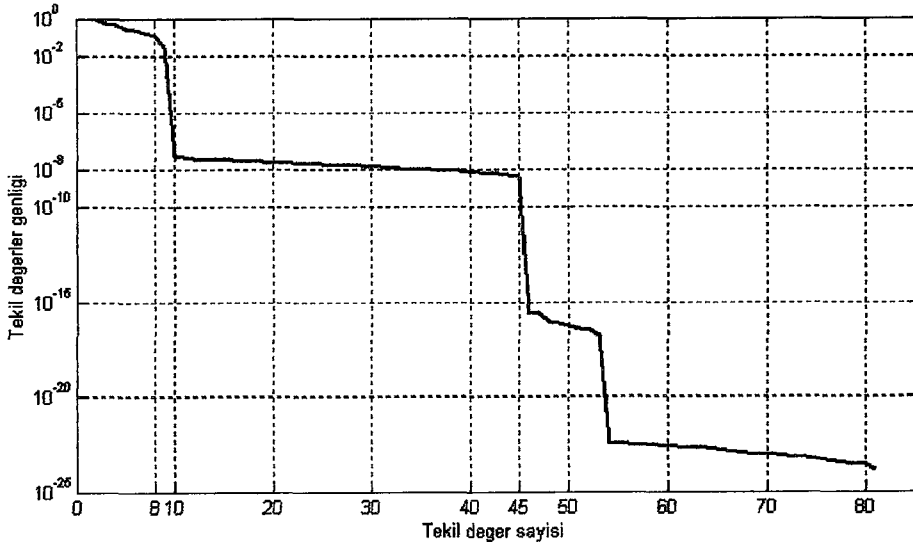


Şekil 6.3 Serbest-serbest kirişin hesaplanan frekans tepki fonksiyonları (FTF).

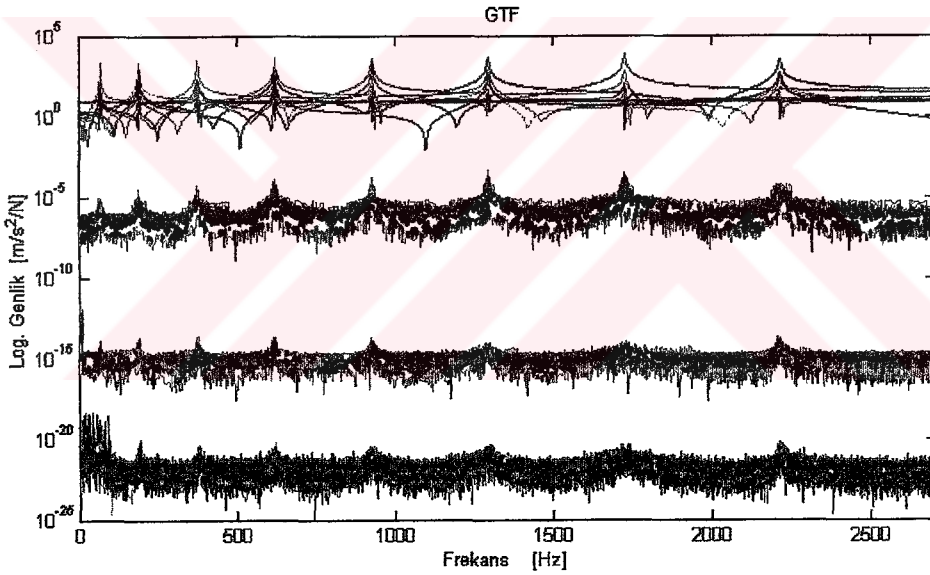
6.6.1 Tekil Değerler İle Mod Sayısı Arasındaki İlişki

Tekil değerler bir matrisin satırlarının veya sütunlarının birbirleri ile olan doğrusal ilişkilerinin bir derecelendirmesi olarak düşünülebilir. Büyük tekil değerler bağımsızlığı gösterirken sıfır veya sıfıra çok yakın tekil değerler bağımlılıktan kaynaklanır. Dolayısı ile, daha önce de belirtildiği gibi, büyük tekil değerlerin sayısı bu matrisin rank değerini verir. FTF 'larından oluşan bir matris göz önüne alındığında büyük tekil değerler incelenen sistemin derecesi ile, bir başka deyişle, birbirinden bağımsız mod sayısı ile ilgilidir.

Örnek sistem için hesaplanan tüm FTF 'larından denklem (6.11) formuna uygun olarak veri matrisi oluşturulduktan sonra tekil değerlerine ayrıştırılmış ve elde edilen tekil değerler Şekil 6.4 'de grafiksel olarak verilmiştir. Bu grafikte tüm tekil değerler büyükten küçüğe doğru sıralanmış, birinci yani en büyük genlikli tekil değere bölünerek normalize edilmiş ve logaritmik ekseninde çizilmiştir. Grafikte, tekil değerlerin genliğinde incelenen sistemin mod sayısına karşılık gelen 9. tekil değerden sonra ani bir düşüş olduğu açıkça görülmektedir. Dokuzuncu tekil değer genliği 10^{-2} civarında iken, normalize edilmiş onuncu tekil değer genliği 10^{-8} seviyesindedir. Diğer bir ani genlik düşüşü de 45. tekil değerde görülmektedir ki bunun nedeni şöyle açıklanabilir: İncelenen sistem için veri matrisi oluşturulurken seçilen 9 noktanın farklı kombinasyonları için toplam 81 tane FTF hesaplanmış ve tekil değerlerin hesabında bunların hepsi birlikte kullanılmıştır. Ancak FTF matrisinin simetrik olduğu hatırlanacak olursa ($H_{pq}=H_{qp}$) bu FTF 'larından sadece 45 ($=9 \times (9+1)/2$) tanesi bağımsızdır. Tekil değerlerin bu FTF 'ları arasındaki ilişkiyi verdiği göz önüne alınırsa 45. tekil değerden sonrakilerin genlikleri sıfıra yaklaşacaktır. Şekil 6.5 'de verilen genelleştirilmiş tepki fonksiyonları (GTF) grafiğinde de 81 tanesinden sadece 9 tanesinin büyük genlikli, diğerlerinin ise bunların yanında çok küçük genliklere sahip olduğu görülmektedir. Yine büyük genlikli GTF 'larının sayısı, incelenen sistemin ilgili frekans aralığındaki mod sayısı ile ilişkilidir. Buradan modal testten bilinen bir sonuç elde edilmektedir ki ; incelenen bu sistemin modal analizi için 81 tane FTF yerine sadece uygun 9 tane FTF 'nun ölçülmesi yeterlidir. Not olarak belirtilecek olursa, küçük genlikli GTF 'ları atılıp sadece büyük genlikli GTF 'ları kullanılarak parazitlerden ayıklanmış $[\bar{A}]$ matrisini oluşturmak mümkündür.



Şekil 6.4 81 FTF için hesaplanan tekil değerler grafiği.

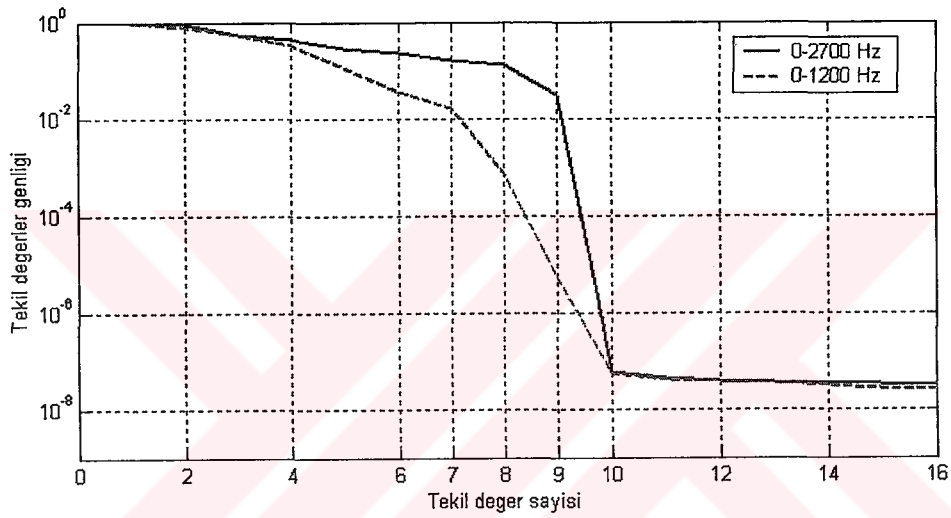


Şekil 6.5 Serbest-serbest kirişin genelleştirilmiş tepki fonksiyonları (GTF).

6.6.2 Frekans Bandının Tekil Değerlere Etkisi

Bilindiği gibi modal analizdeki kısıtlardan biri frekans bandıdır. Ölçülmüş bir FTF belirli bir frekans aralığı ile sınırlıdır. Bu durumda ölçümde dikkate alınmayan ancak gerçekte var olan modların da FTF üzerinde ve dolayısı ile de tekil değerler üzerinde etkisi bulunmaktadır. FTF 'larının hesabında göz önüne alınan frekans bandının, bir başka deyişle hesaba katılmayan artık modların, tekil değerler üzerindeki etkisini incelemek üzere aynı sistemin FTF 'ları 0-1200 Hz frekans aralığında tekrar

hesaplanmıştır. Bu frekans aralığında 5 tane mod gözükmele birlikte diğer modların etkileri FTF 'larında bulunmaktadır. Bu frekans bandı için elde edilen tekil değerler önceden 0-2700 Hz frekans aralığı için bulunan tekil değerler ile Şekil 6.6 'da karşılaştırılmıştır. Bu grafikte frekans aralığı dışında kalan modların tekil değerleri etkilediği; büyük genliklilerden özellikle 9. tekil değerın parazit sınırına yaklaştığı görülmektedir. Bu durumda etkin rank değerinin, 0-2700 Hz için 9 iken 0-1200 Hz için 8 olduğu söylenebilir. Gerçek sistemler göz önüne alındığında, sonsuz sayıdaki modlardan söz edilir. Frekans bandı sınırlandırıldığı zaman artık modların etkisi parazit seviyesinin altında ise bu modların etkisi ölçülemeyecektir.

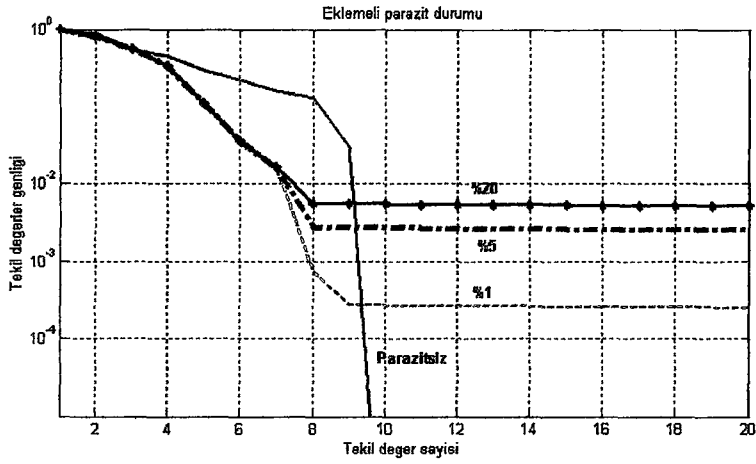


Şekil 6.6 Artık modların tekil değerlere etkisi.

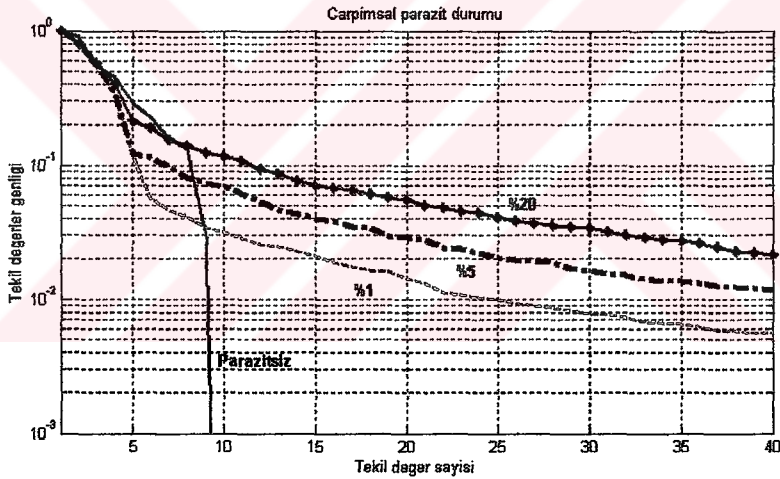
6.6.3 Parazitlerin Tekil Değerlere Etkisi

Deneysel ölçümlerde verilere katılan parazitler çok çeşitlidir ve bunların yapılarını tam olarak anlamak ve matematiksel olarak ifade etmek olanaksızdır. Yine de bilgisayar ortamında rastlantısal sayılar kullanılarak parazitler simule edilebilmektedir. İstatistiksel özelliklerine göre 'additive white noise' ve 'multiplicative noise' olarak bilinen ve burada sırasıyla 'eklemeli' ve 'çarpımsal' tip parazit olarak adlandırılan iki tip parazit türü simülasyonlarda sıkça kullanılmaktadır. Burada da parazitli FTF 'larını simule etmek için bu iki parazit türü kompleks olarak çeşitli oranlarda bilgisayar ortamında üretilerek önceden hesaplanmış olan gerçek FTF 'larına eklenmiştir. Bu parazitlerin hesaplanması ve yapıları Ek D 'de verilmiştir.

Parazitsiz, %1, %5 ve %20 oranlarındaki eklemeli ve çarpımsal tip parazitli FTF 'ları için elde edilen tekil değerlerin grafikleri sırasıyla Şekil 6.7 ve 6.8 'de verilmiştir.



Şekil 6.7 Eklemeli parazitlerin tekil değerler üzerindeki etkisi.

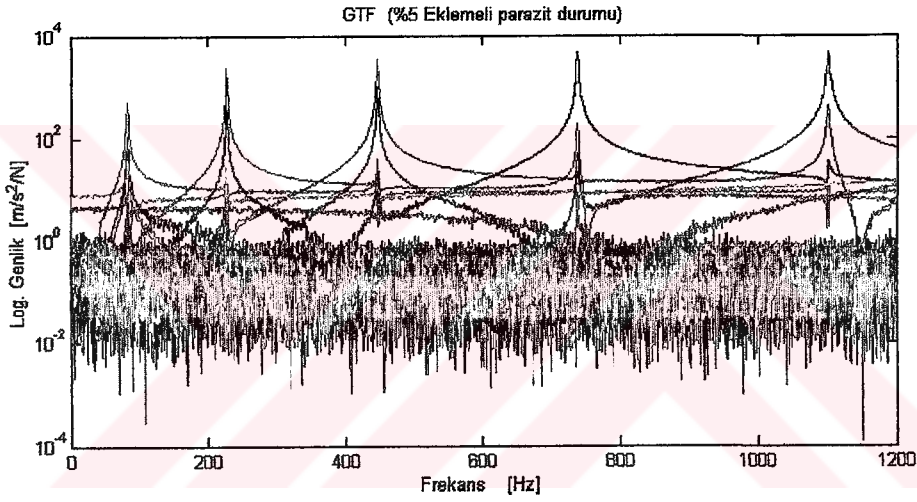


Şekil 6.8 Çarpımsal parazitlerin tekil değerler üzerindeki etkisi.

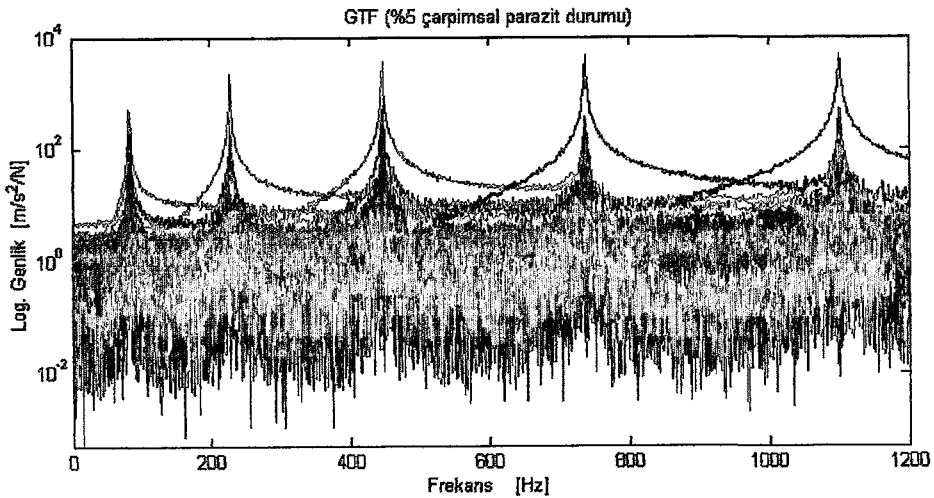
Burada artık modların etkisini de simule etmek için 0-1200 Hz frekans aralığında hesaplanan FTF 'ları kullanılmıştır. Bu grafiklerde tekil değerlerin, eklenecek parazitlerden önemli ölçüde etkilendiği ve parazit oranı arttıkça küçük genlikli tekil değerlerin de büyüdüğü açıkça görülmektedir. Bu durum gerçekte birbiri ile doğrusal ilişkili olan satır veya sütunların parazit nedeniyle bu bağımlılığını bir miktar kaybettiğini göstermektedir. Bu tür veri kaybı özellikle çarpımsal tip parazit durumunda daha da belirgin olarak ortaya çıkmaktadır. Diğer taraftan eklemeli parazit durumunda çarpımsal parazit durumundan farklı olarak tekil değer genlikleri parazit oranına göre belirli bir konumdan sonra değişmemekte ve grafikte yatay bir

çizgi oluşturmaktadır. Bu özellikle eklemeli parazit durumunda etkin rank değerinin belirlenmesini kolaylaştırırken çarpımsal parazit durumunda zorlaştırmaktadır. Bu sonuç parazitlerin istatistiksel yapısından kaynaklanmaktadır.

Hatırlanacağı gibi eklemeli parazit frekans eksenini boyunca düzgün bir dağılıma sahip iken çarpımsal parazit her frekansta FTF genliği ile çarpılmaktadır. Dolayısıyla bu tip parazitler FTF 'nın genel yapısı ile benzerlik içermektedir (bakınız : Ek D). Bu durum %5 oranındaki eklemeli ve çarpımsal tip parazitler için hesaplanan ve sırasıyla Şekil 6.9 ve 6.10 'da verilen GTF grafiklerinde de görülebilir: Eklemeli parazit durumunda düşük genlikli GTF 'ları frekans eksenini boyunca düzgün bir dağılım gösterirken çarpımsal parazit durumunda bunlar FTF biçimini almaktadır.



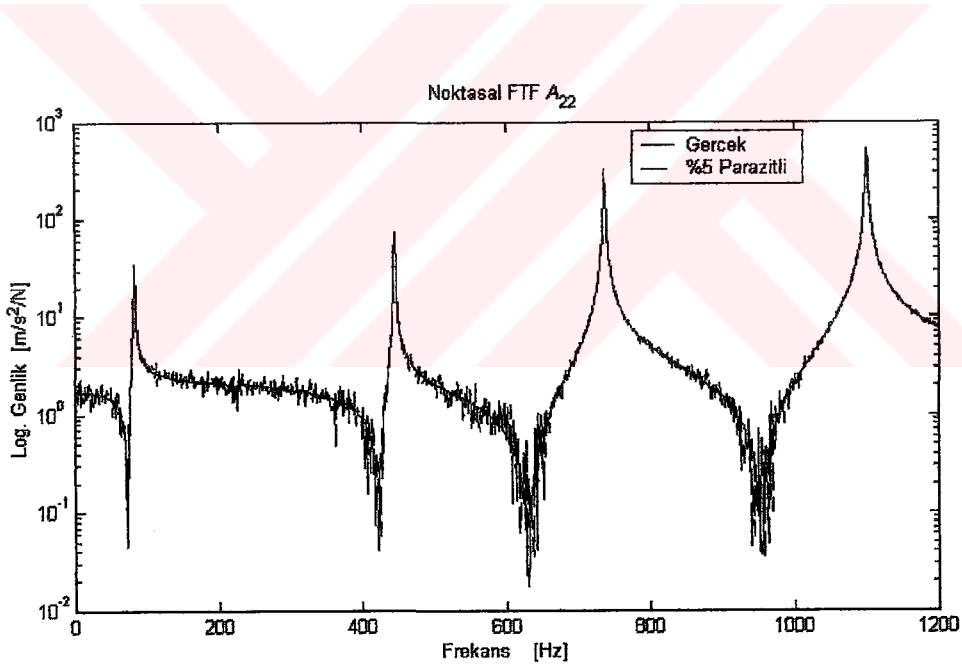
Şekil 6.9 %5 Eklemeli parazit durumunda genelleştirilmiş tepki fonksiyonları.



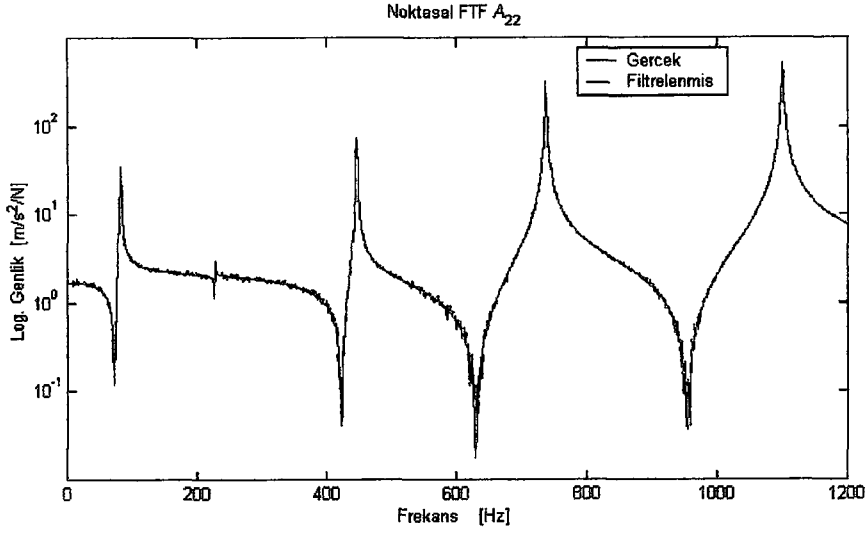
Şekil 6.10 %5 Çarpımsal parazit durumunda genelleştirilmiş tepki fonksiyonları.

6.6.4 Yöntemin Geçerliliği ve Performansının İncelenmesi

Geliştirilen yöntemin geçerliliğini ve performansını incelemek için yöntem önce %5, %10 ve %20 oranlarında eklemeli parazitli FTF 'larına uygulanarak incelenmiştir. Parazitsiz (gerçek) ve %5 eklemeli parazitli noktasal FTF A_{22} Şekil 6.11 'de aynı grafik üzerinde çizilerek bu parazitin FTF üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Şekil 6.7 'de %5 eklemeli parazit durumu için tekil değerler grafiğine bakılarak rank değerinin 7 olduğu söylenebilir. Bu 7 tane büyük genlikli tekil değer dikkate alınarak (6.8) denklemi ile parazitler ayıklandıktan sonra elde edilen ve 'filtrelenmiş' olarak adlandırılan FTF, gerçek değerleriyle Şekil 6.12 'de karşılaştırılmıştır. Burada geliştirilen yöntem ile eklemeli tip parazitlerin FTF 'larından önemli ölçüde ayıklandığı ve yöntemin başarılı olduğu açıkça görülmektedir. Farklı oranlardaki (%10 ve %20) parazit durumları için elde edilen sonuçlar Ek E 'de verilmiştir.

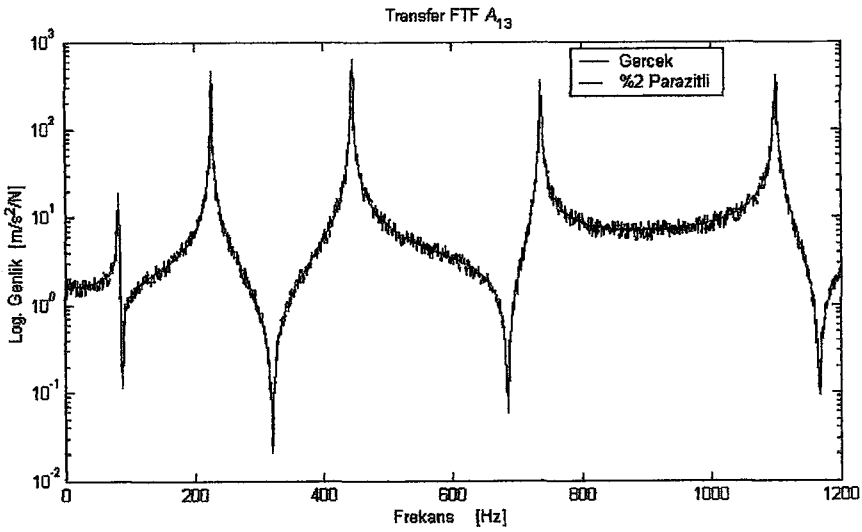


Şekil 6.11 Gerçek ve %5 eklemeli parazitli FTF A_{22} .

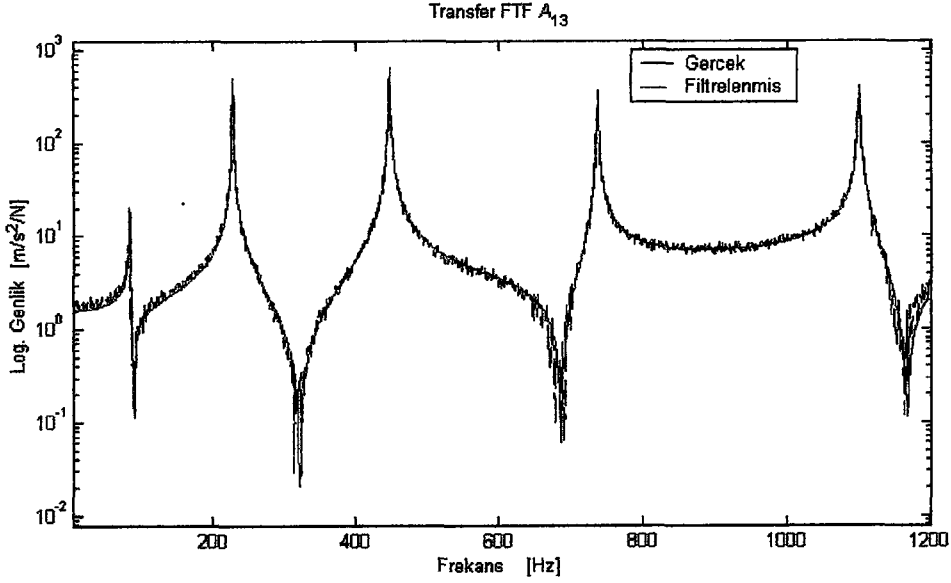


Şekil 6.12 Gerçek ve filtrenmiş FTF A_{22} 'nin karşılaştırılması (%5 eklemeli parazit durumu).

Çarpımsal tip parazitli durum için parazitsiz ve %2 parazitli FTF A_{22} Şekil 6.13 'de karşılaştırılmıştır. Şekil 6.14 'de rank değeri 24 seçilerek yöntem uygulandıktan sonra elde edilen filtrenmiş FTF 'nun gerçek değerleriyle karşılaştırmasında görüldüğü gibi çarpımsal parazit durumunda bir miktar parazit ayıklanmasına rağmen istenildiği kadar iyi bir ayıklama gerçekleştirilememektedir. Buradaki başarı seviyesinin düşüklüğü tekil değer ve GTF grafiklerinde de görüldüğü gibi çarpımsal parazitin yapısı nedeniyle sinyal-parazit sınırının belirlenmesindeki zorluktan kaynaklanmaktadır.

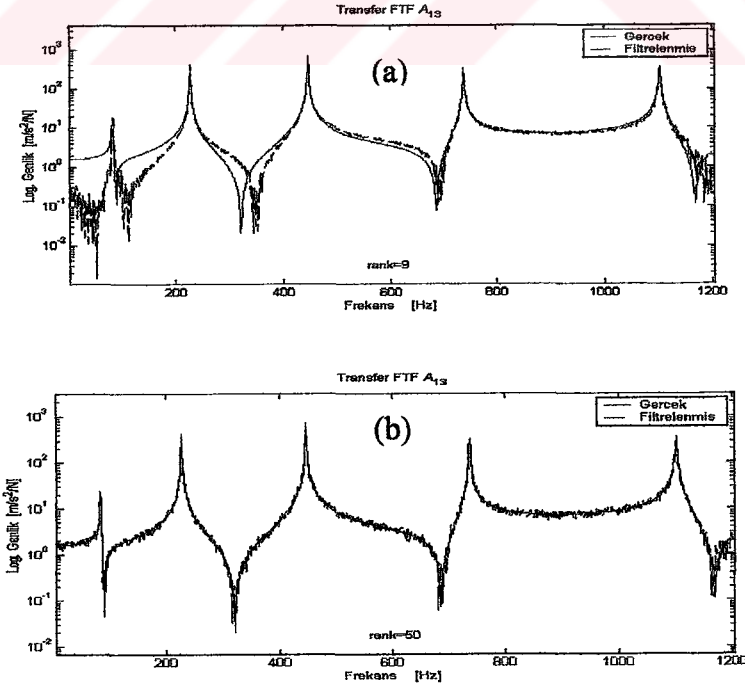


Şekil 6.13 Gerçek ve %2 çarpımsal parazitli FTF A_{13} .



Şekil 6.14 Gerçek ve filtrenmiş FTF A₁₃ 'ün karşılaştırılması.

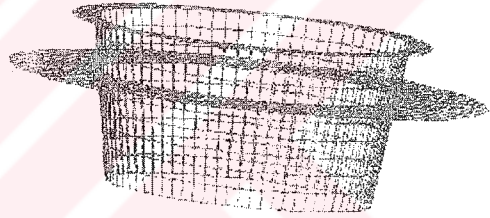
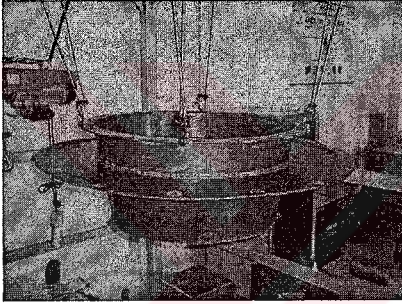
Diğer taraftan rank değerinin olduğundan küçük seçilmesi verideki gerçek bilgilerin kaybedilmesine neden olmaktadır. Buna karşın rank değerinin büyük seçilmesi halinde de parazitler yeterince ayıklanamamaktadır (Şekil 6.15b). Bu durumlar Şekil 6.15 'de rank değerinin 9 ve 50 seçilmesi ile elde edilen sonuçlarla da açık bir şekilde ortaya konulmuştur.



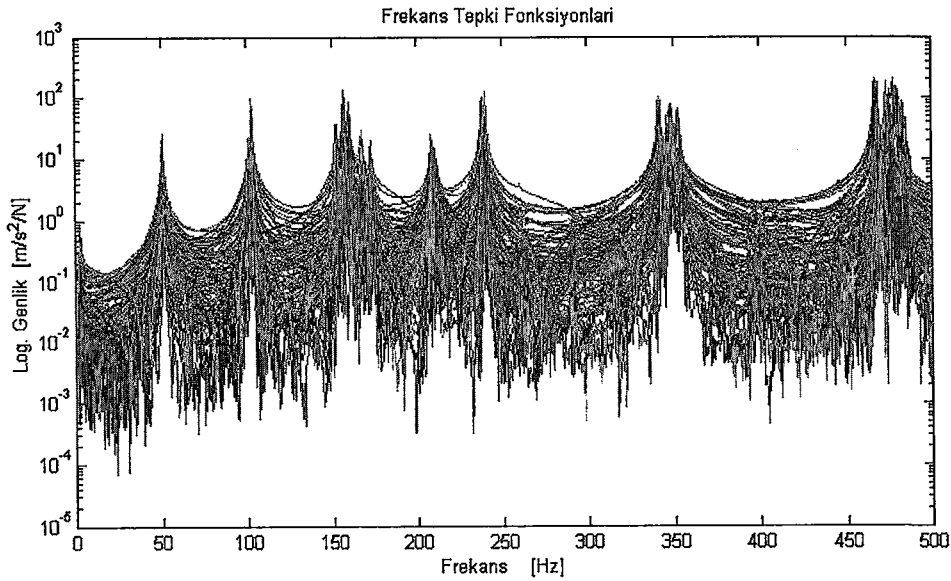
Şekil 6.15 Rank değerinin a) $r=9$ ve b) $r=50$ seçilmesi durumunda elde edilen sonuçlar.

6.7 Deneysel Uygulama

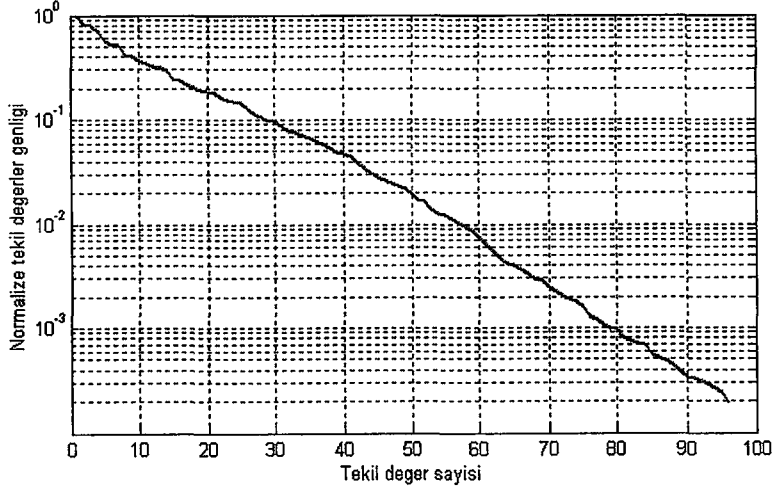
Yöntemin deneysel olarak ölçülmüş FTF 'ları üzerindeki performansını görmek amacıyla Şekil 6.16 'da görülen bir fan kapağından ölçülen FTF 'ları incelenmiştir. Bu yapıdan 0-500 Hz aralığında 1601 frekansta ölçülen 96 tane FTF Şekil 6.17 'de görülmektedir. Yöntem uygulandıktan sonra elde edilen tekil değerlerin grafiği de Şekil 6.18 'de verilmiştir. Tekil değer grafiğinde görüldüğü gibi bu sistemde komşu tekil değerler birbirine oldukça yakındır ve etkin rank değerini belirlemek, bir başka deyişle sinyal-parazit sınırını belirlemek oldukça zordur. Şekil 6.19 'da verilen GTF grafiğinde de bütün GTF 'larının genliklerinin hemen hemen aynı seviyelerde olduğu açıkça görülmektedir. Bu nedenle de başarılı bir ayıklama yapmak mümkün gözükmemektedir.



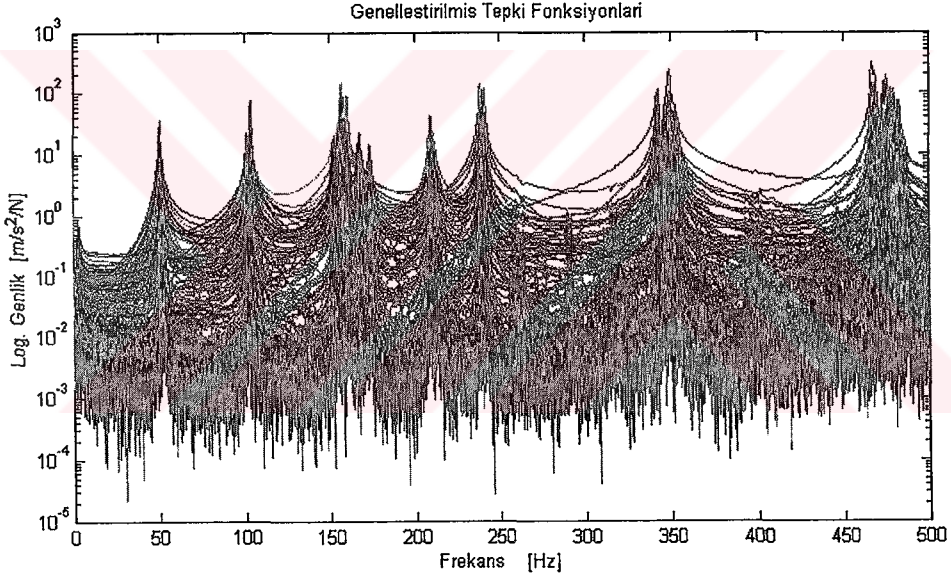
Şekil 6.16 Deneysel uygulama için örnek bir sistem (Fan kapağı).



Şekil 6.17 Fan kapağından ölçülen 96 tane FTF.

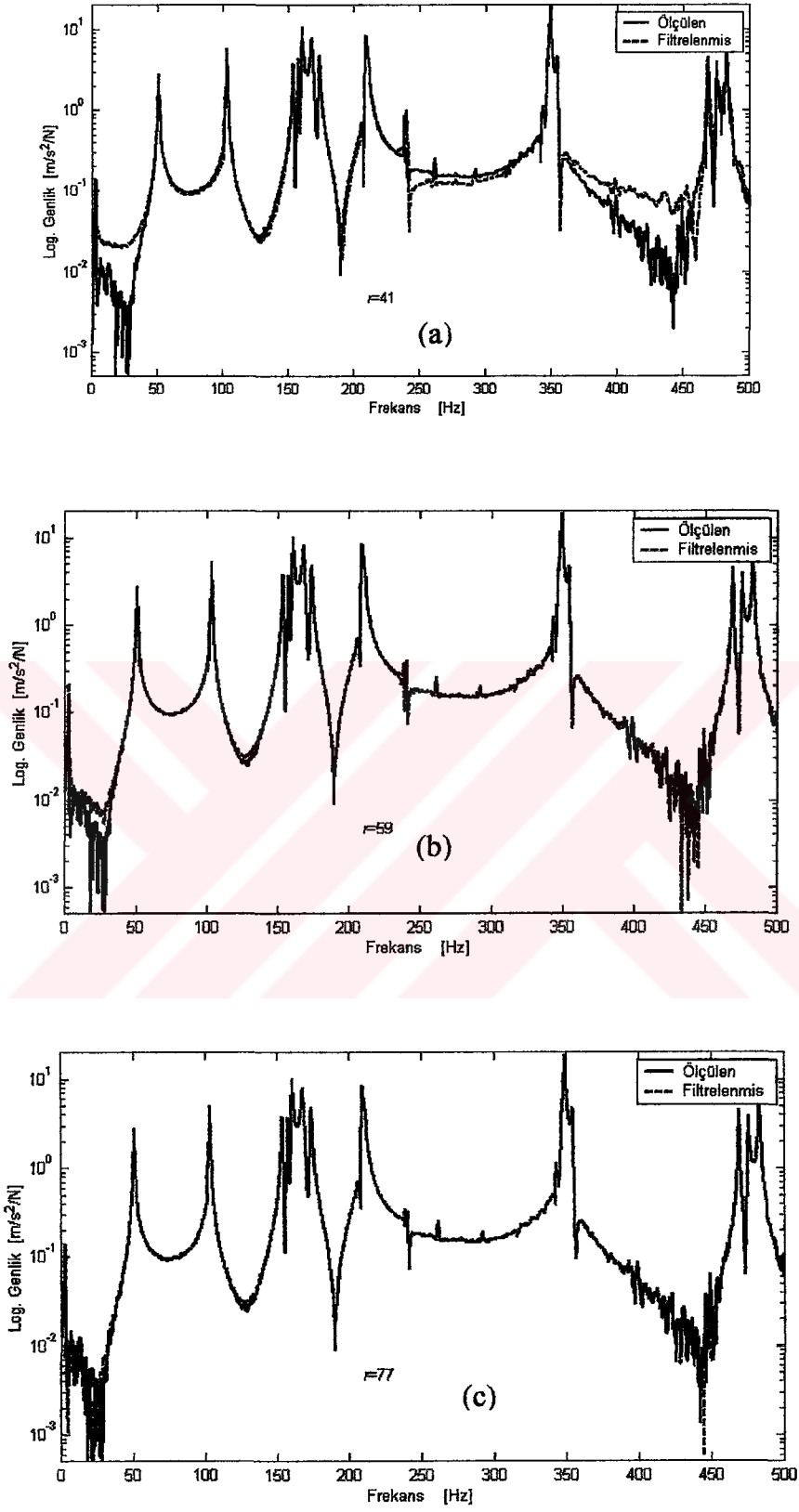


Şekil 6.18 Fan kapağı için tekil değerler grafiği.



Şekil 6.19 Fan kapağı için GTF 'ları.

Tekil değer grafiğine bakılarak bazı değişmelerin gözlemlendiği 41, 59 ve 77 rank değerleri için yöntem uygulanmış ve Şekil 6.20 'de elde edilen sonuçlarla ölçülen FTF 'ları karşılaştırılmıştır. Rank değerinin a) $r=41$ seçilmesi halinde FTF yapısının bozulduğu ve özellikle bazı ters-rezonans genliklerinin yükseldiği görülmektedir. Rank değerinin b) $r=59$ veya c) $r=77$ seçilmesi durumunda ise parazitlerin arzulanan ölçüde ayıklanamadığı görülmektedir.



Şekil 6.20 Rank değeri a) $r=41$, b) $r=59$ ve c) $r=77$ seçilerek elde edilen FTF 'larının ölçülen FTF 'ları ile karşılaştırılması.

6.8 Sonuç ve Değerlendirme

Bu bölümde FTF 'larındaki parazitlerin ayıklanması için TDA tekniğine dayalı olarak yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemde; (i) ölçülen bir grup FTF 'undan her biri, bir kolonu oluşturacak şekilde bir araya getirilerek veri matrisi elde edilmekte ve tekil değerlerine ayrıştırılmakta, (ii) tekil değerlere bakılarak veri matrisinin etkin rank değeri belirlenmekte ve (iii) parazit ve diğer yan etkilerden kaynaklanan küçük genlikli tekil değerler sıfırlanarak veya atılarak veri matrisi tekrar oluşturulmaktadır. Bu şekilde elenen küçük genlikli tekil değerlerle istenmeyen parazitler de ayıklanmaktadır.

Yöntemin geçerliliğini ve performansını incelemek üzere eklemeli ve çarpımsal parazit olarak bilinen parazitler bilgisayar ortamında rastlantısal sayılardan üretilerek bilinen bir sistemin FTF 'larına eklenmiş ve parazitli FTF 'ları simüle edilmiştir. Yöntem uygulandıktan sonra elde edilen filtrelenmiş FTF 'larının gerçek FTF 'ları ile olan uyumluluğu incelenmiştir. Yapılan uygulamalarda sunulan yöntem ile FTF 'larındaki eklemeli tip parazitlerin önemli ölçüde ayıklandığı ancak çarpımsal tip parazitlerin ayıklanmasında zorluklar olduğu görülmüştür. Bu zorluk, çarpımsal parazitin yapısı dolayısıyla sinyal-parazit oranının düşük olmasından ve etkin rank değerinin belirlenememesinden kaynaklanmaktadır. Etkin rank değeri, gerçek veri ile parazit arasındaki sınırı belirlemektedir. Bu değer küçük seçilmesi durumunda, parazitlerle birlikte gerçek veriler de atılmaktadır. Buna karşın bu değer büyük seçilmesi halinde de tatminkar ayıklama sağlanamamaktadır. Ayrıca yapılan deneysel uygulamada da arzu edilen başarı seviyesi sağlanamamıştır. Bu sonuç başka yaklaşım ve yöntemlerin geliştirilmesini gerektirmektedir. Buna dayanarak geliştirilen yeni bir yöntem bir sonraki bölümde incelenecektir.

7 ÖLÇÜLMÜŞ HERHANGİ BİR FTF 'NDAKİ PARAZİTLERİN AYIKLANMASI İÇİN YENİ VE ETKİLİ BİR YÖNTEM

7.1 Giriş

Bir önceki bölümde FTF 'ları üzerindeki parazitleri ayıklamak amacıyla TDA 'ya dayalı olarak geliştirilen bir yöntem sunulmuştur. Ancak yapılan sayısal simülasyonlarda eklemeli tip parazit durumunda önemli seviyede başarılı sonuçlar elde edilmesine rağmen çarpımsal parazit durumunda ve gerçek deneysel verilerde arzu edilen seviyede iyi sonuçlar elde edilememiştir. Bu bölümde önceki yöntemin olumsuzluklarını ortadan kaldırmak, başarılı, etkin ve pratikte uygulanabilir yeni bir yöntem amaçlanmıştır. Bu beklentileri sağlayan bir yöntem burada geliştirilmiş ve sunulmuştur.

Bilindiği gibi TDA matrislere uygulanabilen bir sayısal işlemdir ve bir önceki bölümde bu teknik ile parazitler ayıklanırken ölçülen bir grup veri uygun formda bir araya getirilerek veri matrisi oluşturulmuştu. Ancak pratikte her zaman bir grup veri ölçülmüş olmayabilir ve sadece ölçülen bir sinyalin analizi yapılmak istenebilir. Oysa TDA tekniğinin uygulanabilmesi için verinin matris biçimine dönüştürülmesi gerekir. Literatürde belirli bir zaman aralığında ölçülmüş bir verinin spektrum analizi yapılırken bu veri vektörünün bir matris haline getirilmesinde Hankel veya Toeplitz matrislerinden yararlanılmaktadır [57-66]. Bu şekilde bir verinin Hankel veya Toeplitz matrisi formuna getirildikten sonra TDA tekniğinin uygulanması bir sonlu ani darbe tepki filtresine (FIR filter) benzetilebilir. Dologlou ve Carayannis [88] bu benzeşimle ilgili olarak bazı fiziksel yorumlar yapmışlardır. Aynı konu Hansen ve Jensen [89] tarafından da incelenmiştir. Cherng [90] ise Hankel matris formundaki bir veriye TDA 'nın uygulanması üzerine analitik bir formülasyon sunmuştur. Literatürde Hankel veya Toeplitz matrisine dönüştürülen verilerin kalitesinin iyileştirilmesinde oldukça faydalanılmıştır. Ancak FTF verilerindeki parazitlerin ayıklanmasına yönelik bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Burada ölçülen bir FTF verisi Hankel matrisi formuna getirildikten sonra TDA tekniği uygulanarak parazitler ayıklanmaya çalışılacaktır.

7.2 Bir FTF ‘undaki Parazitlerin Ayıklanması İçin Yeni Yöntem

Burada sunulan yeni yöntemin özelliklerinden biri sadece bir FTF ‘nun kullanılmasıdır. L tane frekans bileşeninden (sample) oluşan bir FTF vektörü $H_{pq}(\omega)=\{H_{pq}(\omega_1), H_{pq}(\omega_2), \dots, H_{pq}(\omega_L)\}$ göz önüne alınsın ve kısa ifade edilmesi bakımından $H_{pq}(\omega)=\{H\}=\{H_1, H_2, H_3, \dots, H_i, \dots, H_L\}$ ile gösterilsin. Bu FTF vektöründen ($\{H\}$), $M \times N$ boyutundaki kompleks Hankel matrisi aşağıdaki gibi oluşturulabilir:

$$[A] = \begin{bmatrix} H_1 & H_2 & H_3 & \dots & H_N \\ H_2 & H_3 & \dots & \dots & H_{N+1} \\ H_3 & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ H_M & H_{M+1} & \dots & \dots & H_L \end{bmatrix} \quad (7.1)$$

Burada $M + N = L$ ve $M \geq N$ ‘dir. Matrisin her bir elemanı ise $A_{ij}=H_{i+j-1}$ şeklinde yazılabilir. Dikkat edilirse veri vektöründeki her bir eleman H_i Hankel matrisinin i . ters köşegeni boyunca dizilmekte ve her satır bir önceki satıra göre bir eleman ileri doğru ötelenmektedir. Yapılan bu düzenleme ile veri elemanları tekrar tekrar kullanılarak bir matris haline dönüştürülmektedir. Toeplitz matrisinde ise Hankel matrisinin aksine veri vektöründeki her bir eleman H_i , matrisin i . köşegeni boyunca dizilmektedir. Bu çalışmada Hankel matris formu kullanılmıştır. (7.1) denklemine alternatif olarak “Ani Darbe Tepki Fonksiyonu (ADTF)” kullanılarak da Hankel matrisi oluşturulabilir. ADTF, FTF ‘nun ters Fourier dönüşümü ile elde edilebilir. Bu durumda ADTF ‘nun uzunluğu FTF ‘nun iki katı olmaktadır. Buna göre ADTF vektörü $h_{pq}(t)=\{h\}=\{h_1, h_2, h_3, \dots, h_i, \dots, h_{2L}\}$ ile gösterilecek olursa bu durumda Hankel matrisi gerçeldir ve aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$[A] = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & h_3 & \cdots & h_N \\ h_2 & h_3 & \cdots & \cdots & h_{N+1} \\ h_3 & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ h_M & h_{M+1} & \cdots & \cdots & h_{2L} \end{bmatrix} \quad (7.2)$$

Burada $M + N = 2L$ ve $A_{ij}=h_{i+j-1}$ bağıntıları geçerli olmakla beraber boyutlar iki katına çıkmaktadır.

Daha sonra da gösterileceği gibi burada geliştirilen yöntemin performansı Hankel matrisinin oluşturulmasında FTF veya ADTF 'nun kullanılmasına bağlı olarak etkilenmektedir. Bundan sonra, aksi belirtilmedikçe, genelliği bozmaksızın (7.2) denklemi ile ADTF 'undan oluşturulan Hankel matrisi kullanılacaktır.

Parazit içeren bir FTF ile oluşturulan Hankel matrisinin, yeterli sayıda satır ve sütunlarının olması durumunda tekil olması beklenebilir. Tekillik dikdörtgen bir matrisin rankının, satır ve sütunlardan en küçüğünden daha küçük olmasıdır. FTF verilerinden oluşan bir matris göz önüne alındığında bu matrisin rankı incelenen sistemin mod sayısı ile ilişkilidir.

Burada geliştirilen teknikte de önceden olduğu gibi parazitleri ayıklamak için bu veri matrisi aşağıdaki gibi tekil değerlerine ayrıştırılır:

$$[A]_{M \times N} = \begin{bmatrix} [U_r] & [U_0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Sigma_r] & 0 \\ 0 & [\Sigma_0] \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [V_r] & [V_0] \end{bmatrix}^H \quad (7.3)$$

Sonra küçük genlikli tekil değerler sıfırlanarak veya karşılık gelen $[U_0]$, $[\Sigma_0]$ ve $[V_0]^H$ alt matrisleri atılarak aşağıdaki işlemle parazitler elenebilir.

$$[\bar{A}] = [U_r][\Sigma_r][V_r]^H \quad (7.4)$$

Parazitler elendikten sonra matris formundaki verinin tekrar vektör haline dönüştürülmesi gerekir. (7.4) denklemi ile elde edilen parazitlerden ayıklanmış $[\bar{A}]$ veri matrisinde Hankel yapısı bozulmaktadır. Bir başka deyişle, Hankel formundaki

$[A]$ matrisinin ters köşegenleri boyunca aynı elemanlar dizili iken parazitlerden ayıklanmış $[\bar{A}]$ veri matrisinde her bir ters köşegen üzerindeki elemanlar birbirinden farklı olmaktadır. Bu durumda, parazitlerden ayıklanmış gerçek veri vektörünün her bir elemanı \bar{h}_i , $[\bar{A}]$ 'nın karşılık gelen i . ters köşegenindeki elemanlarının ortalaması alınarak aşağıdaki gibi elde edilebilir:

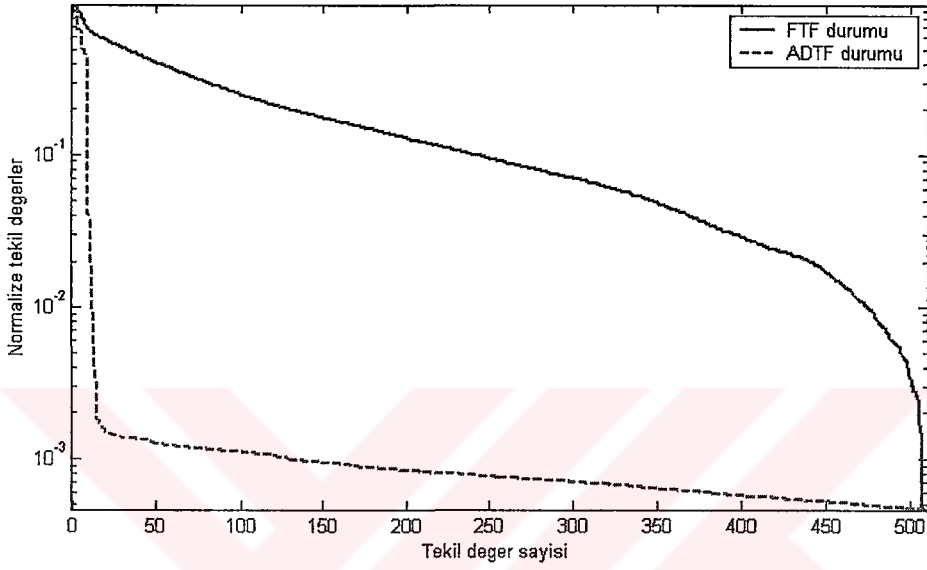
$$\bar{h}_i = \frac{1}{k-l+1} \sum_{j=l}^k \bar{A}_{i-j+1,j} \quad i=1, 2, \dots, 2L \quad (7.5)$$

Burada $l = \max(1, i-M+1)$ ve $k = \min(N, i)$ 'dir. Bu ortalama alma işlemi bir nevi FIR filtre olarak da yorumlanabilir.

7.3 Yöntemin Uygulanması

Burada sunulan yöntem, ölçülmüş bir FTF 'undaki parazitlerin ayıklanması için veri matrisinin oluşturulmasında FTF veya ADTF kullanılmasına bakılmaksızın uygulanabilir. İlk bakışta, FTF yerine ADTF 'nun kullanılması gereksiz gibi gözükebilir. Çünkü ADTF kullanılması durumunda önce ters Fourier dönüşümü ve parazit ayıklandıktan sonra da Fourier dönüşümüne ihtiyaç duyulmaktadır. FTF kullanımı ile karşılaştırıldığında zaman alıcı bu dönüşümler gereksizdir. Ancak bu iki alternatifin detaylı bir incelemesi yapıldıktan sonra bunun böyle olmadığı, yani, FTF yerine ADTF kullanılması halinde yöntemin çok daha iyi bir performans sergilediği görülmüştür. Bunun nedeni, iki alternatifin parazit sınırının (ϵ) belirlenmesindeki performansları karşılaştırılarak açıklanabilir. Önceki bölümde de açıklandığı gibi TDA tekniğinin veriler üzerindeki parazitleri ayıklamadaki başarısı rank değerinin seçimine, bir başka deyişle, parazit sınırının belirlenmesine oldukça bağlıdır. Bu karşılaştırmayı yapmak için Bölüm 6.6 'daki sayısal simülasyonda incelenen serbest-serbest giriş göz önüne alınmış ve bir FTF 'na %10 oranında parazit eklendikten sonra FTF ve ADTF kullanılarak Hankel matrisi oluşturulmuştur. Her iki durum için elde edilen tekil değerler Şekil 7.1 'de karşılaştırılmıştır. Açıkça görüldüğü gibi ADTF kullanılması halinde tekil değerler ani bir genlik düşüşünden sonra bir asimptota ulaşmaktadır. FTF kullanılması halinde ise komşu tekil değerler arasında önemli bir fark olmamakta, bir başka deyişle, sinyal-parazit oranı düşük olmaktadır.

Bu sonuç bu yöntemde ADTF kullanılması halinde daha iyi sonuçlar elde edilebileceğini göstermektedir. Burada verilmemekle birlikte aynı eğilim başka uygulamalarda da görülmüştür. Bu nedenle bundan sonra yöntemden bahsedilirken Hankel matrisinin oluşturulmasında ADTF ‘nun kullanıldığı var sayılacaktır ki bu; burada geliştirilen yöntemin en önemli özelliklerinden biridir.

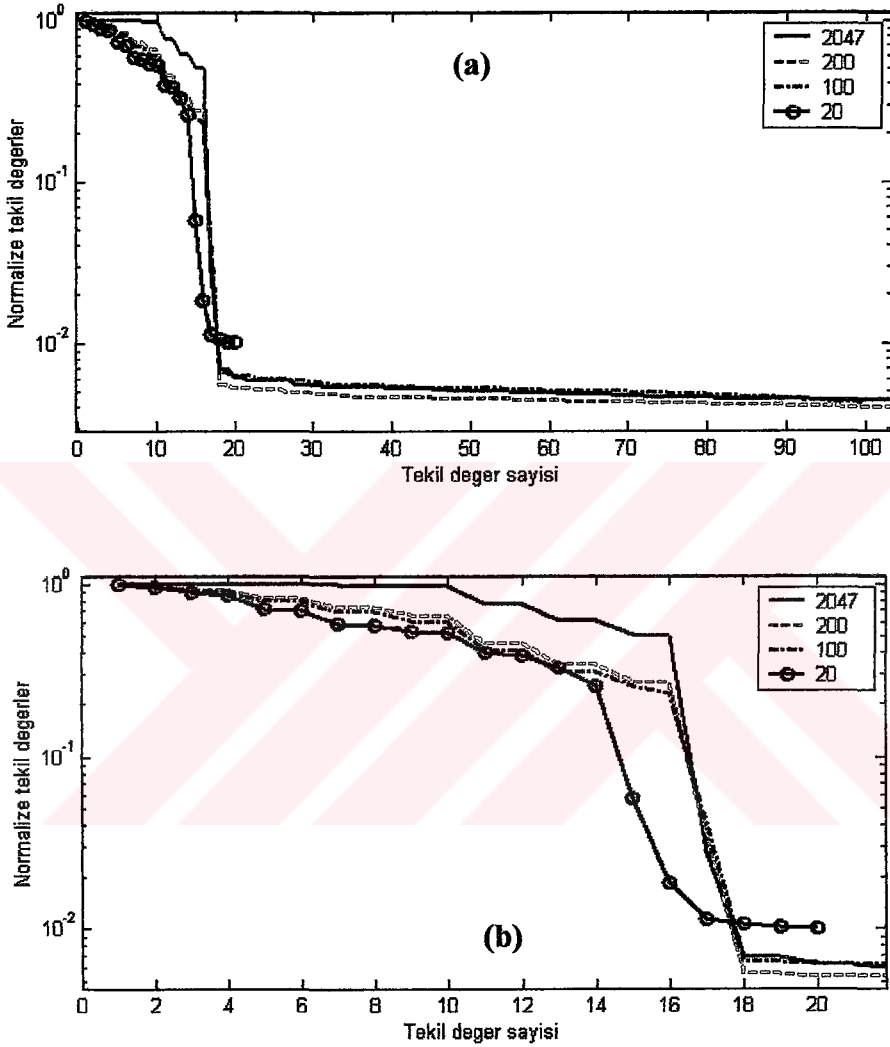


Şekil 7.1 FTF ve ADTF kullanılması durumunda elde edilen tekil değerlerin karşılaştırılması.

7.4 Hankel Matrisinin Satır ve Sütun Sayısının Etkisi

Bu yöntemde önemli olan diğer bir konu da verilen bir veri için denklem (7.2) formunda oluşturulacak Hankel matrisinin satır ve sütun sayısıdır. L tane örnekten oluşan bir veriden; L tek sayı ise $M = N = (L + 1)/2$ boyutunda bir kare veya L çift sayı ise $M > N$ için $N = L/2$ ve $M = N + 1$ olacak şekilde kareye yakın bir Hankel matrisi oluşturulabilir. Ancak bu matris oluşturulurken büyük boyutlu matrislerin daha fazla hesap zamanına ihtiyaç duyacağı göz önüne alınmalıdır. Nitekim yapılan incelemede ideal olan kare matris olmasına rağmen böyle bir kare matrisin oluşturulmasının şart olmadığı görülmüştür. Bu boyutun seçiminde göz önüne alınacak husus; parazit etkileri ile beraber sistemin davranışlarını temsil edecek şekilde mümkün olabilecek en küçük ranklı matrisin seçilmesidir. Dikdörtgen $M \times N$ boyutlu bir matriste $M > N$ için en büyük rank değeri N olacaktır. Hatırlanacağı gibi

FTF verilerinden oluşan bir matrisin rankı bu sistemin mod sayısı ile ilgiliydi. L uzunluğundaki bir verinin ters Fourier dönüşümünden elde edilecek ADTF 'nun boyutu da $2L$ olmaktadır. Buna göre ADTF kullanılması halinde rank değerinin de mod sayısının iki katı olması beklenebilir.

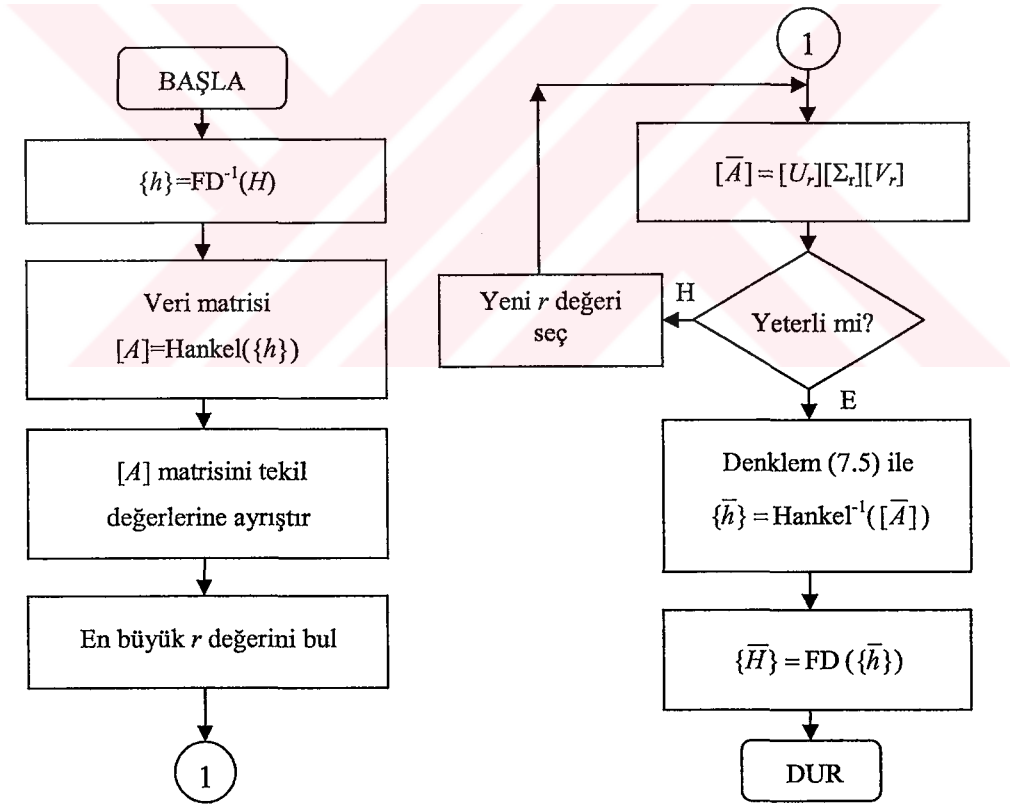


Şekil 7.2 Farklı Hankel kolon sayısı (N) için tekil değerlerin karşılaştırılması a)1-110 aralığındaki b)1-22 aralığındaki tekil değerler.

Bu durum bir örnekle gösterilmek istenirse, 8 moda sahip serbest-serbest giriş için Şekil 7.1 de verilen tekil değerler grafiğinde etkin rank değerinin 16 olduğu açıkça görülmektedir. Şekil 7.2a 'da Hankel matrisinin çeşitli kolon sayıları için elde edilen tekil değerlerin grafikleri verilmiştir. Görüldüğü gibi $N=100$, 200 ve 2047 seçilmesi durumunda tekil değerler asimptota ulaşmaktadır ve etkin rank değerinde de önemli bir değişiklik olmamaktadır. Bunu daha iyi göstermek için aynı grafik Şekil 7.2b 'de sadece 1-20 tekil değerleri aralığında büyütülerek verilmiştir. Görüldüğü gibi $N=20$

için asimptot hemen hemen sağlanmakla birlikte sistem özelliklerinin yeterli derecede dahil edildiğini söylemek mümkün değildir. Ayrıca bu durumda 15. ve 16. tekil değerlerin genliklerinde de önemli bir düşüş olmaktadır. Bu bakımdan uygulamalarda uygun N değeri seçilirken artık modların ve parazitlerin de etkileri dikkate alınarak FTF üzerinde görülen mod sayısının katlarının kullanılması faydalı olacaktır. Gerekliğinde deneme-yanılma ile buna karar vermek gerekebilir. Bu incelenen sistemin bir özelliği olduğundan dolayı aynı sistem üzerinde ölçülen birçok FTF analiz edileceği zaman sadece birkaç FTF ile belirlenen N değeri diğerleri için de kullanılabilir. Bu özellik, bir yapıdan ölçülen çok sayıda FTF üzerindeki parazitler ayıklanacağı zaman önemli bir avantajdır.

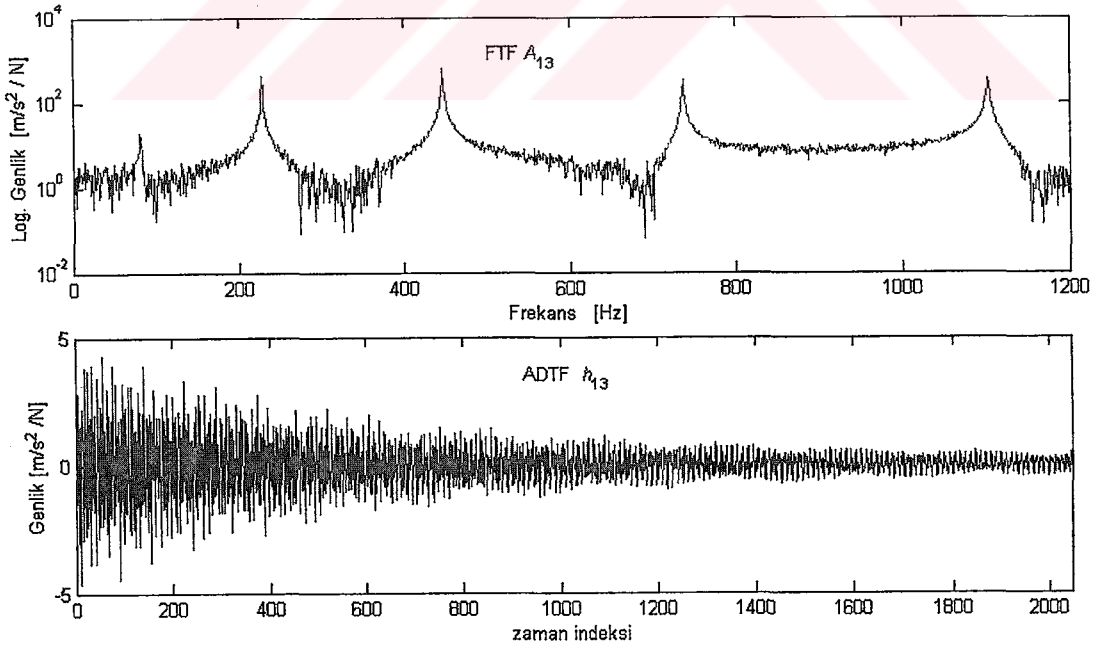
ADTF kullanımına dayalı yeni yöntemin algoritması Şekil 7.3 'deki akış diyagramında özet olarak verilmiştir.



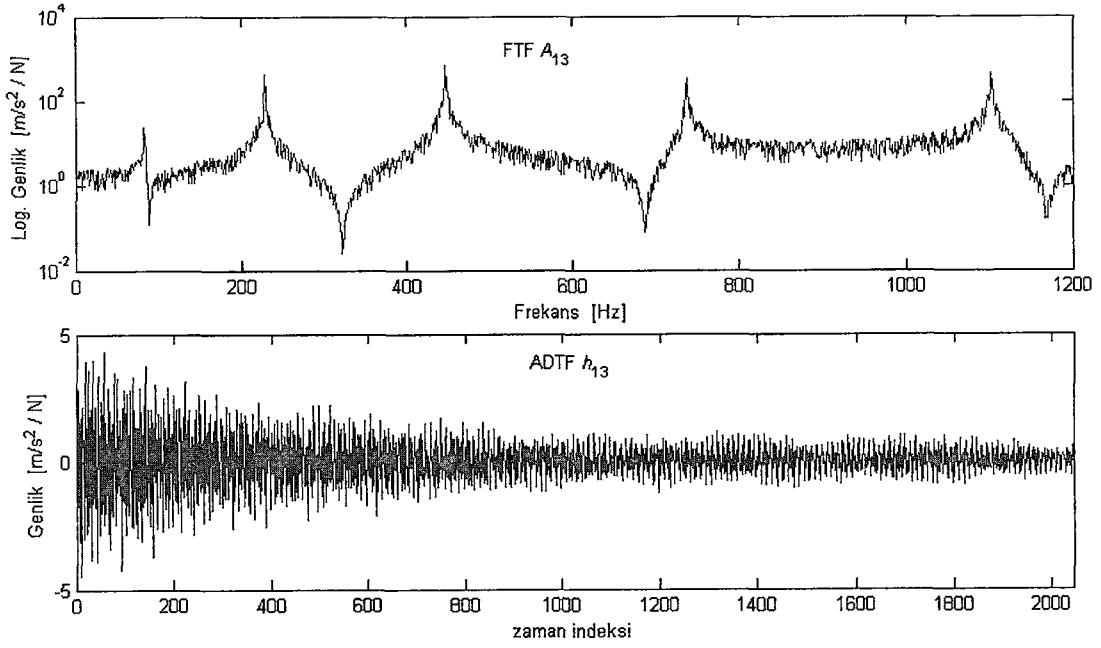
Şekil 7.3 DFT kullanımına dayalı parazit ayıklama yönteminin akış diyagramı (FD: Fourier Dönüşümü, FD⁻¹: Ters Fourier Dönüşümü).

7.5 Sayısal Simülasyon

Bu bölümde geliştirilen yeni yöntem Bölüm 6.6 'daki sayısal simülasyonda kullanılan serbest-serbest kirişin FTF 'ları üzerinde denenmiştir. Daha önce de belirtildiği gibi burada sadece bir tek FTF ele alınarak bunun ters Fourier dönüşümüyle ADTF elde edilmektedir. Bu durumda FTF vektörü $\{H\}$ 'nin uzunluğu bu örnek için 1024 iken dönüşümden sonra ADTF vektörü $\{h\}$ 'nin uzunluğu 2046 olmaktadır. (Not: FTF 'nun ters Fourier dönüşümü alınmadan önce kompleks eşlenikleri de eklenmektedir. Ancak FTF 'nun birinci ve L 'yinci elemanları gerçel olduğundan ADTF 'nun uzunluğu 2048 'den iki eksik olmaktadır.) ADTF vektöründen oluşturulabilecek Hankel matrisi en fazla 1024×1023 boyutunda yaklaşık bir kare matris olabilir. Ancak belirtildiği gibi bu şekilde bir kare matrisin oluşturulması bir zorunluluk değildir ve bu uygulama için yapılan birkaç denemeden sonra kolon sayısının 200 civarında seçilebileceği görülmüştür. Bu yöntemde sadece bir tek FTF kullanıldığından incelenen sistemin FTF 'larından örnek olarak sadece A_{13} incelenmiş ve yöntemin performansı irdelenmiştir. Bu FTF A_{13} ve bunun ters Fourier dönüşümünden elde edilen ADTF h_{13} , %10 oranlarındaki eklemeli ve çarpımsal parazit eklenmiş durumları sırasıyla Şekil 7.4 ve 7.5 'de verilmiştir.



Şekil 7.4 %10 eklemeli parazit durumu için FTF A_{13} ve ADTF h_{13} .

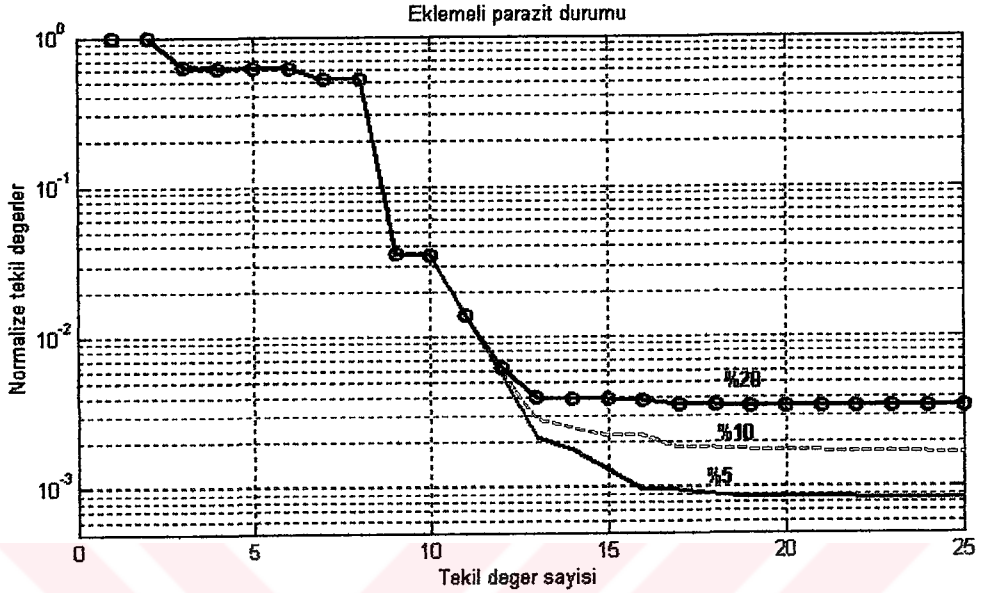


Şekil 7.5 %10 çarpımsal parazit durumu için FTF A_{13} ve ADTF h_{13} .

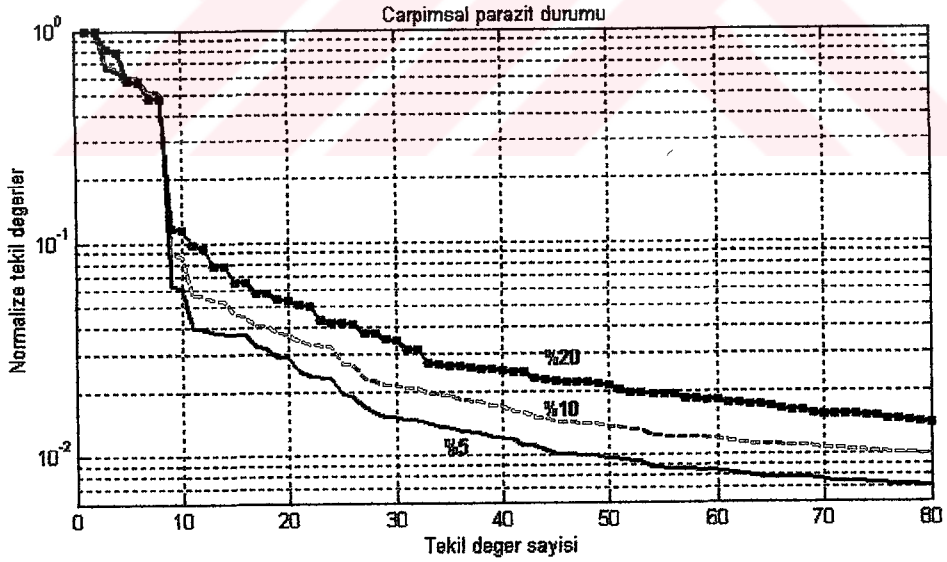
%5, %10 ve %20 oranlarında eklemeli ve çarpımsal tip parazitler bu FTF 'na eklendikten sonra ters Fourier dönüşümüyle ADTF elde edilmiş ve 1847x200 boyutunda Hankel matrisi formuna getirilmiştir. Bu durumlar için hesaplanan tekil değerler grafiği, eklemeli parazit için Şekil 7.6 'da ve çarpımsal parazit için Şekil 7.7 'de verilmiştir. Her iki grafikte de tekil değer genliklerinde belirli bir tekil değer sayısından sonra önemli bir değişiklik olmadığı açık bir şekilde görülmektedir. Eklemeli parazit durumunda tekil değerler ani bir genlik düşüşü ve bu düşüşten sonra yatay bir grafik sergilemektedir. Çarpımsal parazit durumunda ise bu özellikler belirgin olmasına rağmen düşüşten sonra eklemeli parazit durumundaki kadar yatay grafik oluşmamaktadır. Bu nedenle etkin rank değerinin belirlenmesi yani sinyal-parazit sınırının belirlenmesi eklemeli parazit durumunda daha kolay olmaktadır. Bunun sonucunda eklemeli parazitlerin temizlenmesindeki başarı çarpımsal parazit durumuna göre daha fazladır. Bu sonuç beklenen bir sonuçtur ve çarpımsal parazit durumunda çok iyi bir başarı beklenmemelidir. Çünkü hatırlanacağı gibi çarpımsal parazit simule edilirken FTF genliği ile çarpıldığından yapı olarak kendisini FTF 'na benzetmektedir.

%10 oranındaki eklemeli parazit durumu göz önüne alındığında Şekil 7.6 'da görüldüğü gibi 16. tekil değerden sonrakilerin genliklerinde önemli bir değişim olmamaktadır. Bu durumda etkin rank değerinin 16 olduğu söylenebilir. Bu değer

göz önüne alınarak parazitler ayıklandıktan sonra elde edilen filtrelenmiş FTF A_{13} , gerçeği ile Şekil 7.8 'de karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmada filtrelenmiş FTF 'nun gerçek değeri ile tamamen örtüştüğü ve yöntemin başarısı açıkça görülmektedir.



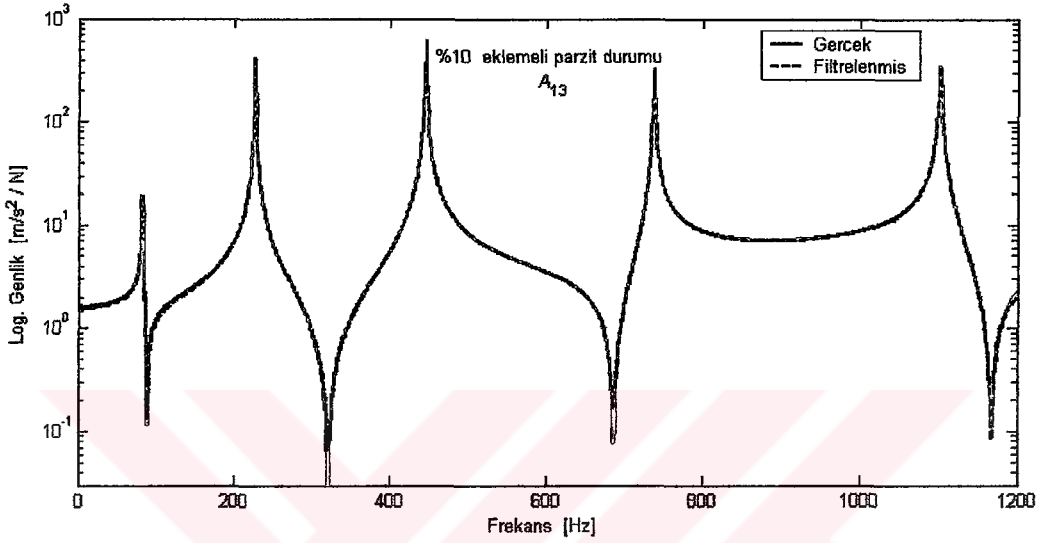
Şekil 7.6 Çeşitli oranlardaki eklemeli parazitli A_{13} için tekil değerler grafiği.



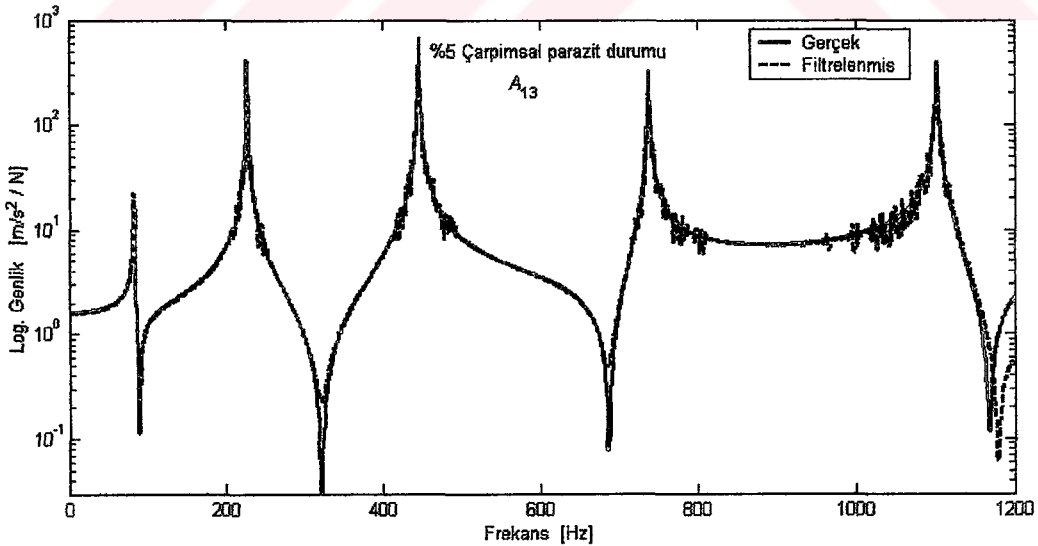
Şekil 7.7 Çeşitli oranlardaki çarpımsal parazitli A_{13} için tekil değerler grafiği.

Çarpımsal parazit durumunda etkin rank değerini belirlemek biraz daha zordur. Şekil 7.7 'de %5 parazit oranı için etkin rank değeri 42 olarak seçilerek elde edilen filtrelenmiş FTF gerçek değeri ile Şekil 7.9 'da karşılaştırılmıştır. Filtrelenmiş FTF 'unda bir miktar parazit kalmasına ve ters rezonans genliklerinin

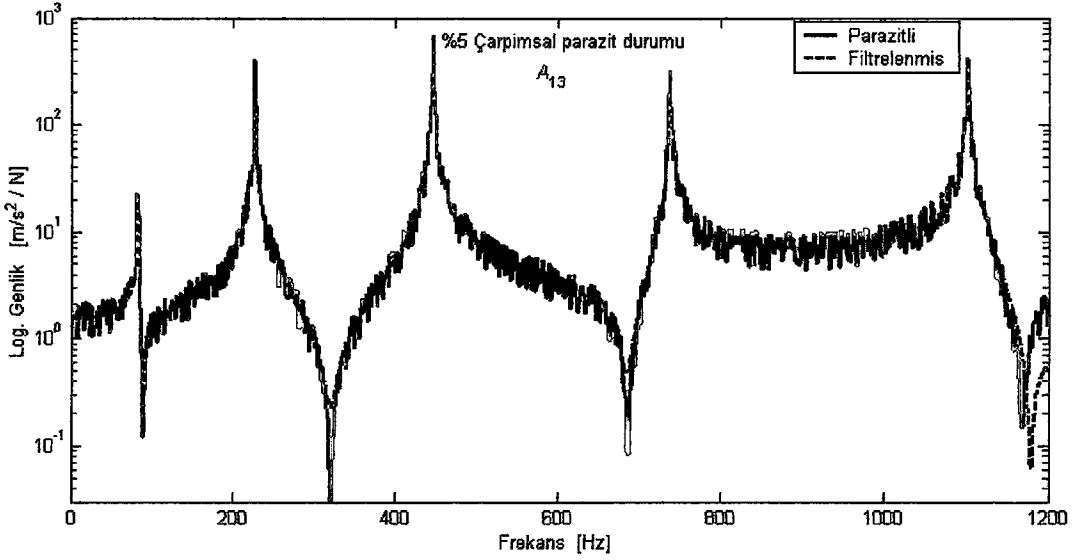
kaymış olmasına rağmen filtrelenmiş FTF ile gerçek FTF önemli ölçüde uyuşmaktadır. Ayıklanan parazit miktarı Şekil 7.10 'da parazitli ve filtrelenmiş FTF 'ları karşılaştırılarak gösterilmiştir. %1 ve %10 oranındaki çarpımsal parazit durumları için elde edilen sonuçlar EK F 'de verilmiştir.



Şekil 7.8 Gerçek ve filtrelenmiş FTF 'larının karşılaştırılması, (%10 eklemeli parazit durumu).



Şekil 7.9 Gerçek ve filtrelenmiş FTF 'larının karşılaştırılması, (%5 çarpımsal parazit durumu).



Şekil 7.10 Parazitli ve filtrelenmiş FTF 'larının karşılaştırılması, (%5 çarpımsal parazit durumu).

7.6 Deneysel uygulamalar

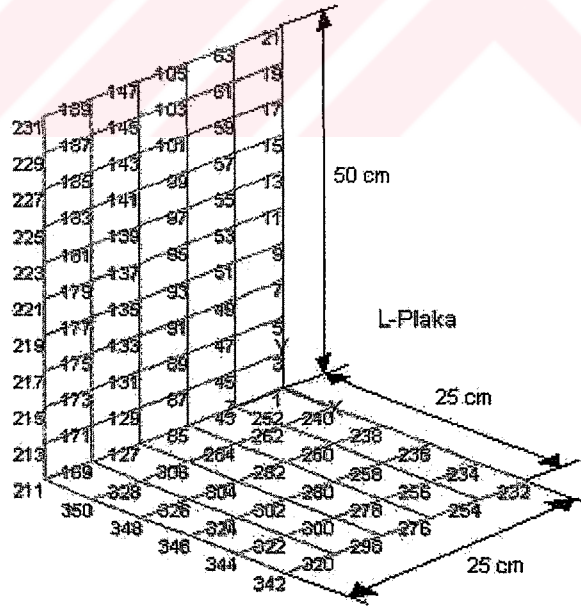
Yukarıda açıklandığı gibi FTF 'ları üzerindeki parazitlerin ayıklanması için geliştirilen ve tek bir FTF 'nun ters Fourier dönüşümüyle elde edilen ADTF 'nun Hankel matris formuna getirildikten sonra TDA tekniğinin uygulanmasına dayanan yöntemin yapılan nümerik simülasyonlarda oldukça etkili ve başarılı olduğu görülmüştür. Bu tekniğin gerçek veriler üzerindeki performansı da farklı sistemler üzerinden ölçülen FTF 'ları kullanılarak incelenmiştir. Burada şunu belirtmek gerekir ki; geliştirilen yöntem tek bir FTF 'nun kullanılmasına dayandığı için incelenen sistemin geometrisi ve FTF 'nun ölçüm noktalarının herhangi bir önemi yoktur. Yöntemin bu özelliği pratikte uygulanması bakımından önemli bir avantajdır. Bu bakımdan burada incelenen sistemlerin detaylı bir geometrik çizim resminin verilmesine gerek duyulmamıştır.

Burada şunu belirtmek gerekir ki, yöntem tek bir FTF 'na uygulanmakla birlikte bir yapı üzerinden ölçülen çok sayıdaki FTF incelenmesi durumunda yöntem sistematik bir şekilde uygulanabilmektedir. Yöntemin başarılı bir şekilde uygulanması oluşturulacak Hankel matrisinin kolon sayısı ve TDA 'dan sonra etkin rank değerinin en uygun şekilde seçilmesi ile yakından ilişkilidir. Bu iki parametre de incelenen sistemin mod sayısı ile ilişkilidir. Bu nedenle

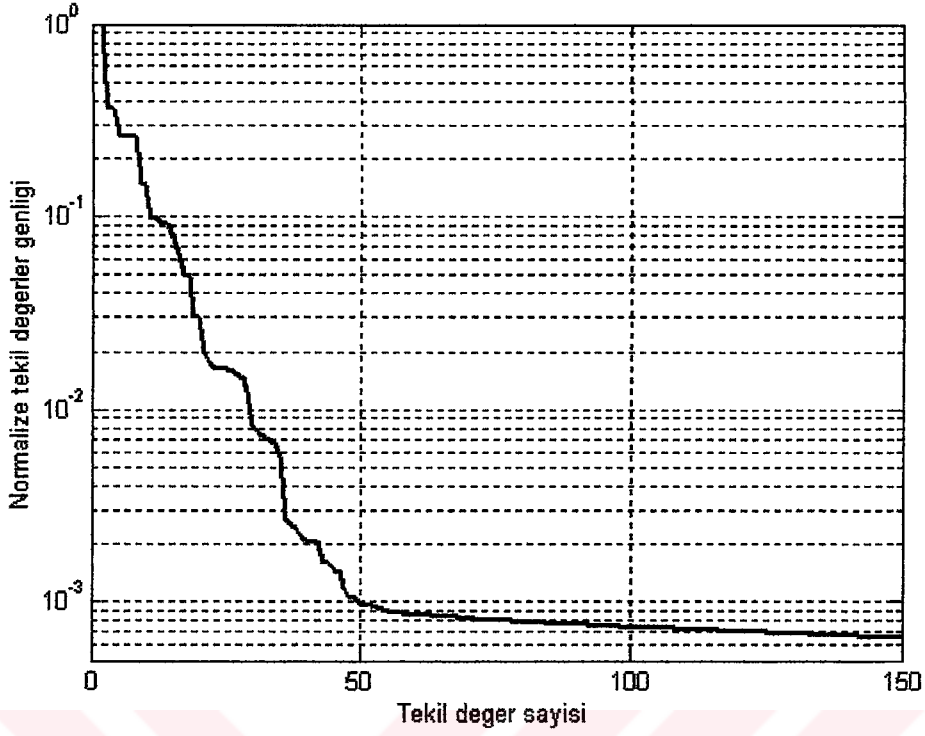
FTF 'undan birkaç tanesi incelendikten sonra bu parametreler belirlenebilir ve kalan FTF 'ları için de aynı parametreler kullanılabilir.

7.6.1 Uygulama 1: L-Plak

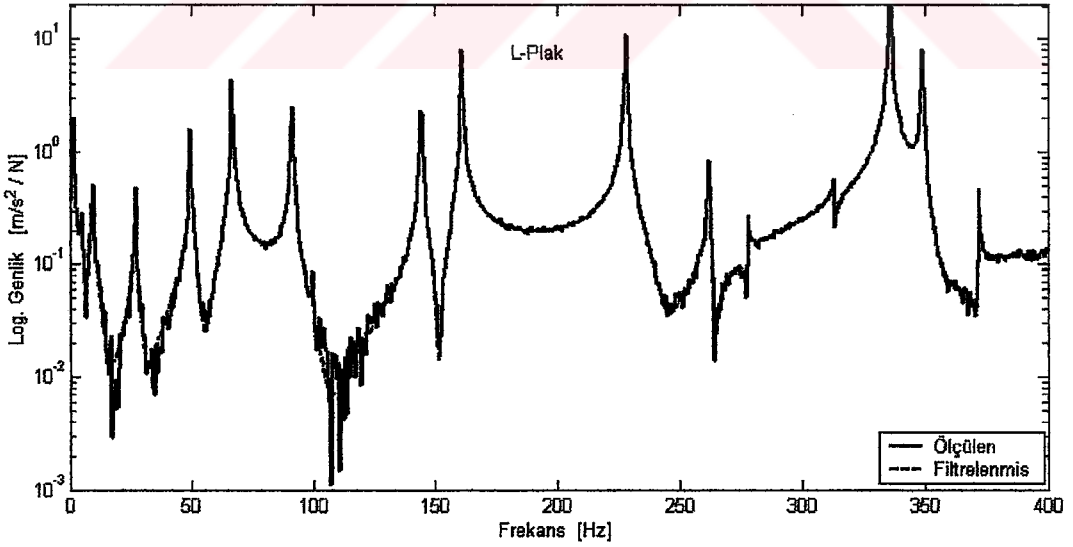
İlk örnek Şekil 7.11 'de verilen ve tüm kenarları serbest olan L-şeklinde bir plakadır. Plakın FTF 'ları 0-400Hz frekans aralığında 801 frekans noktasında ölçülmüştür. Ters Fourier dönüşümünden sonra bu FTF 'larından elde edilen ADTF 'larının uzunluğu 1600 olmaktadır. Bu sistem için Hankel matrisinin kolon sayısı 400 olarak seçilmiş ve ölçülen bir FTF 'nun tekil değer grafiği Şekil 7.12 'de verilmiştir. Bu grafikte görüldüğü gibi yaklaşık olarak 47. tekil değerden sonrakilerin genliklerinde önemli bir değişme olmamakta ve bunlar bir asimptota ulaşmaktadır. Şekil 7.13 'de ölçülen ve filtrelenmiş FTF 'larının karşılaştırmasında parazitlerin etkili bir şekilde ayıklandığı görülmektedir. Şekil 7.14 'de ise aynı L-plaktan ölçülen başka bir FTF 10-200 Hz frekans aralığında genlik ve fazları ayrı ayrı karşılaştırılmıştır. Bu sonuçlardan yöntemin gerçek verilerdeki başarısı net bir şekilde görülmektedir.



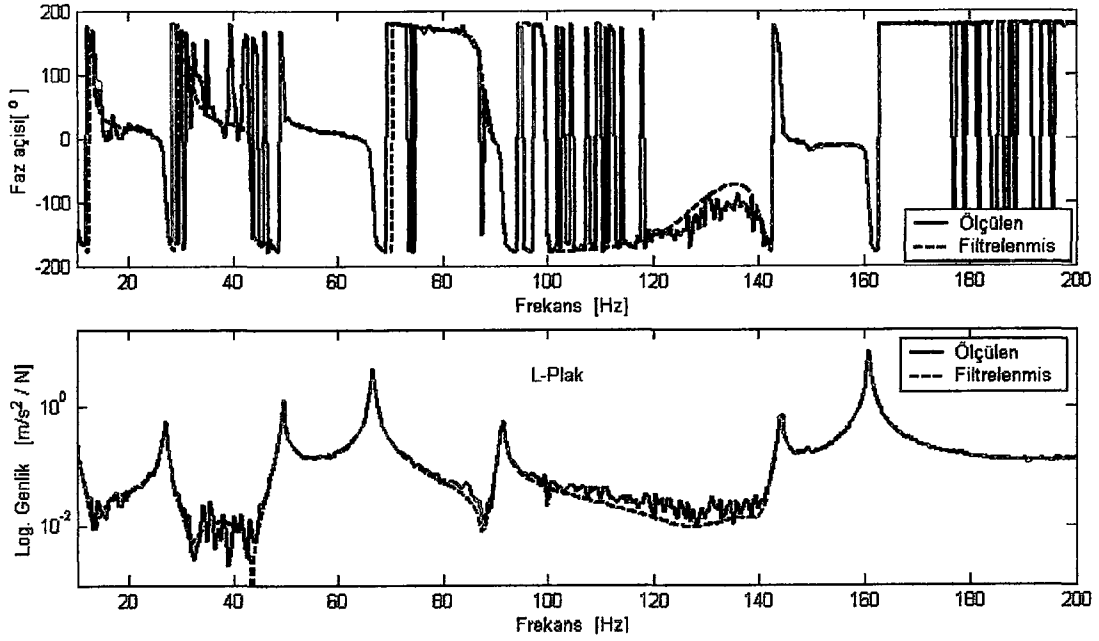
Şekil 7.11 Serbest sınır şartlarında FTF ölçümü yapılan bir L-Plaka.



Şekil 7.12 L-Plaktan ölçülen bir FTF için tekil degerler grafiği.



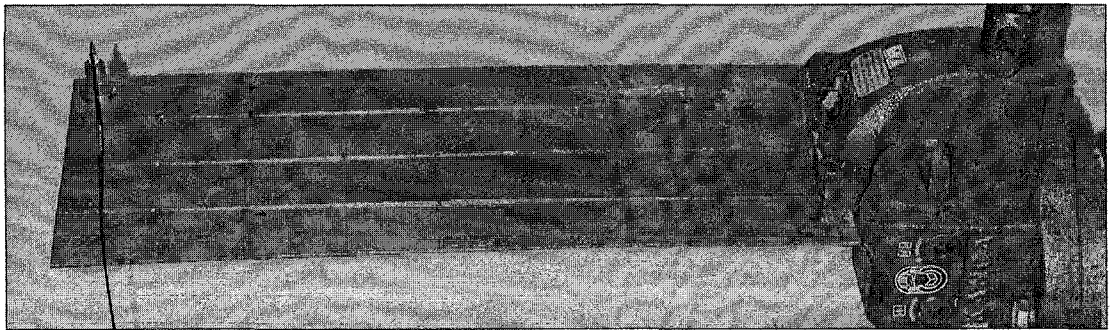
Şekil 7.13 L-Plak için ölçülen ve filtrelenmiş FTF 'larının karşılaştırılması.



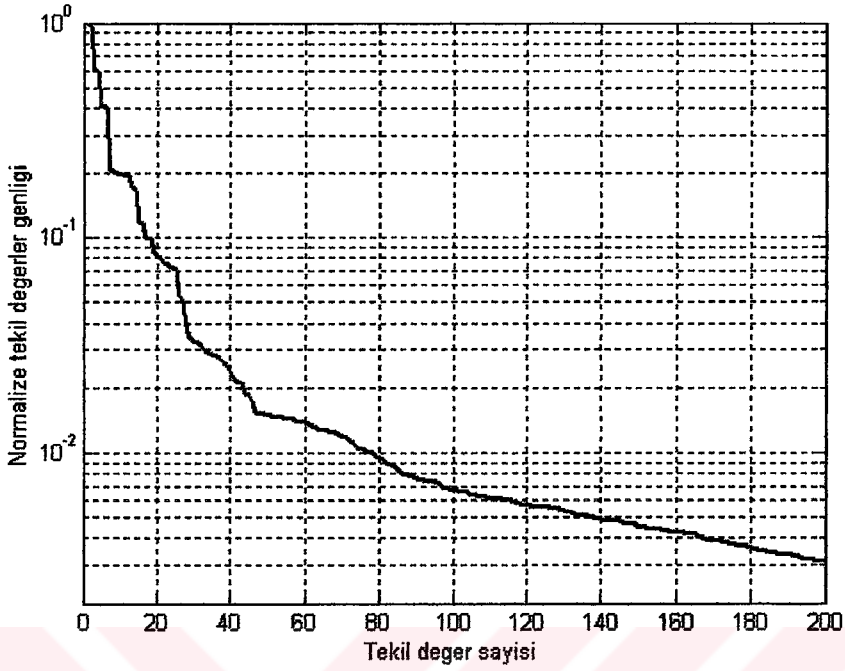
Şekil 7.14 L-Plak için ölçülen ve filtrelenmiş FTF 'larının faz ve genliklerinin karşılaştırılması, (10-200 Hz frekans aralığı).

7.6.2 Uygulama 2: Bir Kenarı Ankastre Diğer Kenarları Serbest Bir Plak

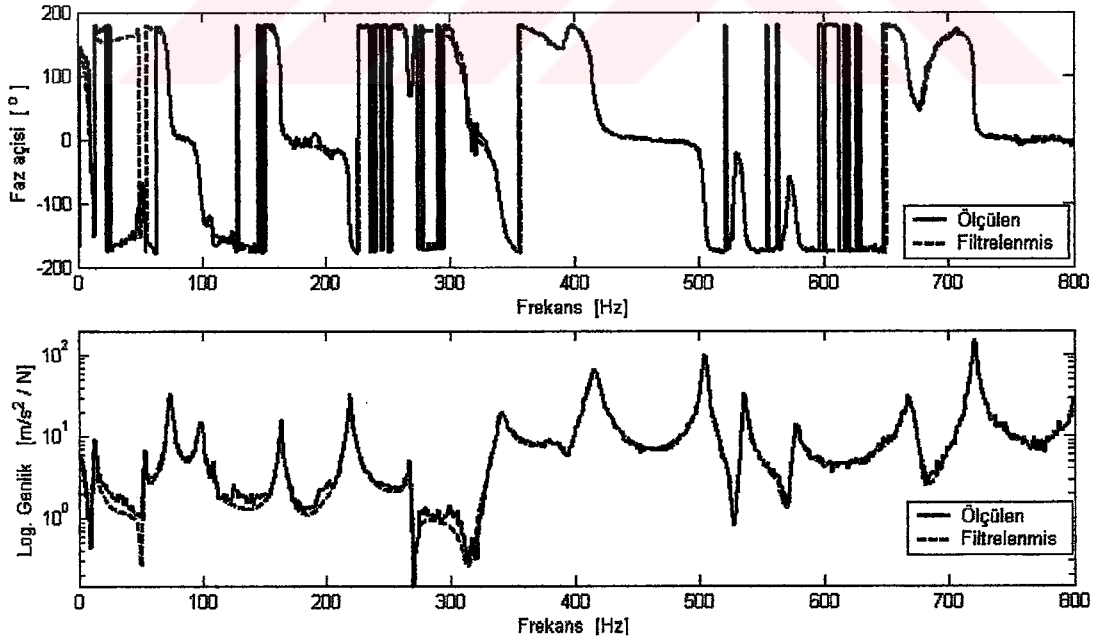
İkinci uygulama için seçilen sistem ise Şekil 7.15 'de verilen ve Bölüm 4.3.2.2 'de de incelenen bir kenarı ankastre diğer kenarları serbest plakadır. Bu plakta yapılan ölçümler de 0-800 Hz frekans aralığında ve 800 frekansta yapılmıştır. Bu sistem için Hankel kolon sayısı da 300 olarak alınmıştır. Bu plaktan ölçülen bir FTF için tekil değer grafiği Şekil 7.16 'da verilmiştir. Bu sistem için küçük genlikli tekil değerler bir asimptota ulaşmasa da 43. tekil değerden sonra tekil değerlerde ani bir düşüş görülmektedir. Bu konum parazit sınırı olarak kabul edildiğinde oldukça iyi bir sonuç elde edildiği Şekil 7.17 ve 7.18 'de verilen farklı iki FTF çizimlerinde görülmektedir.



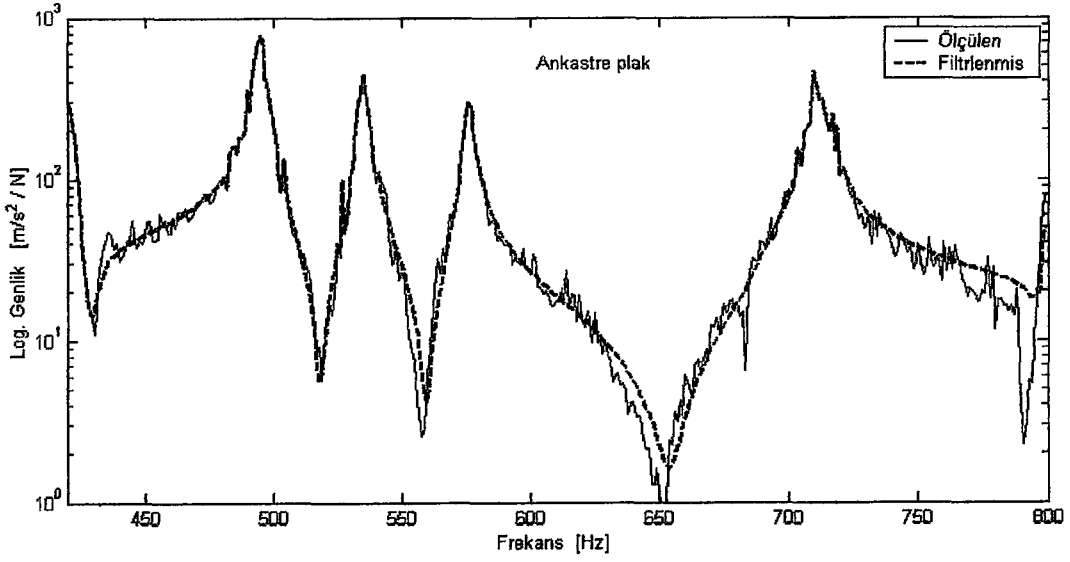
Şekil 7.15 Bir kenarı ankastre diğer kenarları serbest bir plak.



Şekil 7.16 Ankastré plak için tekil değerler grafiği.



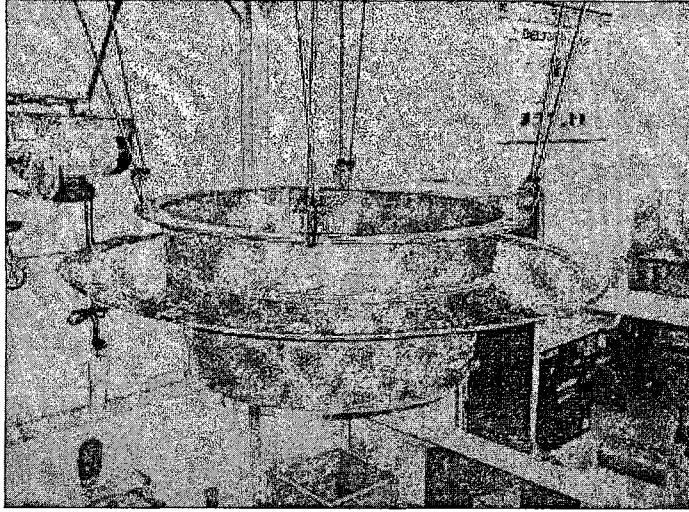
Şekil 7.17 Ankastré plak için ölçülen ve filtrelenmiş FTF 'larının faz ve genliklerinin karşılaştırılması.



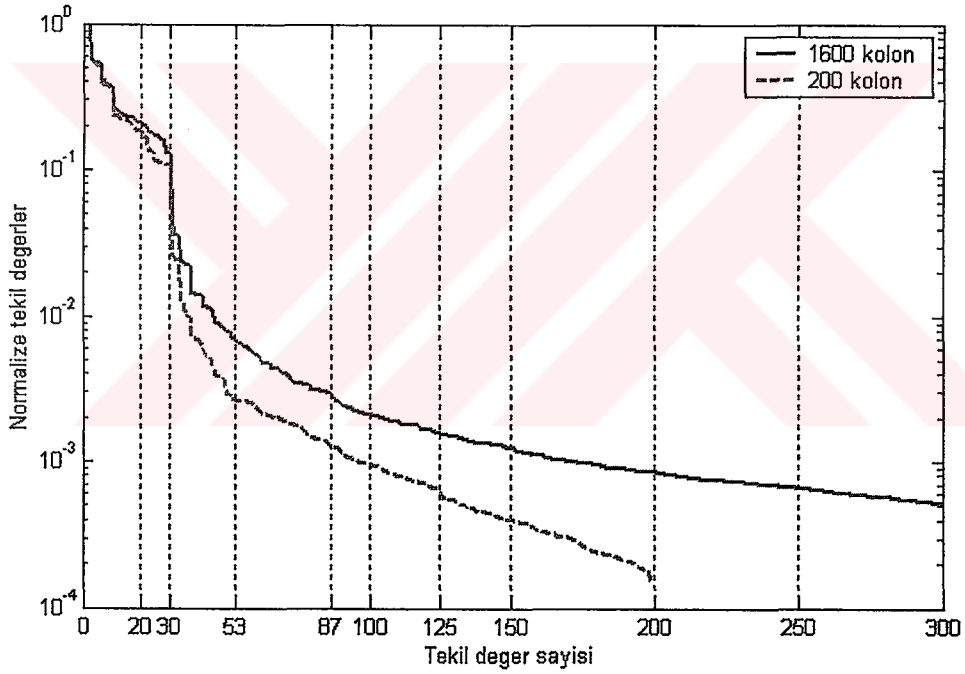
Şekil 7.18 Ankastre plak için ölçülen ve filtrelenmiş FTF 'larının karşılaştırılması, (400-800 Hz frekans aralığı).

7.6.3 Uygulama 3: Bir Fan Kapağı

Üçüncü bir uygulama Bölüm 6.7 'de de incelenen ve Şekil 7.19 'da tekrar verilen fan kapağının FTF 'ları kullanılarak yapılmıştır. Bu FTF 'ları 0-500 Hz frekans aralığında ve 1601 frekans noktasında ölçülmüştür. Bu uzunlukta bir veri için ideal olarak 1600 kolonlu bir Hankel matrisi oluşturulabilir. Ancak bu oldukça uzun bir hesap zamanı gerektirir. Kolon sayısının etkisini göstermek amacıyla kolon sayısı 200 ve 1600 seçilerek elde edilen tekil değerlerin grafiği Şekil 7.20 'de karşılaştırılmıştır. Her iki kolon sayısı için 30. tekil değerde ani ve önemli bir genlik düşüşü olduğu görülmektedir. Bu sistem için FTF grafiklerine bakıldığında mod sayısının 13 veya daha fazla olduğu söylenebilir. Artık modların ve parazitlerin etkileri dikkate alınarak kolon sayısı 1600 için rank değeri 87 ve kolon sayısı 200 için de rank değeri 53 seçilerek elde edilen filtrelenmiş FTF 'ları Şekil 7.21 'de karşılaştırılmıştır. Bu şekilde her iki kolon sayısı için elde edilen filtrelenmiş FTF 'larının da hemen hemen aynı olduğu görülmektedir. Bu durum Hankel kolon sayısının 200 seçilmesinin yeterli olacağı sonucunu vermektedir. Böylece hesap süresi önemli ölçüde azaltılmış olmaktadır.

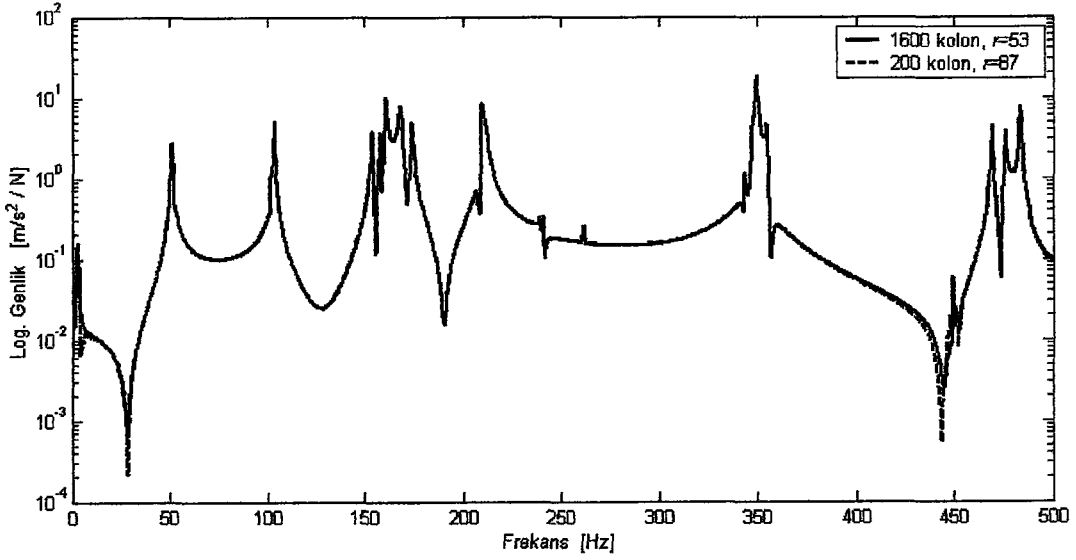


Şekil 7.19 Bir fan kapağı.

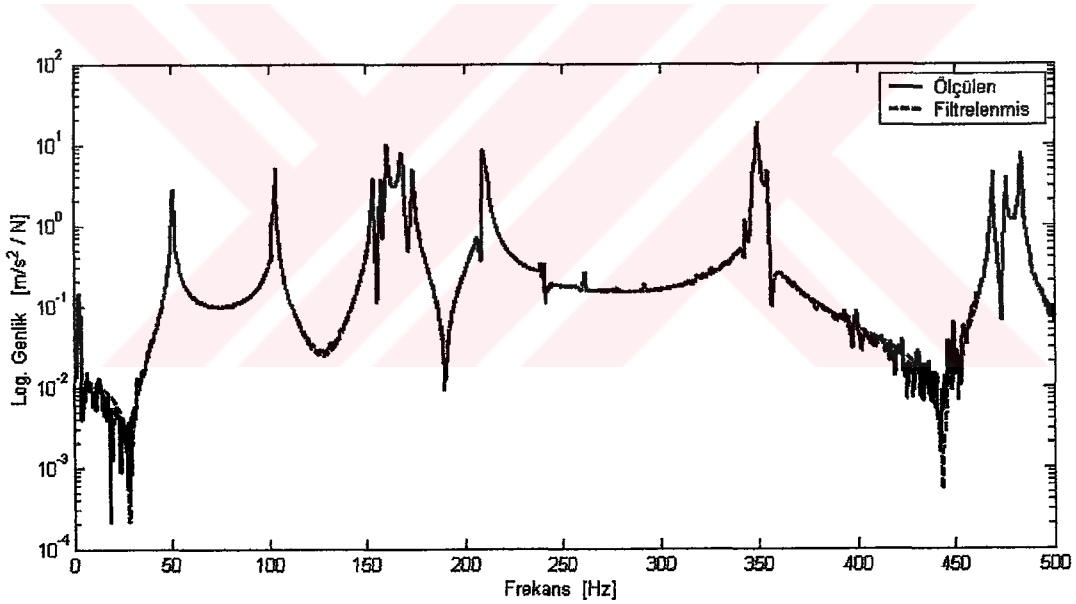


Şekil 7.20 Fan kapağı için farklı kolon sayılarında hesaplanan tekil değerler grafiği.

Kolon sayısı 200 ve rank değeri 53 seçilerek elde edilen filtrelenmiş FTF ile ölçülen FTF Şekil 7.22 'de karşılaştırılmıştır. Bu şekilde parazitlerin ayıklandığı ve FTF 'nun kalitesinin iyileştirildiği açıkça görülmektedir. Diğer taraftan bu sonuç Şekil 6.20 ile karşılaştırıldığında bu yöntemin bir grup FTF kullanımına dayalı yonteme göre daha etkili olduğu açıkça söylenebilir.



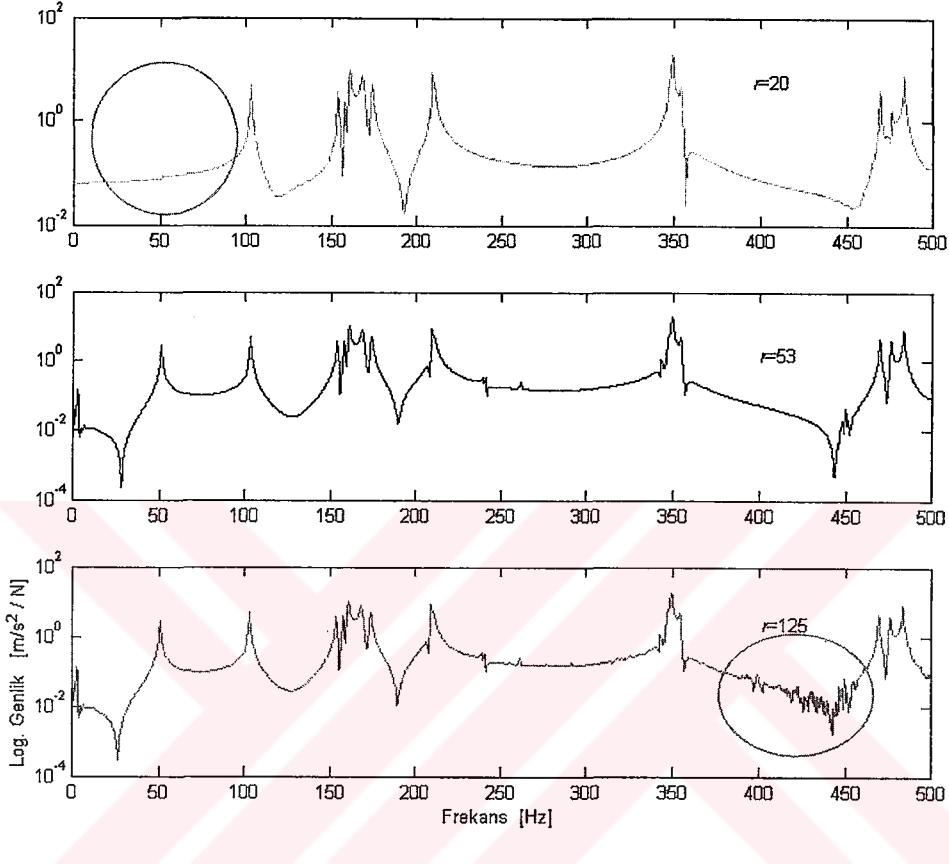
Şekil 7.21 Kolon sayısı 200 ($r=49$) ve 800 ($r=87$) seçilerek elde edilen filtrelenmiş FTF 'larının karşılaştırılması.



Şekil 7.22 Kolon sayısı 200 ve $r=53$ seçilerek elde edilen filtrelenmiş FTF 'nun ölçülmüş FTF ile karşılaştırılması.

Seçilen rank değerinin filtrelenmiş FTF 'ları üzerindeki etkisini görmek amacıyla farklı rank değerleri (20, 53 ve 125) için elde edilen filtrelenmiş FTF 'ları Şekil 7.23 'de karşılaştırılmıştır. Şekilde r değeri küçüldükçe FTF 'larındaki bazı bilgilerin kaybolduğu görülmektedir. Bu bölgeler şekillerde daire içerisine alınmıştır. Doğru rank değerinin 53 olduğu kabul edilirse $r=20$ alındığında 50 Hz civarındaki bir modun tamamen yok olduğu, $r=125$ alındığında da 400-450 Hz frekans aralığında bir

miktar parazit ayıklanamadığı görülmektedir. Bu nedenle yöntem uygulanırken rank değerinin seçilmesinde dikkatli olunmalıdır. Aksi halde parazitlerle birlikte sistemin gerçek bilgileri de atılabilir.



Şekil 7.23 Farklı rank değerleri (20, 53 ve 125) için elde edilen filtrelenmiş FTF 'larının karşılaştırılması.

7.7 Sonuç ve Değerlendirme

Parazitler FTF verilerinin kalitesini etkileyen en önemli faktörlerdendir. Bu çalışmada parazitlerin FTF 'larından ayıklanması için TDA 'ya dayalı olarak yöntemler geliştirilmiştir. Bunlardan biri bir grup FTF 'nun aynı anda kullanılmasına dayanmaktadır ve bir önceki bölümde sunulmuştur. Yapılan sayısal simülasyonlarda kısmi başarı sağlanmakla birlikte daha etkili bir yöntemin geliştirilmesine gerek duyulmuştur. Bu bölümde bu ihtiyacı karşılamak amacıyla sadece bir FTF 'nun kullanımına dayanan yeni ve oldukça etkili bir yöntem geliştirilmiş ve sunulmuştur. Bu yöntemde bir FTF vektörü Hankel matris formu haline getirildikten sonra TDA

tekniki uygulanmaktadır. Bu Hankel matrisi FTF 'undan oluşturulabileceği gibi FTF 'nun ters Fourier dönüşümünden elde edilen ADTF 'undan da oluşturulabilir. Fourier dönüşümleri gerektiren ADTF 'nun kullanılmasının zaman kaybına neden olacağı düşünülmekle birlikte yapılan incelemelerde ADTF 'nun kullanılması halinde yöntemin daha etkili olduğu görülmüştür.

Bu yöntemde; (i) filtrelenecek olan FTF 'nun ters Fourier dönüşümü ile ADTF elde edilir, (ii) bu ADTF Hankel matrisi formuna getirilerek tekil değerlerine ayrıştırılır, (iii) etkin rank değeri belirlenir, (iv) parazit ve diğer yan etkilerden kaynaklanan küçük genlikli tekil değerler sıfırlanarak veri matrisi tekrar oluşturulur, (v) bu matrisin her bir ters köşegeni üzerindeki elemanların ortalaması alınarak filtrelenmiş ADTF, vektör haline getirilir ve (vi) son olarak bu ADTF 'nun Fourier dönüşümü ile parazitlerden ayıklanmış FTF elde edilir.

Yapılan nümerik simülasyonlarda yöntemin yüksek oranlardaki parazitleri bile başarılı bir şekilde ayıkladığı ve farklı sistemlerden ölçülen gerçek deneysel FTF 'larındaki parazitlerin ayıklanmasında da oldukça etkili olduğu görülmüştür. Ayrıca bu yöntemin, yapısal birleştirme yöntemlerinden 'Empedans Bağlama' tekniğindeki [1, 100] performansı Ek G 'de incelenmiştir. Bu uygulamada da geliştirilen yöntemin kaliteli FTF 'na ihtiyaç duyan uygulamaların başarı oranını ve sonuçların güvenilirliğini arttırdığı görülmüştür.

Burada sunulan yöntemin başarısı, tamamen veriden oluşturulacak Hankel matrisinin boyutuna ve sinyal-parazit sınırını belirleyen etkin rank değerinin seçimine bağlıdır. Bu iki parametre de sistemin derecesi yani mod sayısı ile ilgilidir. FTF 'larından oluşmuş bir matrisin rankı ait olduğu sistemin mod sayısına eşittir. FTF 'nun ters Fourier dönüşümünden elde edilen ADTF 'nun boyutunun FTF vektörünün iki katı olduğu göz önüne alınırsa, ADTF 'undan oluşturulan bir Hankel matrisinin rankı mod sayısının iki katı olmaktadır. Diğer taraftan Hankel matrisi veri uzunluğuna bağlı olarak bir kare matris biçiminde oluşturulabilir. Ancak yapılan incelemede kare matris oluşturulmasının bir zorunluluk olmadığı ve kare matris yerine matrisin bir satırının incelenen sistemin özelliklerini içerecek uzunlukta seçilmesinin yeterli olacağı görülmüştür. Büyük boyutlu matrislerin daha fazla hesap zamanı gerektirdiği göz önüne alınırsa bu önemli bir avantajdır. Bu boyutun seçilmesinde gerektiğinde deneme-yanılma yöntemi kullanılabilir. MATLAB 'de hazırlanan yazılım bu

seçimlerin interaktif olarak seçilmesinde yardımcı olmaktadır (bakınız Ek C) Hankel matris boyutu ve rank değeri incelenen sistemin özelliğine bağlı parametreler olduğundan bir sistemden ölçülen çok sayıdaki FTF 'undan parazitlerin ayıklanması istendiğinde, bunlardan sadece birkaç tanesi üzerinde yapılacak deneme-yanılmalarla bu parametreler belirlendikten sonra kalan diğer FTF 'ları için de aynı parametreler kullanılabilir. Bu da yöntemin çok sayıdaki FTF 'na sistematik olarak uygulanabilmesini sağlayan bir avantajıdır.

Sonuç olarak ölçülen FTF 'ları önemli derecede parazit içeriyorsa ve bu FTF 'ları parazitelere duyarlı analizlerde kullanılacaksa, bu gibi durumlarda geliştirilen yöntem ile FTF 'larındaki parazitler önemli ölçüde ayıklanarak analizlerin güvenilirliğini arttıracak daha temiz FTF 'ları elde edilebilecektir.



8 SONUÇLAR VE GENEL DEĞERLENDİRME

8.1 Giriş

Mekanik bir yapı üzerinden ölçülen ve bu yapının doğal frekansları, mod biçimleri ve sönüm faktörleri gibi önemli dinamik özelliklerini içeren frekans tepki fonksiyonları (FTF) yapısal dinamikte çok çeşitli amaçlar için kullanılmaktadır. FTF herhangi bir kabul yapılmaksızın doğrudan yapı üzerinde ölçüldüğünden dolayı bunların analizinden elde edilecek sonuçların analitik veya sayısal yöntemlerden elde edilecek sonuçlara göre daha güvenilir olması beklenmektedir. Ancak FTF ölçümlerinde deney sisteminden kaynaklanan bazı hata kaynakları vardır ve bunlar ölçülen FTF 'larının kalitesini ve dolayısı ile bunlarla yapılacak analizlerin güvenilirliğini olumsuz yönde etkilemektedirler. FTF ölçümlerinde yapıya bağlanan transdüserler ve serbest sınır koşullarının sağlanması amacıyla kullanılan elastik mesnet elemanları incelenen yapıda kütle ve yay değişimlerine neden olmakta ve yapının dinamik özelliklerini değiştirmektedirler. Bu halde ölçülen FTF 'ları yapı ile beraber bu ilave kütle ve yayların etkilerini de içermektedir. Bu mekanik hataların yanında sadece titreşim ölçümlerinde değil deneysel ölçümlerin tümünde her zaman var olan parazitler de verilerin kalitesini etkileyen önemli faktörlerdendir. Bu bakımdan kaliteli FTF ölçümü ve güvenilir analiz teknikleri her zaman için ilgi çekici bir araştırma konusudur. Bu doktora tezinde titreşim testlerinden ölçülen FTF 'larının kalitesini iyileştirmek amacıyla;

- i) transdüser kütle etkileri,
- ii) mesnet elemanlarının etkileri ve
- iii) parazitler

ölçülen FTF 'larından ayıklanmaya çalışılmıştır. Bu amaca ulaşmak için yeni teknikler ve test stratejileri geliştirilmiş ve oldukça başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Devam eden bölümlerde bu tezde yapılan katkılar özetlenmiş, geliştirilen yöntemlerin avantaj ve sınırlayıcıları irdelenmiş, bundan sonra yapılması gereken geliştirmeler ve araştırma konuları belirlenmiştir.

8.2 Transdüserlerin Kütle Etkilerinin Kaldırılması

FTF ölçümü amacıyla yapıya bağlanan transdüserler yapıda bir kütle değişimi meydana getirmektedirler. Bu nedenle bu FTF 'larına transdüser kütlesi kadar negatif bir değişim yapılarak gerçek FTF 'larının elde edilebileceği doğrultusunda probleme yaklaşmıştır. Bu çalışmada matris teorisinden bilinen Sherman-Morrison eşitliğine dayalı olarak genel bir değişim formülü geliştirilmiş ve transdüser kütle etkilerinin kaldırılması amacıyla kullanılmıştır. Burada geliştirilen yöntemde herhangi bir FTF üzerindeki kütle etkisinin değişim koordinatındaki (transdüserin bağlandığı koordinat) noktasal FTF 'nun da ölçülmesi halinde kaldırılabilirliği görülmüştür. Ancak ihtiyaç duyulan bu noktasal FTF 'nun ölçümünün bazı testlerde pratik olmadığı dikkate alınmış ve FTF ölçümlerinde en çok kullanılan iki test tekniği için yöntem ayrı ayrı irdelenmiştir. Bu ölçüm tekniklerinin birinde yapıyı tahrik etmek için darbe çekici kullanılmakta ve tüm ölçümlerde ivme ölçer yapı üzerinde sabit bir konumda kalmaktadır. Bu tür testlerde herhangi bir FTF 'nu düzeltmek için ihtiyaç duyulan noktasal FTF, darbe çekici ilgili noktaya taşınarak kolayca ölçülebilmektedir. Geliştirilen yöntemin böyle bir testteki geçerliliği sayısal simülasyonlarla gösterilmiş ve deneysel verilerle yapılan uygulamalarda da oldukça başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Diğer bir test tekniğinde ise yapıyı tahrik etmek için bir sarsıcı kullanılmaktadır. Her bir FTF ölçümünde bu sarsıcı aynı noktada sabit kalırken ivme ölçer yapı üzerinde ilgili koordinatlara taşınmaktadır. Bu durumda ölçülen bir transfer FTF 'undaki transdüser kütle etkisi kaldırılırken ihtiyaç duyulan noktasal FTF 'nun ölçümü için sarsıcının ivme ölçerin bulunduğu konuma taşınması gerekir. Ancak bu işlem pratik değildir. Bu olumsuzluğu ortadan kaldırmak için yeni bir teknik geliştirilmiştir. Bu teknikte ölçülen transfer FTF 'na ilave olarak

- i) Sarsıcının bağlandığı koordinatta sürüş noktası FTF ölçülür ki bu standart bir modal analiz için zaten gereklidir,
- ii) Transfer FTF ölçülür,

iii) Transfer FTF 'nun ölçüldüğü transdüser konumuna bir yardımcı kütle yerleştirilir veya ikinci bir transdüser kullanılarak (biri sarsıcı konumunda diğeri transfer FTF ölçüm konumunda) sürüş noktası FTF tekrar ölçülür.

Ölçülen bu üç FTF kullanılarak yapılacak bir dizi işlemde sonra ihtiyaç duyulan noktasal FTF hesapla bulunabilmekte ve transfer FTF üzerindeki transdüser kütle etkisi kaldırılabilir. Bu yöntemde ölçülmeyen diğeri bir noktasal FTF da hesaplanabilmektedir ki bu yöntemin getirdiği ilave bir avantajdır. Yapılan sayısal simülasyonda tam bir başarı sağlanmış olmasına rağmen formülasyondaki bir fark işleminden dolayı FTF 'larındaki parazitlerin yöntemin performansını olumsuz yönde etkilediği ve tahmin edilemeyen hataların ortaya çıktığı görülmüştür. Bu nedenle sarsıcı ile yapılan testlerde ivme ölçer konumundaki noktasal FTF ölçülmeden ve FTF 'ları parazitli iken bu tekniğin pratikte uygulanması zordur. Burada dahil edilmemiş olmasına rağmen laboratuvar olanakları dahilinde yapılan birkaç deneysel çalışma da bu zorlukları göstermiştir. Parazitlerin sonuçları bu derecede olumsuz olarak etkilemesi verilerdeki parazitlerin ayıklanmasının önemini de tekrar ortaya koymaktadır.

Şunu da belirtmek gerekir ki transdüser kütlesi sadece bir yönde değil tüm 6 yönde (üç ötleme, üç dönme) etki oluşturmaktadır. Bu nedenle daha gerçekçi bir FTF için tüm yönlerdeki etkilerin kaldırılması gerekir. Ancak günümüzde halen dönme ile ilgili FTF 'larını ölçmek zordur. Ancak ölçümle ilgili kısıtların olmaması durumunda geliştirilen yöntem ardışık olarak uygulanarak her defasında bir yöndeki etki kaldırılmak suretiyle tüm yönlerdeki etkileri kolaylıkla kaldırabilmek mümkündür.

8.3 Askı Yaylarının Etkilerinin Kaldırılması

Serbest sınır şartlarını sağlamak amacıyla yapıya bağlanan elastik kordonlar veya elemanlar FTF 'ları üzerinde bir yay değişimi meydana getirmektedirler. Hatta bazı durumlarda sönüm değişimi de oluşabilmektedir. Bunun sonucunda yapının rijit cisim modlarının frekansları sıfırdan büyük olarak ölçülmekte ve elastik modların frekansları da gerçek değerlerinden önemli ölçüde sapabilmektedir. Bu etkilerin kaldırılması için de yine Sherman-Morrison formülüne dayalı olarak değişim yaklaşımı geliştirilmiştir. Test edilen yapıların en basit halde bir yayla asılabileceği

kabul edilerek değişim denklemleri düzenlenmiş ve yapılan sayısal simülasyonlarda askı yayının etkisinin bu yöntemle tamamen kaldırılabilirdiği görülmüştür. Ayrıca pratik uygulamaların çoğunda yapıların iki veya daha fazla konumdan mesnetlendiği de göz önüne alınarak böyle durumlar için de geçerli olabilecek değişim denklemleri düzenlenmiştir. Birden fazla konumlarda mesnetleme yapıldığı durumlarda her bir mesnetin etkisinin ardışık değişimlerle kaldırılabileceği görülmüştür. Ancak geliştirilen yöntemde her bir mesnet koordinatı ile ilgili FTF 'larının ölçülmesi gerekmektedir. Bu da yöntemin pratikliliğini olumsuz yönde etkileyen bir faktör gibi gözükmese rağmen yapısal değişim tekniklerinde bundan kaçınmanın mümkün olmayacağını da belirtmek gerekir. Yapılan sayısal simülasyonlar yöntemin askı yay etkilerini kaldırmadaki başarısını göstermiştir. Ancak her zaman olduğu gibi burada da az miktardaki parazitlerin bile yöntemin başarısını olumsuz yönde etkilediği görülmüştür ki bu durum parazitlerin olumsuz etkisini ve parazitlerin ölçülen verilerden ayıklanması gereğini bir kez daha ortaya koymuştur. Burada şunu da belirtmek gerekir ki mesnet etkileri özellikle uçak ve uzay teleskopları gibi çok büyük ve esnek yapıların incelenmesi durumunda belirgin olarak ortaya çıkmaktadır. Böyle bir test düzeneğinin kurulması için laboratuvar olanaklarının yetersiz olması nedeni ile bu yöntemin deneysel uygulaması yapılamamıştır. Böyle bir çalışma ilerisi için önerilen araştırmalardan birini teşkil etmektedir.

8.4 Parazitlerin Ayıklanması

Parazitler deneysel verilerin tümünde var olan ve verilerin kalitesini olumsuz yönde etkileyen, deneysel veriler kullanılarak yapılan pek çok analizin başarı oranını düşüren en önemli etkenlerin başında gelmektedir. Gerek modal test uygulamalarında gerekse bu tezin de konusu olan FTF 'larındaki mekanik hataların kaldırılması için bugüne kadar geliştirilen tekniklerde parazitlerin önemli bir problem teşkil ettiği bilinmektedir. Bu çalışmada da sistematik hataların kaldırılması için geliştirilen teknikler parazitlerden olumsuz yönde etkilenmektedir. Bu durum FTF 'larındaki bu parazitlerin ayıklanmasının önemini ve gerekliliğini açıkça gözler önüne sermektedir.

Bu çalışmada bir matrisin kendisinden daha düşük ranklı başka bir matrisle yaklaşık olarak elde edilebileceği prensibinden hareketle matris teorisinden bilinen TDA

tekniki kullanılarak bu parazitlerin ayıklanması için yöntemler geliştirilmiştir. TDA tekniği matris rankının belirlenmesinde oldukça etkili bir yöntemdir. Rank ise veri matrisindeki anlamlı ve anlamsız verilerin birbirinden ayrıştırılmasını sağlamak için önemli bir parametredir.

Verilerdeki parazitlerin ayıklanması için geliştirilen birinci yöntem bir yapıdan ölçülmüş bir grup FTF 'nun aynı anda kullanılmasına dayanmaktadır ve bu yöntemde;

- i) Ölçülen bir grup FTF 'undan her biri bir kolonu oluşturacak şekilde bir araya getirilerek veri matrisi oluşturulur,
- ii) Veri matrisi tekil değerlerine ayrıştırılır,
- iii) Etkin rank değeri bulunur,
- iv) Küçük genlikli tekil değerler sıfırlanarak yeniden hesaplanan matriste parazitler elenmektedir.

Bu prensip, ölçülmüş bir grup FTF 'undan oluşan veri matrisine uygulanmış ancak kısıtlı durumlar haricinde arzu edilen seviyede iyi sonuçlar elde edilememiştir. Buna alternatif olarak sadece bir tek FTF göz önüne alınarak yeni bir yöntem daha geliştirilmiştir. Bu yöntemde, FTF verisi direk olarak kullanılabilceği gibi, Ani Darbe Tepki Fonksiyonu (ADTF) 'da kullanılabilir. Yapılan incelemeler sonucunda FTF 'nun ADTF 'na dönüştürülmesi ve yöntemin ADTF kullanılarak pratikte uygulanması önerilmiştir. Geliştirilen bu yöntem, özet olarak aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır:

- i) FTF 'nun ters Fourier dönüşümünden ADTF elde edilmesi,
- ii) bu ADTF 'nun Hankel matris formuna getirilmesi ,
- iii) standart TDA tekniği ile veri matrisinin tekrar oluşturulması,
- iv) elde edilen bu matrisin tüm ters köşegenleri boyunca ortalama alınarak parazitlerden ayıklanmış ADTF 'nun oluşturulması ve

v) ADTF 'nun Fourier dönüşümü ile parazitlerden ayıklanmış FTF 'nun elde edilmesi.

Yapılan sayısal simülasyonların yanında gerçek deneysel FTF 'ları ile yapılan uygulamalarda da bu yöntem ile parazitlerin önemli ölçüde azaltıldığı ve FTF kalitesinde oldukça önemli bir iyileşme sağlandığı görülmüştür.

Geliştirilen bu yöntemin başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için özellikle iki hususun göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu hususlardan biri veri vektöründen oluşturulacak Hankel matrisinin kolon sayısının ne olacağıdır. İncelenen bir veriden ideal durum için bir kare matris oluşturulabilmektedir. Ancak yapılan incelemede kare matris oluşturulmasının bir zorunluluk olmadığı ve kare matris yerine matrisin kolon sayısının incelenen sistemin özelliklerini içerecek uzunlukta seçilmesinin yeterli olacağı görülmüştür. Büyük boyutlu matrislerin daha fazla hesap zamanı gerektirdiği göz önüne alınırsa bu önemli bir avantajdır. Bu boyutun seçilmesinde gerektiğinde deneme-yanılma yöntemi kullanılabilir. Seçilecek kolon sayısı hakkında bir başlangıç tahmini yapabilmek için incelenen FTF 'unda ilgili frekans aralığında görünen mod sayısı tespit edilerek artık modların ve parazitlerin etkisi de dikkate alınarak kolon sayısının mod sayısının 20-30 katı kadar alınmasının yeterli olacağı görülmüştür. Bu seçimin uygun olup olmadığı da tekil değer grafiğinde tekil değerlerin bir asimptota ulaşip ulaşmadığına bakılarak kontrol edilmiştir. Gerektiğinde birkaç deneme yapılarak tekil değerlerin bir asimptota ulaşması sağlanmaya çalışılmıştır. Ancak emin olunamayan durumlarda hatadan sakınmak için en büyük boyutlu matrisin oluşturulmasından da kaçınılmamalıdır.

Bu yöntemde dikkat edilmesi gereken ikinci bir husus da etkin rank değerinin seçilmesidir. Rank değeri incelenen sistemin mod sayısı ile ilişkilidir. Bu değer, tekil değer grafiklerinde ani düşüşün olduğu ve sonrakilerin genliklerinin çok küçük olduğu veya önemli bir değişimin olmadığı konum olarak seçilir. Bu seçimin zor olduğu durumlarda ölçülen ve yöntem uygulanarak filtrelenmiş FTF üste üste çizilerek karşılaştırılmış ve bu işlem farklı rank değerleri için birkaç defa tekrarlanarak bunlar arasından en uygunu seçilmiştir..

Gerek Hankel kolon sayısı gerekse rank değeri incelenen sistemin mod sayısı ile ilgili olduğundan bu değerler birkaç FTF denenerek bir kez belirlendikten sonra aynı

sistem üzerinde ölçülmüş tüm FTF 'ları için aynı değerler kullanılabilir. Bu çalışmada MATLAB kullanılarak hazırlanan yazılım bu işlemin etkili bir şekilde ve görsel olarak yapılabileceğini göstermiştir. Bu tezde geliştirilen FTF 'larından parazitleri ayıklama yöntemi ölçülen FTF 'larını kullanan pek çok analiz için yeni bir ufuk açacağına inanılmaktadır.

8.5 Kaliteli FTF 'ları İçin Takip Edilebilecek Yol

Hataların azaltılmasındaki en önemli tedbir hiç şüphesiz her zaman hata kaynaklarından 'kaçınmak' tır. Özellikle parazitleri azaltmak için deney sisteminde kaliteli ölçüm cihazlarını ve elemanlarını kullanmak, çevresel etkileri en aza indirmek, şase akımlarını önlemek, kablo bükümlerini düzeltmek ve kablo bağlantılarını sağlamlaştırmak gibi ölçümden önce bir takım ön hazırlıkların yapılması gerekir. Bu fiziksel önlemlerin yanında incelenen frekans aralığı dışında kalan frekansları süzecek filtreler kullanılmalı, FTF 'ları hesaplanırken de kuvvet ve cevap sinyallerine uygun ağırlıklandırma (window) fonksiyonları uygulanmalı ve ters-ikiz yanılması (anti-aliasing) filtresi kullanılmalıdır. Diğer taraftan aynı ölçümü birkaç defa tekrarlayarak ortalamalarının alınması da parazitleri azaltabilecektir. Ancak bunlara rağmen parazitlerden tamamen kurtulmak mümkün değildir ve çoğu zaman verilerde önemli ölçüde parazitler bulunmaktadır. Eğer parazitler bu verilerle yapılacak analizleri zorlaştırıyor veya olumsuzlaştırıyorsa bu gibi durumlarda bu çalışmada önerilen teknik ile bu parazitlerin ayıklanması yoluna gidilmelidir. Yöntem uygulanırken de başarı oranını arttırmak ve anlamlı veri kaybına yol açmamak için Hankel kolon sayısının ve etkin rank değerinin seçilmesinde önceden açıklanan yol takip edilmelidir.

Sistemik hatalardan transdüser kütle etkisinden kaçınmanın yolu; ya lazer esaslı çalışan temassız ölçüm sistemlerini kullanmak ya da incelenen yapıya göre oldukça hafif olan transdüserler kullanmaktır. Ancak lazer sistemleri oldukça pahalıdır ve her laboratuarda bulunmayabilir. Kullanılan transdüserin FTF üzerinde etkisi olup olmadığı ve bu etkinin kaldırılmasına gerek duyulup duyulmadığı da basit bir test ile belirlenebilir. Bunun için yapı üzerinde bir FTF ölçüldükten sonra transdüserin bağlandığı konuma transdüser ile aynı kütleli bir kütle koyularak bu FTF tekrar ölçülür ve her ikisi karşılaştırılır. Bu ikisi arasında herhangi bir modda önemli bir

fark olduğuna karar verirse ölçülen FTF 'larından bu kütle etkisinin kaldırılması yoluna gidilmelidir.

Askı yaylarının etkilerini en aza indirmek için mümkün olduğunca ağırlıksız ve oldukça esnek askı elemanlarını kullanmak gerekir. Ayrıca asma yeri olarak düğüm noktalarını veya bunlara yakın konumları seçmek uygun olur. Yapıda büyük yer değiştirmelerin olacağı tahmin edilen konumlar mesnet yerleri olarak seçilmemelidir. Eğer incelenen sistemin sonlu elemanlar gibi bir çözümü var ise mevcut olan bazı yazılımlar kullanılarak ölçümden önce bir test planlaması yapılmalı ve optimum mesnet konumları önceden belirlenmelidir. Ancak buna rağmen özellikle uçak ve uzay teleskopları gibi çok büyük ve esnek yapılarda bu etkilerden kaçınmak mümkün değildir. Literatürde rijit cisim frekansının en küçük elastik mod frekansının %10 'undan büyükse diğer modların etkileneceği belirtilmektedir. Bu gibi durumlarda mesnet etkilerinin kaldırılması yoluna gidilmelidir.

8.6 Gelecekte Yapılabilecek Çalışmalar

Bu tezde FTF ölçümlerinde karşılaşılan hatalardan bazıları giderilerek daha kaliteli FTF 'ları elde edilmesi amaçlanmıştır. Hedeflenen amaçlara önemli ölçüde ulaşılmakla birlikte doğal olarak halen yapılması ve devam ettirilmesi gereken bazı çalışmalar vardır ve bunlar aşağıda özetlenmeye çalışılmıştır:

- i) Öncelikle burada geliştirilen tekniklerin pratikte kullanılmasını sağlamak amacıyla bir yazılım geliştirilebilir. Bunun için MATLAB kullanılarak bir yazılım hazırlanmıştır ancak MATLAB 'dan bağımsız Windows ortamında çalışabilecek bir yazılım geliştirilmesi pratik açıdan daha uygun olacaktır. Bunun için çalışmalar devam etmektedir ve özellikle parazitlerin ayıklanması için geliştirilen yöntemin ticari bir modal analiz yazılımına bir araç olarak eklenmesi uygun görülmüştür.
- ii) Sistemik hataların kaldırılmasında ilave ölçümlere ihtiyaç duyulması yöntemin pratikte yaygın olarak kullanılmasına bir engel teşkil etmektedir. Ancak gerek bu çalışmada gerekse başka çalışmalarda da görüldüğü gibi yapısal değişim tekniklerinde değişim koordinatındaki FTF 'nun ölçülmesi

kaçınılmazdır. Bu nedenle halen daha pratik bir yönteme ihtiyaç duyulmaktadır.

- iii) Gerek burada geliştirilen yöntemlerde gerekse başka modal analiz uygulamalarında açısall yönlerdeki FTF 'larına ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak pratik olarak dönme hareketi ile ilgili FTF 'larını ölçmek de henüz pratik değildir. Bu bakımdan açısall hareketle ilişkili FTF 'larının elde edilmesi de önemli bir araştırma konusudur.
- iv) Bu çalışmanın dışında tutulmakla beraber sistematik hatalardan olan ve yapı-sarsıcı etkileşiminden kaynaklanan etkilerin de FTF 'larından kaldırılması ve bunun için pratik bir yöntemin geliştirilmesi gerekmektedir.
- v) Parazitlerin ayıklanmasında kullanılan TDA tekniğinde etkin rank değerinin belirlenmesi önemli bir parametredir. Bu parametrenin optimum ve otomatik seçimi için bir çalışma yapılabilir.
- vi) Parazit ayıklamada en iyi sonuç FTF yerine ADTF kullanılması durumunda elde edilmiştir. Ancak bu daha fazla hesap zamanı demektir. Çünkü FTF önce ADTF 'na dönüştürülmekte, parazitler ayıklandıktan sonra da ADTF tekrar FTF 'na dönüştürülmektedir. Bu bakımdan aynı performansı sağlayacak ve doğrudan FTF 'larının kullanımına dayalı etkili bir yöntemin geliştirilmesi de yararlı olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1]. **Ewins, D.J.**, 2000. Modal Testing: Theory, Practice and Applications, Second Ed., RSP.
- [2]. **McConnell, K.G.**, 1995. Vibration Testing: Theory and Practice. John Willey & Sons, Inc.
- [3]. **Nuno Manuel Mendes Maia and Julio Martins Montalvao e Silva**, 1996. Theoretical and Experimental Modal Analysis. RSP.
- [4]. **DTA Handbook**, 1994. Support Arrangements for Test Structures. *Modal test Preparation*, 3(32), 1-11.
- [5]. **Stein, P.K.**, 1985. Experimental Error? No! Experimenter's Error! A Measurement Engineer's View of Experimental Modal Analysis. *Proceedings of the 3rd International Modal Analysis Conference*, 824-830.
- [6]. **Marudachalam, K. and Wicks, A.L.**, 1991. An Attempt to Quantify The Errors in The Experimental Modal Analysis. *Proceedings of the 9th International Modal Analysis Conference*, 2, 1522-1527
- [7]. **Wicks, A.L.**, 1991. The Quality of Modal Parameters from Measured Data. *Proceedings of the 9th International Modal Analysis Conference*, 1623-1625.
- [8]. **Jung, H. and Ewins, D.J.**, 1992. On the Use of Simulated "Experimental" Data for Evaluation of Modal Analysis Methods. *Proceedings of the 10th International Modal Analysis Conference*, 421-429.
- [9]. **Mitchell, L.D.**, 1994. Modal Test Methods-Quality, Quantity and Unobtainable. *Sound and Vibration*, November, 10-16.
- [10]. **Ziaei-Rad, S. and Imregun, M.**, 1996. On The Accuracy Required of Experimental Data For Finite Element Model Updating. *Journal of Sound and Vibration*, 196(3), 323-336.
- [11]. **Mace, B.R.**, 1991. The Effects of Transducer Inertia on Beam Vibration Measurements. *Journal of Sound and Vibration*, 145(3), 365-379.
- [12]. **Dossing, Ole**, 1991. Prediction of Transducer Mass-Loading Effects and Identification of Dynamic Mass. *Proceedings of the 9th Int. Modal Analysis Conference*, 306-312.
- [13]. **Decker J., Witfeld, H.**, 1995. Correction of Transducer-Loading Effects in Experimental Modal Analysis. *Proceedings of the 13th Int. Modal Analysis Conference*, 1604-1608.

- [14].**Klosterman, A.**, 1971. On the Experimental Determination and Use of Modal Representations of Dynamic Characteristics. *PhD Thesis*, University of Cincinnati.
- [15].**Silva, J.M.M, Maia, N.M.M, and Riberio, A.M.R.**, 1997. Some Application of Coupling/Decoupling Techniques In Structural Dynamics-Part 1: Solving the Mass Cancellation Problem. *Proc. of the 15th Int. Modal Analysis Conference*, 1431-1439.
- [16].**Silva, J.M.M, Maia, N.M.M, and Riberio, A.M.R.**, 1997. Some Application of Coupling/Decoupling Techniques In Structural Dynamics-Part 2: Generation of The Whole FRF Matrix from Measurements on A Single Column – The Mass Decoupling Method (MUM). *Proceedings of the 15th Int. Modal Analysis Conference*, 1431-1439.
- [17].**Silva, J.M.M, Maia, N.M.M, and Riberio, A.M.R.**, 2000. Cancellation of Mass-Loading Effects of Transducers and Evaluation of Unmeasured Frequency Response Functions. *Journal of Sound and Vibration*. **236**(5), 761-779.
- [18].**Ashroy, M.R.**, 1998. Correction of Mass Loading Effects of Transducers and Suspension Effects in Modal Testing. *Proc. of the 16th Int. Modal Analysis Conference*, 815-828.
- [19].**Ashory, M.R.**, 2002. Assessment of The Mass-Loading Effects of Accelerometers in Modal Testing. *Proceedings of the 20th Int. Modal Analysis Conference*, 1027-1031.
- [20].**McConnell, K.G. and Cappa, P.**, 2000. Transducer Inertia and Stinger Stiffness Effects on FRF Measurements. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **14**(4), 625-636.
- [21].**Allemang, R.J. and Brown, D.L.**, 1996. Modal Analysis and Testing, in *Shock and Vibration Handbook*, 21.1-21.74, Eds. Harris, C.M., McGraw-Hill.
- [22].**Lindholm, B.E. and West, R.L.**, 1994. Determination of Suspension Effects by Direct Experiments and Comparisons to an Analytical Model. *Proceedings of the 12th Int. Modal Analysis Conference*, 262-268.
- [23].**Carne, G.T. and Dohrmann, C.R.**, 1998. Support Conditions, Their Effect on Measured Modal Parameters. *Pro. of the 16th Int. Modal Analysis Conference*, 477-483.
- [24].**Munsi, A.S.M.Y., Waddel, A.J. and Walker, C.A.**, 2002. Modal Analysis of A Lightweight Structure-Investigation of The Effects of The Supports on The Structural Dynamics. *Mechanical Systems And Signal Processing*, **16**(2-3), 273-284.
- [25].**Wade, B.K., Kui, C.P., Glaser, R.J.**, 1986. Extension of Ground-Based Testing for Large Space Structures. *Journal of Spacecraft and Rockets*, **23**(2), 184-188.

- [26].**Nalitolela N.G., Penny, J.E.T. and Friswell, M.I.**, 1992. A Mass Stiffness Addition Technique for Parameter Updating. *The Int. Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis*, 7(3), 157-168.
- [27].**Barney, P., Pierre, M. S., Brown, D. L.**, 1992. Identification of a Modal Model Utilizing a Perturbed Boundary Condition Test Method. *Proceedings of the 10th Int. Modal Analysis Conference*, 1221-1231.
- [28].**Lammens, S., Heylen, W., Sas, P., Brown, D.**, 1993. Model Updating and Perturbed Boundary Condition Testing. *Proc. of the 11th Int. Modal Analysis Conference*, 449-455.
- [29].**Chen, K., Brown, D.L. and Nicolas, V.T.**, 1993. Perturbed Boundary Condition Model Updating, *Proc. of the 11th Int. Modal Analysis Conference*, 661-667.
- [30].**Li, S., Shelley, S. and Brown, D.**, 1995. Perturbed Boundary Condition Testing Concepts. *Proc. of the 13th Int. Modal Analysis Conference*, 902-911.
- [31].**Mitchell, L.D. and Elliot, K.B.**, 1984. A Method For Designing Stingers For Use in Mobility Testing. *Proceedings of the 2nd Int. Modal Analysis Conference*, 872-876.
- [32].**Hieber, G.M.**, 1988. Non-Toxic Stingers. *Proceedings of the 6th Int. Modal Analysis Conference*, 1371-1379.
- [33].**Hu, X., and McConnell, K.G.**, 1993. Stinger Mass Compensation, Part One: Theoretical Study. *The Int. Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis*, 8(1), 35-44.
- [34].**Hu, X., and McConnell, K.G.**, 1993. Stinger Mass Compensation, Part Two: Experimental Investigation. *The Int. Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis*, 8(1), 45-54.
- [35].**Lee J-C. and Chou, Y-F.**, 1993. The Effects of Stingers on Modal Testing. *Proceedings of the 11th Int. Modal Analysis Conference*, 293-299.
- [36].**Lee J-C. and Chou, Y-F.**, 1996. The Effect of Stingers on Receptance Function Measurements. *Journal of Vibration and Acoustics, Trans. of the ASME*, 118, 220-226.
- [37].**McConnell, K.G. and Varoto, P.S.**, 1994. An FE Study The Exciter-Structure Interaction in Vibration Testing. *Proc. of the 12th Int. Modal Analysis Conference*. 1018-1024.
- [38].**McConnell, K.G., Dong, J., Zander, E. and Thekentattil S.**, 1997. Effect of Stinger Stiffness on Measured Accelerance. *Proceedings of the 15th Int. Modal Analysis Conference*. 672-678.
- [39].**Olbrechts, T., Sas, P. and Vandepitte, D.**, 1997. FRF Measurements Errors Caused by The Use of Inertia Mass Shakers. *Proceedings of the 15th Int. Modal Analysis Conference*, 188-194.

- [40].**Tomlinson, G.R.**, 1979. Force Distortion in Resonance Testing of Structures with Electro-Dynamic Vibration Exciters. *Journal of Sound and Vibration*, **63**(3), 337-350.
- [41].**Fahey, S.O., and Wicks, A.L.**, 2000. Noise Sources in Mechanical Measurements. *Experimental Techniques*, **24**(2), 40-43.
- [42].**Bendat, J.S. and Piersol, A.G.**, 1986. Random Data: Analysis and Measurement Procedures. Second Ed. John Wiley&Sons, New York.
- [43].**Mitchell, L.D.**, 1982. Improved Methods for The Fast Fourier Transform (FFT) Calculation of The Frequency Response Function, *Transactions of The ASME, Journal of Mechanical Design*, **104**, 277-279.
- [44].**Wicks, A.L. and Vold H.**, 1986. Hs Frequency Response Function Estimator, *Proceedings of the 5th International Modal Analysis Conference*, 897-402.
- [45].**Mitchell, L.D. and Deel J.C.**, 1987. An Unbiased Frequency Response Function Estimator, *Proceedings of the 4th International Modal Analysis Conference*, 364-373.
- [46].**Park, Y.**, 1993. Improved Estimation of Frequency Response Function, *Proceedings of the 11th International Modal Analysis Conference*, 1049-1054.
- [47].**Ratcliffe, M.J. and Lieven, N.A.J.**, 1999. An Investigation into The Effects of Frequency Response Function Estimators on Modal Updating, *Mechanical Systems and Signal Processing*, **13**(2), 315-334.
- [48].**Marple, Jr., S.L.**, 1987. Digital Spectral Analysis with Applications. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- [49].**Scharf, L.L.**, 1991. Statistical Signal Processing: Detection, Estimation and Time Series Analysis. Addison Wesley.
- [50].**Klema V.C. and Laub, A.J.**, 1980. Singular Value Decomposition: Its Computation and Some Applications. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **AC-25**(2), 164-176.
- [51].**Golub, G.H. and Van Loan, C.F.**, 1989. Matrix Computations. Second Ed. John Hopkins University Press.
- [52].**Press, W.H., Flannery, B.P., Teukolosky, S.A., and Vetterling, W.T.**, 1988. Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing, Cambridge Univ. Press.
- [53].**Maia, Nuno, M.M.**, 1991. Fundamentals of Singular Value Decomposition, *Proceedings of 9th International Modal Analysis Conference*, 1515-1521.
- [54].**Autonne L.**, 1902. *Bull. Soc. Math. France*, **30**(2), 121-133.
- [55].**Eckart, C. and Young, G.**, 1939. A Principal Axis Transformation for non-Hermitian Matrices. *Bull. Amer. Math. Soc.* **45**, 118-121.

- [56].**Eckart, C. and Young, G.**, 1936. The Approximation of One Matrix by Another Lower Rank. *Psychometrika* 1, 211-218.
- [57].**Tufts, D.W., Kumaresan, R. and KIRSTEINS, I.**, 1982. Data Adaptive Signal Estimation by Singular Value Decomposition of A Data Matrix. *Proceedings of The IEEE*, 70(6), 684-685.
- [58].**Tufts, D.W. and Kumaresan, R.**, 1982. Singular Value Decomposition and Improved Frequency Estimation Using Linear Prediction. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, ASSP-30(4), 671-675.
- [59].**Kumaresan, R. and Tufts, D.W.** 1982. Estimating The Parameters of Exponentially Damped Sinusoids and Pole-Zero Modeling in Noise. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, ASSP-30(6), 833-840.
- [60].**Tufts, D.W. and Shah, A.A.**, 1993. Estimation of a Signal Waveform From Noisy Data Using Low-Rank Approximation to a Data Matrix, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 41(4), 1716-1721.
- [61].**Cadzow, J.A.**, 1988. Signal Enhancement-A Composite Property Mapping Algorithm. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 36(1), 49-62.
- [62].**Dologlou, I., Huffel, S.V., and Ormond, D.V.**, 1997. Improved Signal Enhancement Procedures Applied to Exponential Data Modeling, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 45(3), 799-803.
- [63].**Shin, K., Hammond, J.K. and White, P.R.**, 1999. Iterative SVD Method For Noise Reduction of Low-Dimensional Chaotic Time Series. *Mechanical Systems And Signal Processing* 13(1), 115-124.
- [64].**Callaerts, D., De Moor, B., and et al.**, 1990. Comparison of SVD Methods to Extract The Fetal Electrocardiogram from Cutaneous Electrode Signals. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 217-224.
- [65].**De Moor, B.**, 1993. The Singular Value Decomposition and Long and Short Spaces of Noisy Matrices, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 41(9), 2826-2838.
- [66].**Jensen, S.H., Hansen, P.C., and et al.**, 1995. Reduction of Broad-Band Noise in Speech by Truncated QSVD, *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, 3(6), 439-448.
- [67].**Juang, J.N., and Pappa, R.S.**, 1986. Effects of noise on modal Parameters Identified by The Eigensystem Realization Algorithm. *J. Guidance, Control and Dynamics*, 9(3), 294-303.
- [68].**Shih, C.Y., Tsuei, Y.G., Allemang, R.J., Brown, D.L.**, 1988. A Frequency Domain Global Parameter Estimation Method for Multiple Reference Frequency Response Measurements. *Mechanical Systems And Signal Processing* 2(4), 349-365.

- [69].**Shih, C.Y., Tsuei, Y.G., Allemang, R.J., Brown, D.L.**, 1988. Complex Mode Indication Function and Its Applications to Spatial Domain Parameter Estimation. *Mechanical Systems And Signal Processing* **2**(4), 367-377.
- [70].**Lembregts, F., Leuridan, J., Van Brussel, H.**, 1990. Frequency Domain Direct Parameter Identification Method for Modal Analysis: State Space Formulation. *Mechanical Systems And Signal Processing* **4**(1), 65-75.
- [71].**Ibrahim, S.R. and ve Füllekrug, U.**, 1990. Investigation into Exact Normalization of Incomplete Complex Modes By Decomposition Transformation. *Proc. of the 8th Int. Modal Analysis Conference*, **1**, 205-212.
- [72].**Zeng, X., and Wicks A.L.**, 1995. Modal Parameter Identification by Matrix Decomposition, *Proc. of the 13th Int. Modal Analysis Conference*, 35-39.
- [73].**Liu, K.**, 1996. Modal Parameter Estimation Using The State Space Method, *Journal of Sound and Vibration*, **197**(4), 387-400.
- [74].**Radeş, M. and Ewins, D.J.**, 1997. The Aggregate Mode Indication Function, *Proceedings of the 15th International Modal Analysis Conference*, 201-207.
- [75].**To, W.M., and Ewins, D.J.**, 1995. The Role of the Generalized Inverse in Structural Dynamics, *Journal of Sound and Vibration*, **186**(2), 185-195.
- [76].**Otte, D., Leuridan, J., Grangier, H., and Aquilina, R.**, 1990. Coupling of Structures Using Measured FRF's by Means of SVD-Based Data Reduction Techniques, *Proceedings of the 8th International Modal Analysis Conference*, 213-220.
- [77].**Otte, D., Leuridan, J., Grangier, H., and Aquilina, R.**, 1991. Prediction of The Dynamics of Structural Assemblies Using Measured FRF-Data: Some Improved Data Enhancement Techniques, *Proceedings of the 9th International Modal Analysis Conference*, 909-918.
- [78].**Ohayon, R., Sampaio, R. and Soize, C.**, 1997. Dynamic Substructuring of Damped Structures Using Singular Value Decomposition. *Transactions of the ASME, Journal of Applied Mechanics*, **64**, 292-298.
- [79].**Lim, T.C., and Li, J.**, 2000. A Theoretical and Computational Study of the FRF-Based Substructuring Technique Applying Enhanced Least Square and TSVD Approaches, *Journal of Sound and Vibration*, **231**(4), 1135-1157.
- [80].**Gialamas, T.P., Tsahalidis, D.T., Otte, D., Van der Auwaraer, H., and Manolas, D.A.**, 2001. Substructuring Technique: Improvement by means of Singular Value Decomposition (SVD), *Applied Acoustics*, **62**, 1211-1219.
- [81].**Han, M.C. and Wicks, A.L.**, 1990. Force Determination With Slope and Strain Response Measurement. *Proc. of the 8th Int. Modal Analysis Conference*, **1**, 365-372.

- [82].**Lieven, N.A. and Ewins, D.J.**, 1990. Error Location and Updating of Finite Element Models Using Singular Value Decomposition. *Proceedings of the 8th International Modal Analysis Conference*, **2**, 768-773.
- [83].**Liu, K.**, 1997. Application of SVD in Optimization of Structural Modal Test, *Computers & Structures*, **63**(1), 51-99.
- [84].**Pickrel, C.R.**, 1996. Estimating The Rank of Measured Response Data Using SVD and Principal Response Functions, *Proc. 2nd. Int. Conference on Structural Dynamics Modelling, Test Analysis and Correlation. DTA/NAFEMS*, 89-100.
- [85].**Cherng An-Pan.**, 1998. Formulation of Hankel Singular Values and Singular Vektors in Time Domain. *Proceedings of the 16th Int. Modal Analysis Conference*. 436-442.
- [86].**Kavcic A. and Yang, B.**, 1996. Subspace Tracking with Adaptive Threshold Rank Estimation. *Journal of VLSI Signal Processing*, **14**, 75–91.
- [87].**Strobach, P.**, 1997. Square Hankel SVD Subspace Tracking Algorithms, *Signal Processing*, **57**, 1-18.
- [88].**Dologlou, I., and Carayannis, G.**, 1991. Physical Interpretation of Signal Reconstruction from Reduced Rank, *IEEE Transactions on Signal Processing*, **39**(7), 1681-1682.
- [89].**Hansen, Per C. and Jensen, S.H.**, 1998. FIR Filter Representations of Reduced-Rank Noise Reduction, *IEEE Transactions on Signal Processing*, **46**(6), 1737-1741.
- [90].**Pilgram, B., and Schappacher, W.**, 1998. Estimation Of The Dominant Singular Values For SVD Based Noise Reduction Methods. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, **8**(3) 571-580.
- [91].**Sherman, J., and Morrison, W.J.**, 1950. Adjustment of an Inverse Matrix Corresponding to a Change in one Element of a Given Matrix. *Annals of Mathematical Statistics*, **21**(1), 124-127.
- [92].**Hager, W.W.**, 1989. Updating The Inverse of A Matrix. *SIAM Review*, **31**(2) , 221-239.
- [93].**Level, P., Moraux, D., Drazetic, P., and Tison, T.**, 1996. On A Direct Inversion of The Impedance Matrix in Response Reanalysis. *Communications in Numerical Methods in Engineering*, **12**, 151-159
- [94].**Sanliturk, K.Y., Ewins, D.J., and Stanbridge, A.B.**, 2001. Underplatform Dampers for Turbine Blades: Theoretical Modeling, Analysis and Comparison with Experimental Data. *ASME Journal of the Engineering for Gas Turbines and Power*, **123**(4), 919-929.
- [95].**Sanliturk, K.Y., Ewins, D.J., Elliot, R., and Green, J.S.**, 2001. Friction Damper Optimisation: Simulation of Rainbow Tests. *ASME Journal of the Engineering for Gas Turbines and Power*, **(123)**, 4, 930-939.

- [96].**Petrov, E., Sanlitürk, K., Ewins, D.J., and Elliot, R.,** 2000. Quantitative Prediction of The Effects of Mistuning Arrangement on Resonant Response of a Practical turbine Bladed Disc. *Proceedings 5th National Turbine Engine High Cycle Fatigue (HCF) Conference*, on CD.
- [97].**Akgün, M.A., Garcelon, J.H., and Haftka, R.T.,** 2001. Fast Exact Linear and Non-Linear Structural Reanalysis and the Sherman-Morrison-Woodbury Formulas. *International Journal For Numerical Methods in Engineering*, (50),1587-1606.
- [98].**Sanlitürk K.Y.,** 2002. An Efficient Method For Linear and Nonlinear Structural Modifications. *Proceedings of ESDA2002:6th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis*, Istanbul, Turkey, July 8-11, APM028.
- [99].**Cakar, O., and Sanlitürk, K.Y.,** 2002. Elimination of Noise and Transducer Effects from Measured Response Data. *Proceedings of ESDA2002:6th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis*, Istanbul, Turkey, July 8-11, APM055, on CD.
- [100].**Skingle, G.W.,** 1989. Structural Dynamic Modification Using Experimental Data. *PhD Thesis*, University of London.

EK A

FOURIER ANALİZİ

Bu ekte modal test uygulamalarında gerekli olan Fourier analizinin bazı önemli özellikleri açıklanmaya çalışılacaktır. Özellikle bir yapı üzerinde belirli bir zaman aralığında ölçülmüş kuvvet ve cevap sinyallerinden FTF 'larının hesaplanması için Fourier dönüşümlerinden faydalanılmaktadır.

A.1 Fourier Serisi

T zamanı boyunca periyodik olan bir $x(t)$ fonksiyonu sonsuz sayıdaki sinüsoidlerle ifade edilebilir:

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

Burada,

$$\omega_n = \frac{2\pi n}{T} \quad (\text{A.2})$$

ve katsayılar ise aşağıdaki ifadelerle verilir:

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) dt \quad (\text{A.3a})$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos \omega_n t dt \quad (\text{A.3b})$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin \omega_n t dt \quad (\text{A.3c})$$

Alternatif gösterim biçimleri

(a)

$$x(t) = c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (c_n \cos \omega_n t + \phi_n) \quad (\text{A.4})$$

Burada,

$$c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad ; \quad \phi_n = \tan^{-1} \left(-\frac{b_n}{a_n} \right) \quad (\text{A.5})$$

(b)

$$x(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} X_n e^{j\omega_n t} \quad (\text{A.6})$$

Burada,

$$X_n = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) e^{-j\omega_n t} dt \quad (\text{A.7})$$

Not:

$$\begin{aligned} X_{-n} &= X_n^* \quad ; \quad \operatorname{Re}(X_n) = \frac{a_n}{2} \\ \operatorname{Im}(X_n) &= -\frac{b_n}{2} \\ |X_n| &= \frac{c_n}{2} \end{aligned} \quad (\text{A.8})$$

A.2 Fourier Dönüşümü

Periyodik olmayan bir fonksiyon

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)| dt < \infty \quad (\text{A.9})$$

şartını sağlıyorsa aşağıdaki integral ile temsil edilebilir:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} (A(\omega) \cos \omega t + B(\omega) \sin \omega t) d\omega \quad (\text{A.10})$$

Burada,

$$A(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cos \omega t dt \quad ; \quad B(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \sin \omega t dt \quad (\text{A.11})$$

Alternatif gösterim biçimi

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (\text{A.12})$$

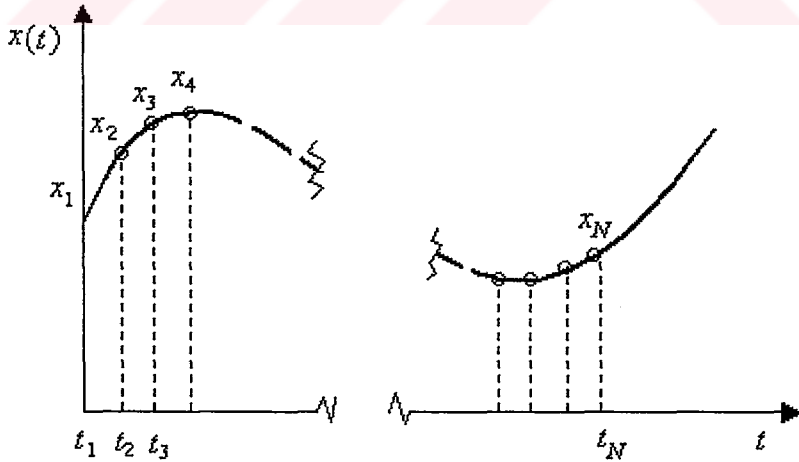
Burada,

$$X(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{j\omega t} dt \quad (\text{A.13})$$

Not:

$$\begin{aligned} \text{Re}(X(\omega)) &= \frac{A(\omega)}{2} \\ \text{Im}(X(\omega)) &= \frac{B(\omega)}{2} \\ X(-\omega) &= X^*(\omega) \end{aligned} \quad (\text{A.14})$$

A.3 Ayırık Fourier Serisi/Dönüşümü (AFD)



Şekil A.1 N tane ayırık noktadan oluşan bir zaman sinyali.

Şekil A.1 'deki gibi N noktada ($t=t_k$, $k=1, \dots, N$) tanımlı bir fonksiyon sonlu bir seri ile temsil edilebilir:

$$x(t_k) = x_k = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\frac{N}{2} \text{ veya } (\frac{N-1}{2})} \left(a_n \cos \frac{2\pi nk}{N} + b_n \sin \frac{2\pi nk}{N} \right) \quad (\text{A.15})$$

Burada,

$$a_0 = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N x_k; \quad a_n = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k \cos \frac{2\pi nk}{N}; \quad b_n = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k \sin \frac{2\pi nk}{N} \quad (\text{A.16})$$

Alternatif gösterim biçimi

$$x(t_k) = x_k = \sum_{n=0}^{N-1} X_n e^{2\pi jnk/N} \quad (\text{A.17})$$

Burada,

$$X_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_k e^{-2\pi jnk/N} \quad n=1, \dots, N \quad (\text{A.18})$$

Not:

$$X_{N-r} = X_r^*$$

EK B

ECKART-YOUNG TEOREMİ

1936 yılında Eckart ve Young [56] verilen bir matrisi, daha küçük ranklı başka bir matrisle yaklaşık olarak ifade etmek için bir teorem geliştirmişlerdir [57]. Yine Eckart ve Young [55] böyle bir yaklaşımın TDA ile bulunabileceğini göstermişlerdir [50]. Herhangi bir kompleks $[A]$ matrisinin TDA 'sı aşağıdaki gibi üç matrisin çarpımıyla ifade edilir:

$$[A]_{M \times N} = [U]_{M \times M} [\Sigma]_{M \times N} [V]_{N \times N}^H \quad (\text{B.1})$$

$[A]_{M \times N}$ matrisi, rankı p olan kompleks elemanlı bir matris olsun. $[S_r]$ ise rankı r ($r < p$) olan $M \times N$ boyutundaki matrisleri gösterebilir. $[S_r]$ içindeki tüm $[B]$ matrisleri için

$$\|A - \bar{A}\| \leq \|A - B\| \quad (\text{B.2})$$

yazılabilir. Burada

$$[\bar{A}] = [U][\Sigma_r][V]^H \quad (\text{B.3})$$

ve $[\Sigma_r]$, (B.1) denklemi ile hesaplanan $[\Sigma]$ matrisinde r tane büyük tekil değer haricindekilerin değeri sıfır yapılarak bulunur. (B.2) denklemindeki matris normu, Frobenius normudur.

$$\|A - B\|^2 = \text{iz}([A - B]^H [A - B]) \quad (\text{B.4})$$

Burada $\text{iz}()$, matris izidir (trace). (B.3) denkleminde $[\bar{A}]$ 'ya, verilen matrise daha düşük r rankı ile en küçük kareler yaklaşımıdır denilir.

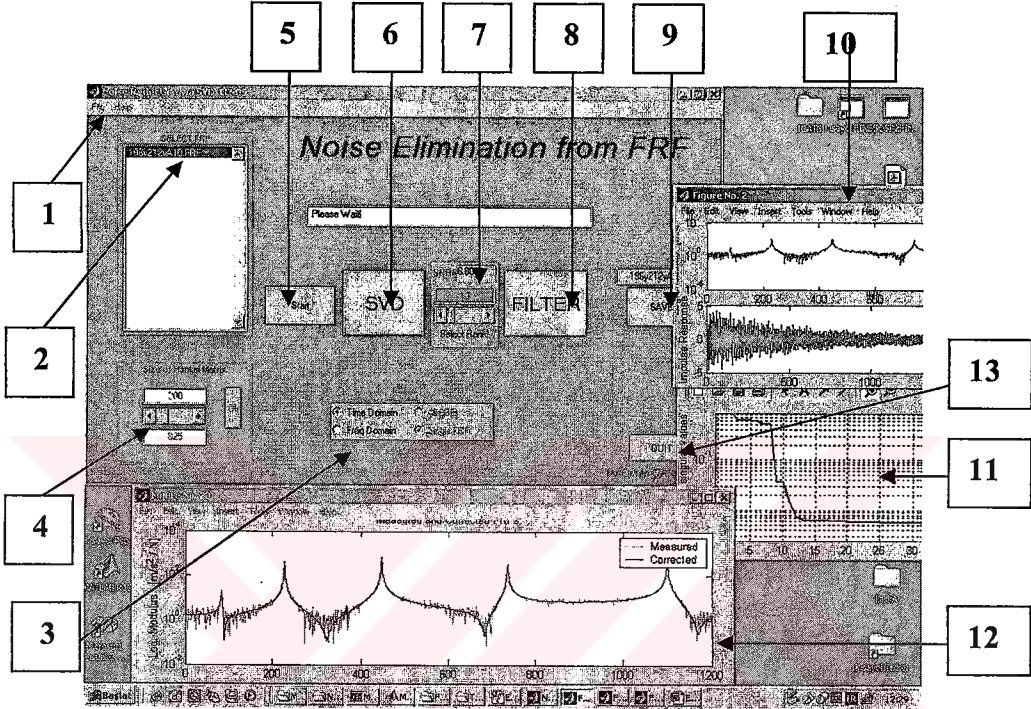
Minimum varyans yaklaşımı

En küçük kareler yaklaşımına alternatif olarak aşağıda verilen minimum varyans yaklaşımı da kullanılabilir.

$$[\bar{A}] = [U][\Sigma_r]^{-1}([\Sigma_r]^2 - \sigma_{\text{parazit}}^2 [I])[V]^H \quad (\text{B.5})$$

EK C

PARAZİT AYIKLAMA İÇİN MATLAB 'DE GELİŞTİRİLEN YAZILIM



Şekil C.1 Parazit ayıklama için MATLAB 'de geliştirilen yazılım (ELNOS V1.0b).

Tablo C.1 ELNOS yazılımındaki menu ve tuşların açıklaması.

GÖREV ADI	İŞLEM	GÖREV ADI	İŞLEM		
1	Dosya açma	Bir tane veya bir grup FTF açılabilir.	8	FILTER tuşu	Parazitlerin ayıklanması
2	FTF Listeleme kutusu	İncelenecek FTF 'larının listesi.	9	SAVE tuşu	Filtrelenmiş FTF 'nun ICATS FRF formatında saklanması.
3	Yöntem seçimi	Zaman veya Frekans bölgesinde bir grup veya tek FTF inceleme durumuna göre 4 seçenek mevcuttur.	10	Grafik 1	İncelenen FTF ve ADTF çizimleri
4	Hankel kolon sayısı seçimi	Tek FTF incelenecekse Hankel matrisinin kolon sayısı istenildiği gibi değiştirilebilir.	11	Grafik 2	Tekil değer grafiği
5	START tuşu	Hazırlık safhası, Veri matrisinin oluşturması, ters Fourier dönüşümü gibi.	12	Grafik 3	Ölçülen ve Filtrelenmiş FTF 'nun karşılaştırılması
6	SVD tuşu	TDA işlemi	13	QUIT	Program kapatma tuşu
7	Rank seçimi	Grafik 2' ye bakılarak rank değeri seçilebilir.			

EK D

EKLEMELİ VE ÇARPIMSAL TİP PARAZİTLER

Eklemeli ve çarpımsal tip parazitler MATLAB 'de `IMNOISE()` fonksiyonu ile sunulmaktadır. MATLAB Help dosyalarından bu fonksiyonun kullanımına ulaşılabilir.

a) Eklemeli Parazit (Gaussian White Noise)

Eklemeli parazit ortalama değeri sıfır ($P1=0$) ve varyansı $P2$ olan rastlantısal sayılardan üretilmektedir. Orijinal veri a ve parazitli veri b olmak üzere `imnoise()` fonksiyonunun karşılık gelen satırları aşağıdaki gibidir:

$$b = a + \text{sqrt}(P2)*\text{randn}(\text{size}(a)) + P1; \quad (\text{D.1})$$

FTF kompleks bir fonksiyon olduğundan $P2$ varyansı, istenilen oranda FTF 'nun gerçel ve sanal kısımlarının mutlak değerlerinin ortalamaları alınarak hesaplanmıştır.

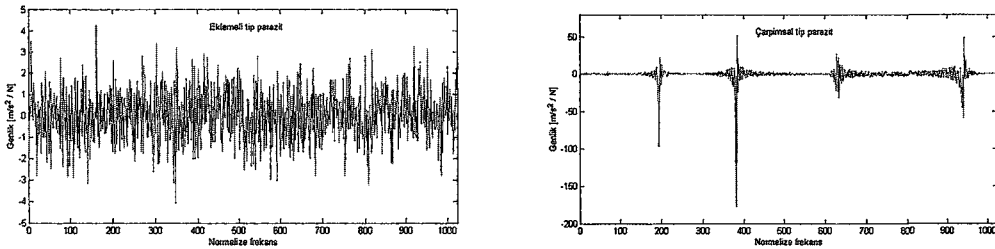
a) Çarpımsal Parazit (Multiplicative Noise)

Bu tip parazitli veriler $b=a+n*a$ formülüne göre elde edilmektedir. Burada n ortalaması sıfır ve varyansı $P2$ olan üniform dağılımlı parazitlerdir. `imnoise()` fonksiyonunun karşılık gelen satırları da aşağıdaki gibidir:

$$b = a + \text{sqrt}(12*P2)*a.*(\text{rand}(\text{size}(a))-0.5); \quad (\text{D.2})$$

Burada da FTF kompleks olduğundan bu parazitler gerçel ve sanal kısımlar için ayrı ayrı hesaplanarak FTF 'larına eklenmiştir. $P2$ ise istenilen parazit oranıdır.

Örnek bir FTF için (Şekil 6.13 'deki FTF) %10 oranında hesaplanan eklemeli ve çarpımsal tip parazitlerin grafikleri de Şekil D.1 'de gösterilmiştir.

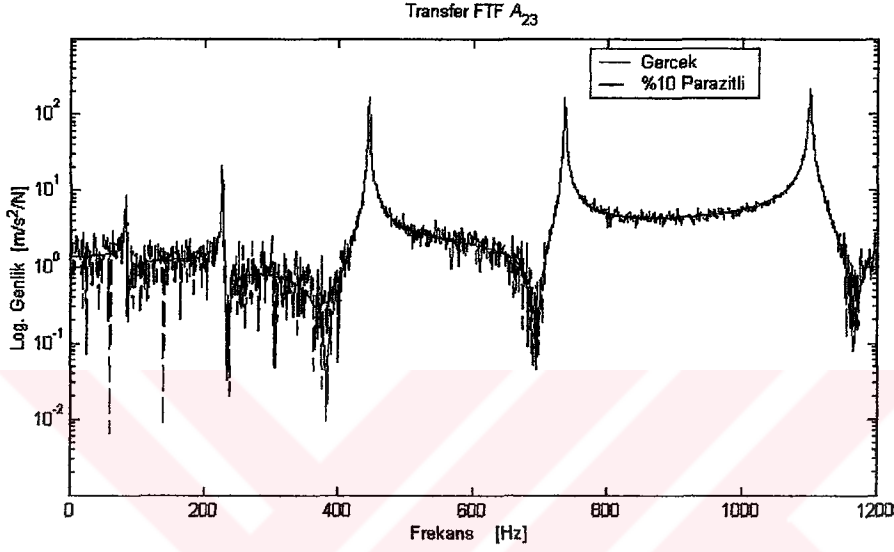


(a) (b)

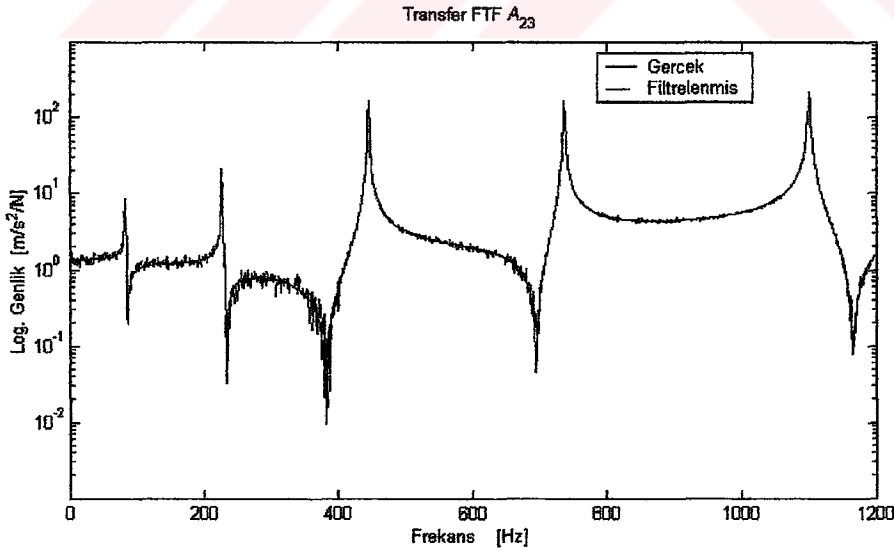
Şekil D.1 %10 oranında hesaplanmış a) eklemeli ve b) çarpımsal tip parazitler.

EKE

BİR GRUP FTF 'NUN KULLANIMINA DAYALI YÖNTEM İÇİN UYGULAMALAR

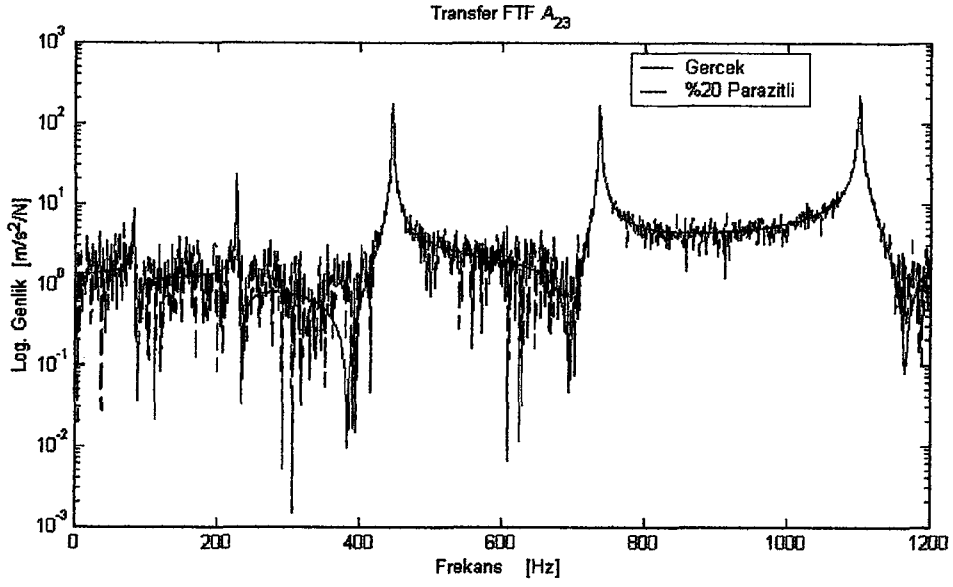


a) Gerçek ve %10 eklemeli parazitli FTF, A_{23} .

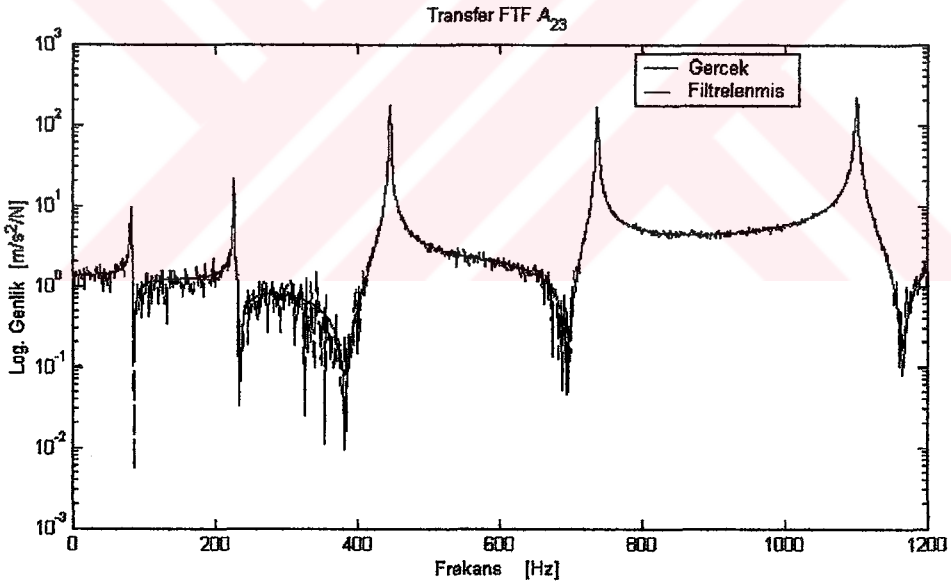


b) Gerçek ve Filtrelenmiş FTF, A_{23} .

Şekil E.1 Gerçek, parazitli ve filtrelenmiş FTF, A_{23} 'ün karşılaştırılması (%10 eklemeli parazit durumu).



a) Gerçek ve %20 eklemeli parazitli FTF, A_{23} .

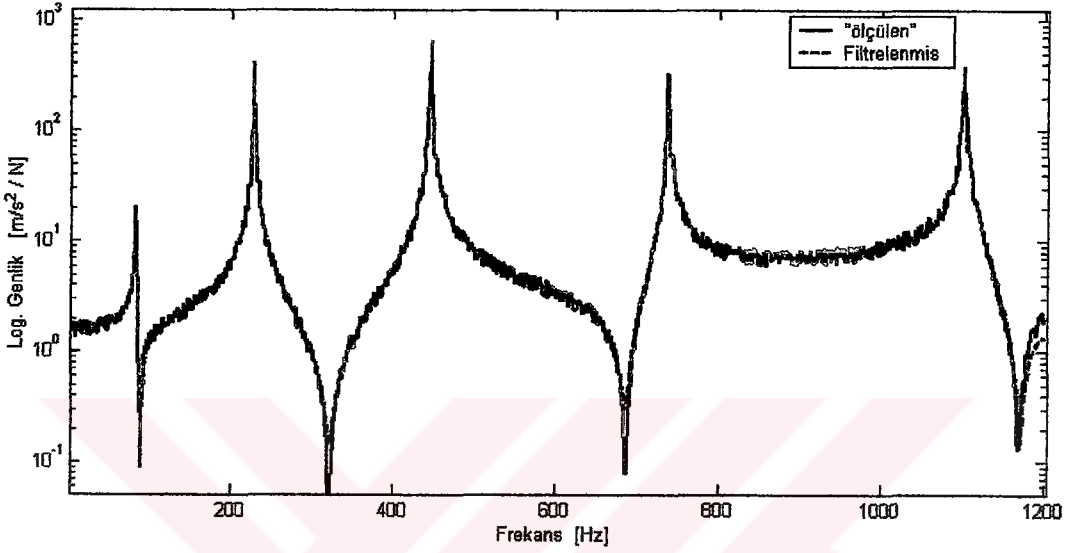


b) Gerçek ve Filtrelenmiş FTF, A_{23} .

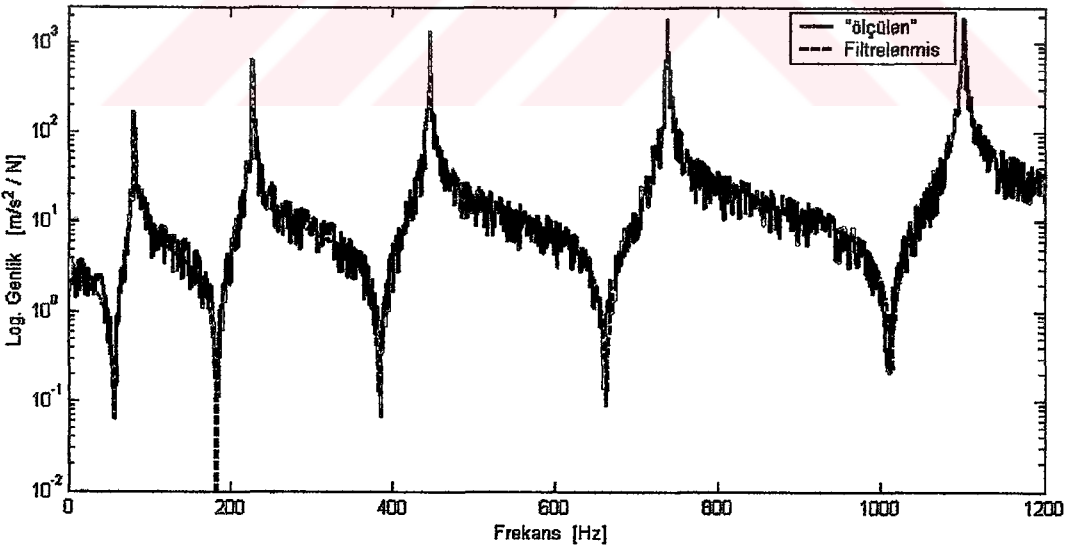
Şekil E.2 Gerçek, parazitli ve filtrelenmiş FTF, A_{23} 'ün karşılaştırılması (%20 eklemeli parazit durumu).

EK F

BİR FTF 'NUN KULLANIMINA DAYALI YÖNTEM İÇİN UYGULAMALAR



Şekil F.1 %1 çarpımsal parazitli ve filtrelenmiş FTF 'larının karşılaştırılması (A_{13}).



Şekil F.2 %10 çarpımsal parazitli ve filtrelenmiş FTF 'larının karşılaştırılması (A_{11}).

EK G

PARZİT AYIKLAMA TEKNİĞİNİN YAPISAL BİRLEŞTİRMEDEKİ PERFORMANSININ İNCELENMESİ

G.1 Giriş

Bir tür yapısal değişim olan yapısal birleştirme, karmaşık yapıların analizinde oldukça faydalı olan bir tekniktir. Bu teknikte yapılar daha basit alt elemanlara ayrılarak her birinin dinamik analizi ayrı ayrı yapıldıktan sonra uygun bir şekilde bir araya getirilir ve böylece komple sistemin dinamik özellikleri belirlenmiş olur. Literatürde yapısal değişim için bir çok farklı yaklaşım olmakla birlikte bunların çoğu analitik çalışmalardır ve her zaman deneysel modellere kolayca uygulanamayabilir. Deneysel modellere kolayca uygulanabilen yöntemlerden biri "Empedans Birleştirme" (Impedance Coupling) olarak bilinen yöntemdir. Bu yöntem yapının cevap özelliklerini kullanmaktadır. Empedanslar (diğer adıyla dinamik dirençlik) FTF 'larının tersi alınarak elde edileceği zaman yöntemde matris terslerinin hesabına gerek duyulmaktadır. Ancak matris terslerinin alınmasında önemli problemler ortaya çıkmaktadır. FTF 'larındaki az miktardaki parazitler bile tahmin edilemez hataların ortaya çıkmasına neden olmaktadır.

Burada, empedans bağlama tekniğinin teorisi kısaca verilerek yöntemin uygulanmasında probleme neden olan hesaplar gösterilmeye çalışılacak ve basit iki mekanik sistem birleştirilerek bu problemin FTF 'ları üzerindeki etkisi gösterilecektir. Daha sonra bu tez çalışmasında geliştirilen ve 7. bölümde sunulan teknik ile FTF 'ları üzerindeki parazitler ayıklandıktan sonra aynı sistemler birleştirilerek geliştirilen yöntemin performansı incelenecektir.

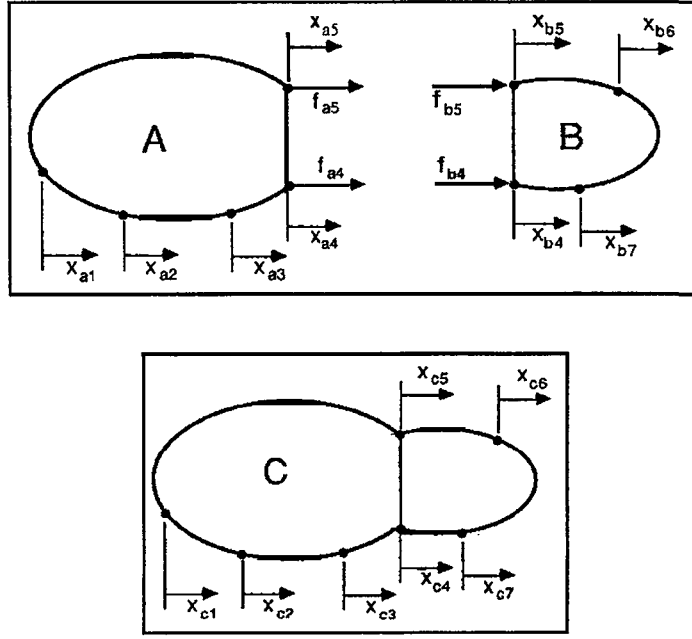
G.2 Empedans Bağlama Tekniği

Bu yöntemi açıklamak üzere örnek olarak Şekil G.1 'de verilen A ve B gibi iki elemanın 4 ve 5 nolu koordinatlarda birleştirilerek C yapısının oluşturulduğu göz önüne alınsın. İki alt sistemin birleşiminden oluşan C sistemi göz önüne alındığında bağlantı noktasındaki uygunluk ve denge şartları aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$x_{a4} = x_{b4} = x_{c4} \quad \text{ve} \quad x_{a5} = x_{b5} = x_{c5} \quad (\text{G.1a})$$

$$f_{a4} + f_{b4} = f_{c4} \quad \text{ve} \quad f_{a5} + f_{b5} = f_{c5} \quad (\text{G.1b})$$

Burada FTF ölçümlerine uygun olması bakımından empedans yerine bunun tersi olan reseptanslar kullanılacaktır. Bu şekilde elde edilen denklemler hız ve ivme tipindeki FTF 'ları için de geçerli olmaktadır. Buna göre her bir sistem için aşağıdaki ifadeler yazılabilir:



Şekil G.1 İki mekanik sistemin birleştirilmesi.

$$\{f_a\} = [\alpha_a]^{-1} \{x_a\}, \{f_b\} = [\alpha_b]^{-1} \{x_b\} \text{ ve } \{f_c\} = [\alpha_c]^{-1} \{x_c\} \quad (G.2)$$

(G.1b) ile verilen denge denklemleri kullanılarak,

$$\{f_c\} = \{f_a\} \oplus \{f_b\} = ([\alpha_a]^{-1} \{x_a\}) \oplus ([\alpha_b]^{-1} \{x_b\}) \quad (G.3)$$

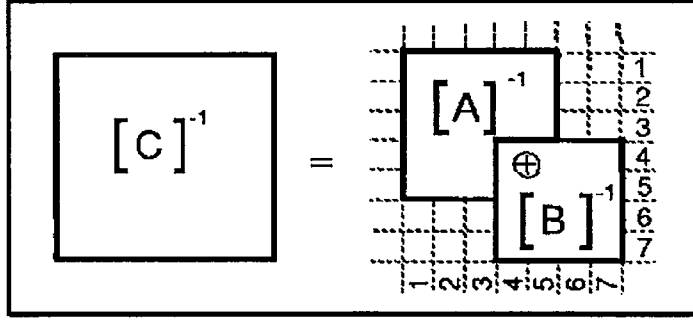
yazılabilir. Burada toplam işareti \oplus , fiziksel olarak bağlamada kullanılacak koordinatların toplanacağını göstermektedir. (G.1a) 'daki uygunluk denklemleri kullanılarak,

$$\{f_c\} = ([\alpha_a]^{-1} \oplus [\alpha_b]^{-1}) \{x_c\} \quad (G.4)$$

denklemini elde edilir ve buradan C sisteminin resaptansı A ve B sistemlerine bağlı olarak aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$[\alpha_c]^{-1} = [\alpha_a]^{-1} \oplus [\alpha_b]^{-1} \quad (G.5)$$

Bu denklem Şekil G.2 'deki gibi bir diyagram ile şematik olarak gösterilebilir.



Şekil G.2 İki mekanik sistemin reseptanslarının birleştirilmesinin şematik gösterimi.

(G.5) denklemi ile verilen değişim denkleminde yapılan bazı düzenlemeler ile buradaki bir kısım ters işlemleri elenebilmektedir. Kolay anlaşılması bakımından (G.5) denklemi,

$$[C]^{-1} = [A]^{-1} \oplus [B]^{-1} \quad (G.6)$$

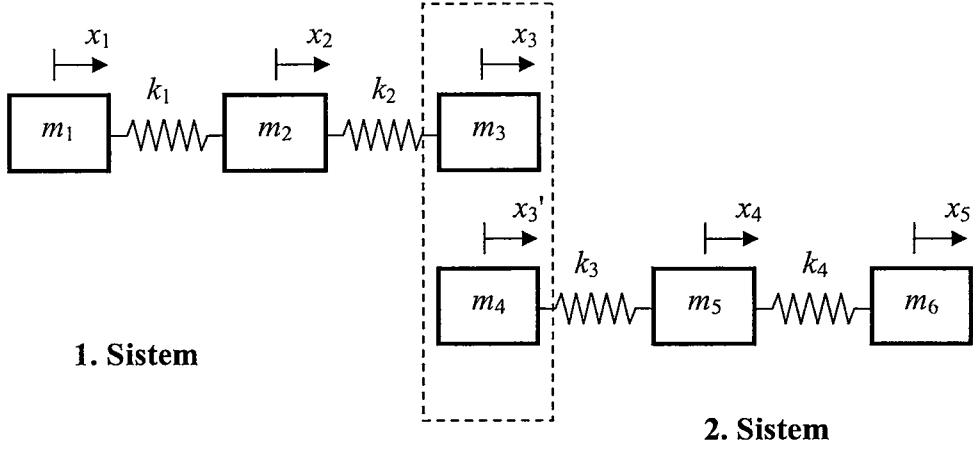
biçiminde ifade edilerek,

$$[C] = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{21} & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & B_{33} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} A_{12} \\ A_{22} \\ B_{32} \end{bmatrix} [A_{22} + B_{22}]^{-1} \{A_{21}A_{22} - B_{23}\} \quad (G.7)$$

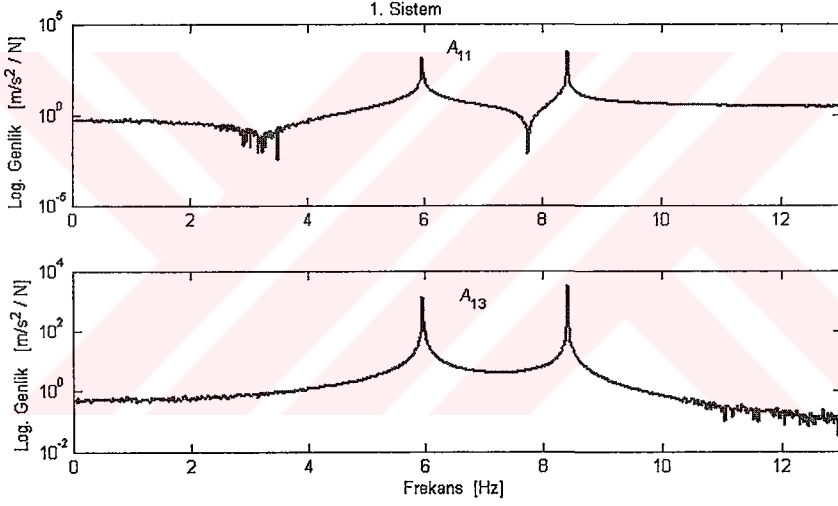
denklemi elde edilebilmektedir (Detaylı bilgi için Bak : Skingle [100]). Burada A11, A12 ... gibi gösterilen elemanlar bir sayı, bir alt-matris veya bir alt-vektör olabilir. (G.7) denklemi hız ve ivme tipindeki FTF 'ları için de geçerlidir. Denklem (G.7) 'de sadece bir ters matris hesabına gerek duyulmaktadır. Buna rağmen, aşağıdaki uygulamada görüleceği gibi FTF 'larında çok az miktarda parazit olması durumunda bile bu ters alma işleminin yöntemin doğruluğunu olumsuz yönde etkileyeceği görülecektir.

G.3 Sayısal Uygulama

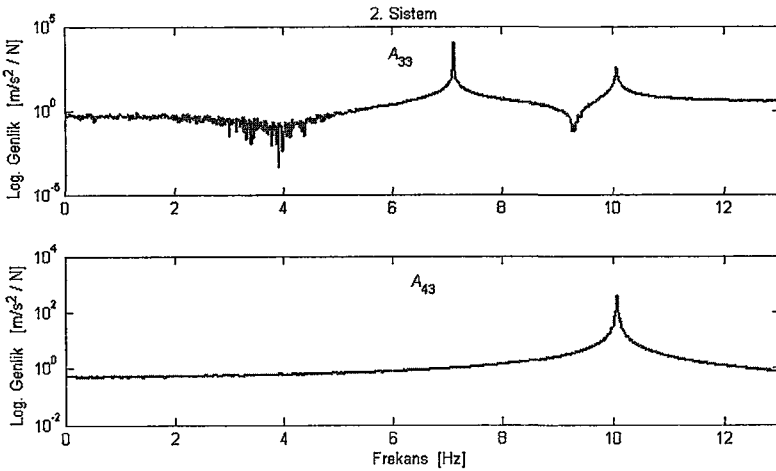
Şekil G.3 'de verilen 3 serbestlik dereceli iki kütle-yay sistemi x_3 ve x'_3 koordinatlarından birleştirilmektedir. Bu uygulamada her iki sistemin FTF 'ları ayrı ayrı hesaplanmış ve % 0.5 gibi çok az sayılabilecek oranda parazitler eklenmiştir. Her iki sistem için hesaplanan FTF 'larından bazıları Şekil G.4 ve G.5 'de verilmiştir. Bundan sonra bu iki sistemin FTF 'ları yukarıda açıklanan teknik ile birleştirilecektir. Ayrıca bu tezde geliştirilen ve 7. Bölümde sunulan parazit ayıklama tekniği ile parazitler ayıklandıktan sonra birleştirme işlemi tekrarlanacak ve her iki durumda elde edilen sonuçlar karşılaştırılacaktır.



Şekil G.3 İki mekanik sistemin birleştirilmesi ($k_1=k_2=700$ N/m, $k_3=k_4=1000$ N/m, $m_1=m_3=m_4=m_6=0.5$ kg, $m_2=m_5=1$ kg).



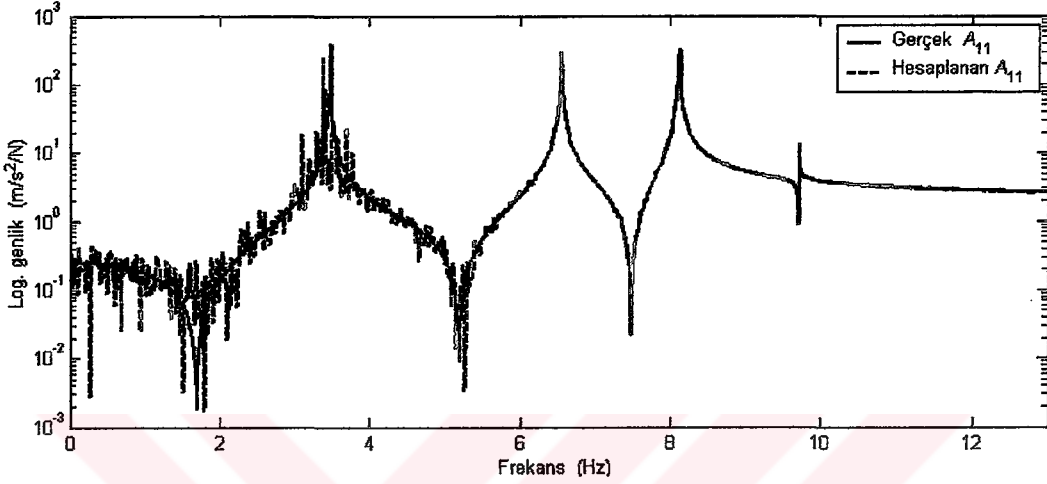
Şekil G.4 Birinci sistemin FTF 'larından A_{11} ve A_{13} (%0.5 parazitli).



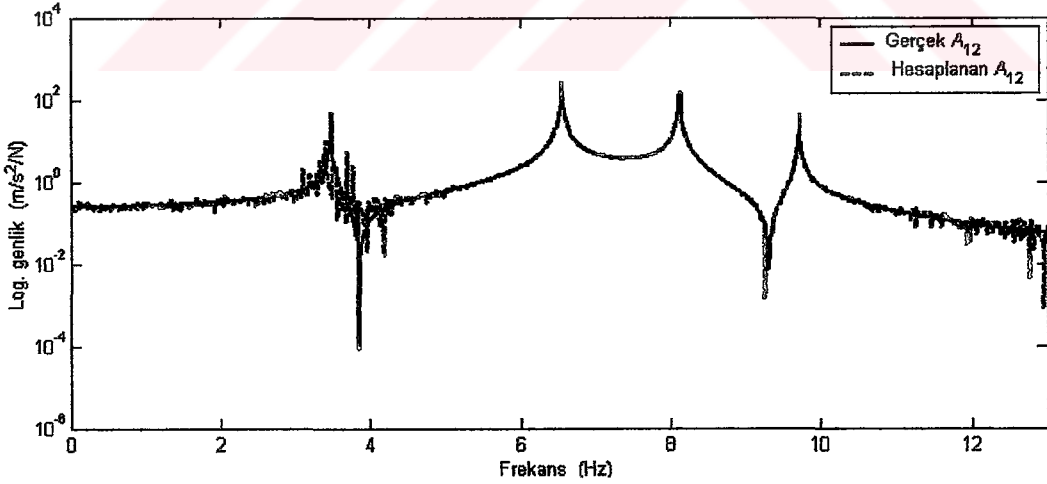
Şekil G.5 İkinci sistemin FTF 'larından A_{33} ve A_{43} (%0.5 parazitli).

a) İki Sistemin Direk Birleştirilmesi

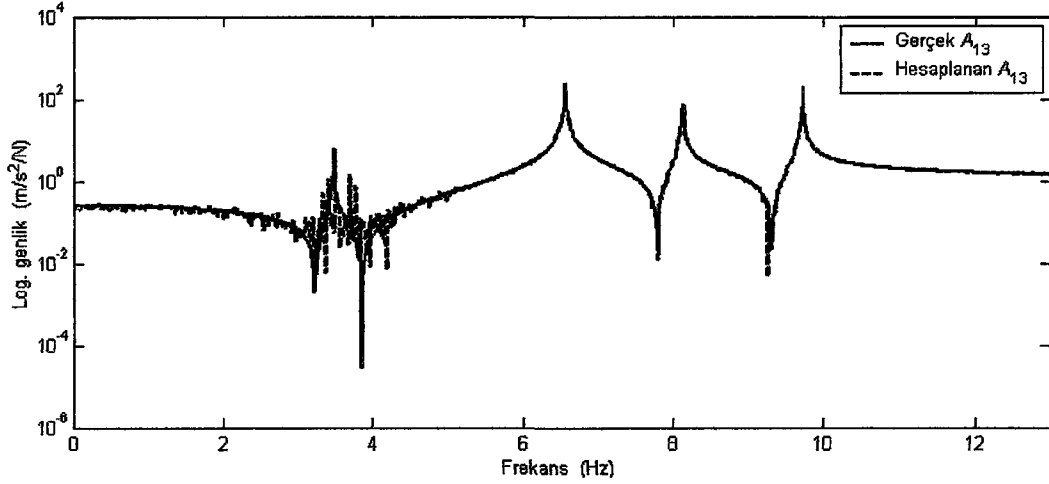
Bu iki sistem yukarıda verilen (G.7) denklemi yardımıyla bir araya getirilerek birleşik sistemin FTF 'ları elde edilmiştir. Elde edilen bu FTF 'larından A_{11} , A_{12} ve A_{14} Şekil G.6-8 'de verilmiştir. Bu şekillerde yöntemin % 0.5 gibi çok küçük bir parazit oranında bile olumsuz olarak etkilendiği ve hesaplanan FTF 'larında parazit oranının daha da arttığı görülmektedir.



Şekil G.6 Birleştirilmiş sistemin 'gerçek' ve hesaplanan FTF 'larının karşılaştırılması (% 0.5 Parzitli).



Şekil G.7 Birleştirilmiş sistemin 'gerçek' ve hesaplanan FTF 'larının karşılaştırılması (% 0.5 Parzitli).



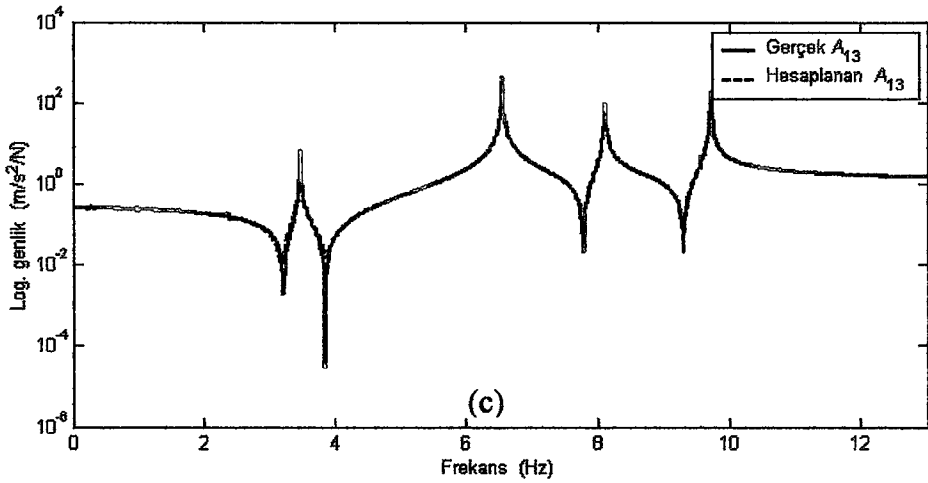
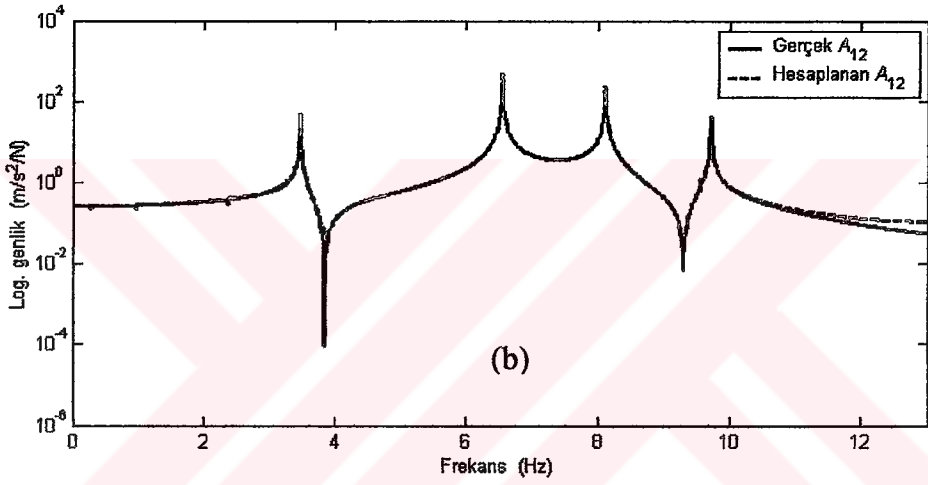
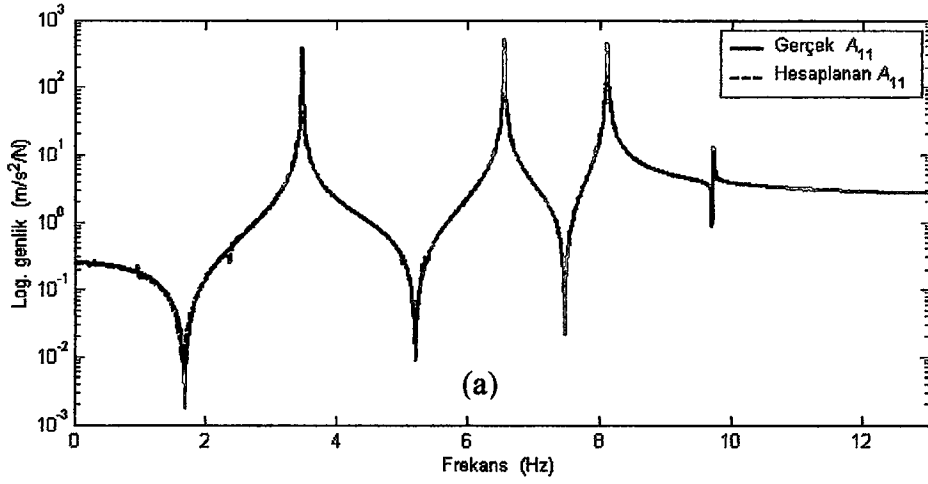
Şekil G.8 Birleştirilmiş sistemin 'gerçek' ve hesaplanan FTF 'larının karşılaştırılması (% 0.5 Parazitli).

b) İki Sistemin Parazitler Ayıklandıktan Sonra Birleştirilmesi

Bu tezde geliştirilen ve 7. Bölümde sunulan parazit ayıklama tekniği ile FTF 'larındaki parazitler ayıklanmış ve sistem tekrar birleştirilmiştir. Bu durumda elde edilen FTF 'ları da Şekil G.9 'da verilmiştir. Bu şekillerde parazitleri ayıklandıktan sonra yapılan birleştirmenin daha başarılı ve güvenilir olduğu açıkça görülmektedir.

G.4 Sonuç ve Değerlendirme

Burada, 7. Bölümde geliştirilen parazit ayıklama tekniğinin yapısal birleştirme yöntemlerinden 'Empedans Bağlama' tekniğindeki performansı incelenmiştir. Bu teknikte FTF matrisinin tersinin alınmasına gerek duyulmaktadır. Ancak verilerdeki çok küçük oranlardaki parazitlerin bile (buradaki uygulamada % 0.5) yöntemden elde edilen sonuçların güvenilirliği azalmaktadır. Ancak bu çalışmada geliştirilen parazit ayıklama tekniği ile FTF 'larındaki parazitler ayıklandıktan sonra yapısal birleştirme tekniğinin uygulanması ile sonuçların güvenilirliğinin artırılacağı görülmüştür.



Şekil G.9 Parazitler ayıklandıktan sonra birleştirilmiş sistemin 'gerçek' ve hesaplanan FTF 'larının karşılaştırılması a) A_{11} , b) A_{12} , c) A_{13} .

ÖZGEÇMİŞ

Orhan ÇAKAR, 1968 yılında Elazığ 'da doğdu. 1990 yılında Fırat Üniversitesi Makina Mühendisliği bölümünden mühendislik unvanı aldı. 1991-1992 yılları arasında askerlik hizmetini yaptı. 1994 yılında Fırat Üniversitesi Makina Mühendisliği bölümünde araştırma görevliliğine atandı ve 1995 yılında F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Teorisi ve Dinamiği programından Yüksek Mühendislik unvanı aldı. Aynı yıl F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsünde doktora çalışmalarına başladı. 1996 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Fakültesinde bazı doktora derslerine katılmak üzere görevlendirildi. 1998 yılında tez danışmanının vefatı ve F.Ü 'deki laboratuvar olanaklarının yetersiz olması nedeniyle 1999 yılı sonunda doktora çalışmalarına devam etmek üzere 2547 nolu kanunun 35. Maddesine göre İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde görevlendirildi. Halen İ.T.Ü. Makina Fakültesi, Makina Teorisi Sistem Dinamiği ve Kontrol Ana Bilim Dalında araştırma görevlisi olarak çalışan Çakar evli ve iki çocuk babası.