İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TİTREŞİM VERİLERİ YARDIMIYLA BİLİNMEYEN TAHRİK KUVVETLERİNİN BELİRLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Y. Müh. Ahmet Ali USLU
503041414

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 25 Aralık 2006
Tezin Savunulduğu Tarih: 30 Ocak 2007

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Kenan Y. ŞANLITÜRK
Diğer Jüri Üyeleri: Prof. Dr. Özgür TURHAN
Prof. Dr. Alim Rüstem ASLAN

MART 2007

ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans tez çalışmasını yöneten kıymetli hocam Prof. Dr. Kenan Y. ŞANLITÜRK'e verdiği tavsiyeler ve yaptığı olumlu eleştiriler için teşekkür ederim.

Bu çalışmanın yapılması için olanak sağlayan Arçelik A.Ş. ARGE Titreşim ve Akustik Teknolojileri Ailesi lideri Sn. Dr. Faruk BAYRAKTAR, verdiği destek ve paylaşmaktan çekinmediği bilgi birikimiyle çalışmaya büyük katkı sağlayan Sn. Metin GÜL ve deneysel ölçümlerde yardımları bulunan Sn. Kenan ATAÇ ile Sn. Aleks KUYUMCUĞLU başta olmak üzere tüm bölüm çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım.

Çalışma boyunca manevi desteklerini esirgemeyen değerli dostlarım Onur OĞUZ, Serkan ÖZKAN ile Baran AVCI'ya ve en önemlisi hayatım boyunca her zaman yanımda olan sevgili aileme teşekkürlerimi borç bilirim.

Mart 2007 Ahmet Ali USLU

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ii
İÇİNDEKİLER iii
KISALTMALAR v
TABLO LİSTESİ vi
ŞEKİL LİSTESİ vii
SEMBOL LİSTESİ ix
ÖZET xi
SUMMARY xii

1. GİRİŞ 1

1.1. Literatür Araştırması 2

1.2. Amaç Ve İçerik 7

2. KUVVET BELİRLEME METODLARI 9

2.1 Giriş 9

2.2 Doğrudan Metodlar 12

2.3. Optimizasyon Metodları 14

2.4. Bu Tezde Kullanılan Kuvvet Belirleme Metodu 15

2.5. Sonuç ve Değerlendirme 16

3. FTF TABANLI KUVVET BELİRLEME YÖNTEMİ 17

3.1. Giriş 17

3.2. Frekans Tepki Fonsiyonlarının Ölçümü 20

3.3. Kuvvet Belirlemeye Etki Eden Faktörler 29

3.3.1. FTF Matrisinin Etkisi 29

3.3.2. Ölçülen Koordinat Sayısının Etkisi 31

3.3.3. Ölçüm Kalitesinin Etkisi 32

3.4 Kuvvet Belirleme Yönteminin Akış Şeması 32

4. KUVVET BELİRLEME YÖNTEMİNİN SAYISAL UYGULAMALARI 36

4.1. Sayısal Model 36

4.2. Sayısal Hesaplamalarda Kullanılan Bilgisayar Yazılımları 39

4.3. Sayısal Olarak Tekil Çözümün Belirlenebilmesi İçin Gerekli Şartlar 40

4.4. Düz Levha Üzerindeki Sayısal Uygulamalar 45

4.4.1. Düz Levha Sayısal Modeli 45
4.4.2. Kuvvet Belirleme Uygulamaları 45
4.4.2.1. Sinüzoidal Kuvvet 46
4.4.2.2. Periyodik Kuvvet 50
4.4.2.3. Darbe Kuvveti 53
4.4.2.4. Cıvıltı (Chirp) Kuvvet 55
4.4.2.5. Birden Fazla Koordinattan Tahrik Durumunun İncelenmesi 59
4.5. Kutu Üzerindeki Sayısal Çalışmalar 60
4.5.1. Kutu Sayısal Modeli 60
4.5.2. Kuvvet Belirleme Uygulamaları 61
4.5.2.1. Periyodik Kuvvet 62
4.5.2.2. Birden Fazla Tahrik Durumunun İncelenmesi 64

5. KUVVET BELİRLEME YÖNTEMİNİN DENEYSEL UYGULAMALARI 67
5.1. Deney Düzeneği Ve Ölçümler 67
5.2. L Levha Üzerinde Yapılan Deneysel Çalışmalar 68
5.2.1. Sinüzoidal Kuvvet 69
5.2.2. Rastgele Kuvvet 70
5.2.3. Darbe Kuvveti 73
5.3. Çamaşır Makinası Gövdesi Üzerinde Yapılan Çalışmalar 76
5.3.1. Sinüzoidal Kuvvet 77
5.3.2. Darbe Kuvveti 79
5.4. Deneysel Çalışmada Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi 82
5.4.1. Tekrarlı Ölçümler 82
5.4.2. Çapraz Kontrol 84
5.4.3. Kalibrasyon Hataları 85
5.4.4. Uygulanan Tahrik Kuvvetinin Noktasal Olmaması 86

6. GENEL DEĞERLENDİRME VE GELECEKTE YAPILABİLECEK ÇALIŞMALAR 87
6.1. Genel Değerlendirme 87
6.2. Gelecekte Yapılabilecek Çalışmalar 89

KAYNAKLAR 91

ÖZGEÇMİŞ 93

KISALTMALAR

FTF	: Frekans Tepki Fonksiyonu
FD	: Fourier Dönüşümü
AFD	: Ayrık Fourier Dönüşümü
HFD	: Hızlı Fourier Dönüşümü
TGTÇ	: Tek Girdi Tek Çıktı
TGÇÇ	: Tek Girdi Çok Çıktı
ÇGÇÇ	: Çok Girdi Çok Çıktı
TYF	: Ters Yapısal Filtre
DCF	: Darbe Cevap Fonksiyonu
SEM	: Sonlu Elemanlar Modeli
TDA	: Tekil Değerlerine Ayrıştırma

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: Kuvvet Belirleme Metodlarının Sınıflandırılması 11
Tablo 4.1: 15x15 FTF Matrisinin Kullanıldığı Durumda Gerçek ve Hesaplanan Kuvvet.....41
Tablo 4.2: 15x15 Boyutundaki FTF Matrisinin Tekil Değerleri ve Koşul Sayısı.....42
Tablo 4.3: 15x15 Boyutundaki FTF Matrisinin Tekil Değerleri ve Kısmi Koşul Sayıları.....43
Tablo 4.4: Değişik Denemelere Ait Kuvvet Belirleme Sonuçları.....44

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1: Kuvvet Belirleme Sürecinin Şematik Gösterimi 2
Şekil 2.1: Doğrudan Kuvet Belirleme Metodlarının Şematik Gösterimi 13
Şekil 2.2: Optimizasyon Metodunun Adımlarının Şematik Gösterimi 15
Şekil 3.1: Cevap Belirleme Yönteminin Şematik Gösterimi 18
Şekil 3.2: Tipik İvmeölçerlerin Frekansa Bağlı Duyarlılıkları 22
Şekil 3.3: Modal Çekiç (A) ve Sarsıcı (B) Kullanıldığı Durumda Ölçüm Sistemi ...23
Şekil 3.4: Modal Sarsıcı.....24
Şekil 3.5: Modal Çekiç 24
Şekil 3.6: Sayısal Kuvvet Belirleme Prosedürünün Şematik Gösterimi 34
Şekil 3.7: Deneysel Kuvvet Belirleme Prosedürünün Şematik Gösterimi 35
Şekil 4.1: Sayısal Hesap Yönü 37
Şekil 4.2: 15x15 Boyutundaki FTF Matrisine Ait Tekil Değerler 42
Şekil 4.3: 15x15 boyutundaki FTF Matrisine Ait Kısmi Koşul Sayıları.....44
Şekil 4.4: Düz Levha Sayısal Modeli 45
Şekil 4.5: Tipik Bir Sinüs Sinyalinin Zamana ve Frekansa Bağlı Gösterimi 46
Şekil 4.6: Yapı Üzerindeki Noktalara Ait Kuvvet Dağılımı.....47
Şekil 4.7: 2 no'lu Noktadaki Gerçek ve Hesaplanan Kuvvet 47
Şekil 4.8: Gerçek ve Hesaplanan Kuvvetin Logaritmik Eksende Karşılaştırılması ..48
Şekil 4.9: FTF Matrisinin Koşul Sayısının Frekans ile Değişimi 49
Şekil 4.10: Yapı Üzerinden Alınan FTFlerin Bir Arada Gösterilmesi.....50
Şekil 4.11: Bir Periyodik Kuvvet Sinyalinin Zamana ve Frekansa Bağlı Gösterimi.51
Şekil 4.12: Yapı Üzerindeki Noktalara Ait Kuvvet Dağılımı.....51
Şekil 4.13: 2 no'lu Noktadaki Gerçek ve Hesaplanan Kuvvet 52
Şekil 4.14: Gerçek ve Hesaplanan Kuvvetin Logaritmik Eksende Karşılaştırılması.53
Şekil 4.15: Bir Darbe Kuvvetinin Zamana ve Frekansa Bağlı Gösterimi 54
Şekil 4.16: Yapı Üzerindeki Noktalara Ait Kuvvet Dağılımı.....54
Şekil 4.17: 13 No'lu Noktadaki Hesaplanan ve Gerçek Kuvvet.....55
Şekil 4.18: Bir Sinüzoidal Cıvıltı Sinyalinin Zamana ve Frekansa Bağlı Gösterimi.57
Şekil 4.19: Yapı Üzerindeki Noktalara Ait Kuvvet Dağılımı.....57
Şekil 4.20: 2 No'lu Noktadaki Gerçek ve Hesaplanan Kuvvet 58
Şekil 4.21: Yapı Üzerindeki Noktalara Ait Kuvvet Dağılımı.....59
Şekil 4.22: Hesaplanan ve Gerçek Kuvvetin Ayrıntılı Karşılaştırılması.....60
Şekil 4.23: ADAMS'ta Kullanılan Sayısal Kutu Modeli 61
Şekil 4.24: Kutu Üzerinde Hesaplanan Kuvvet Dağılımı.....62
Şekil 4.25: 24 No'lu Noktada Hesaplanan ve Gerçek Kuvvetin Karşılaştırılması 63
Şekil 4.26: Kutuya Ait FTF Matrislerinin Koşul Sayısının Frekansa Göre Değişimi64
Şekil 4.27: Kutu Üzerinde Hesaplanan Kuvvet Dağılımı.....65
Şekil 4.28: 12. ve 24. Noktalarda Hesaplanan ve Gerçek Kuvvetin Karşılaştırılması 65
Şekil 5.1: Bruel Kjaer Type 2035 Sinyal Analizörü (ve modal çekiç).....67

Şekil 5.2: L Şekilli Levha 68
Şekil 5.3: L Levha üzerinde alınan Frekans Tepki Fonksiyonları 69
Şekil 5.4: Levha Üzerindeki 2 Noktada Belirlenen ve Gerçek Kuvetlerin Spektrumu 70
Şekil 5.5: Farklı Zamanlarda Uygulanan Rastgele Kuvvetlerin Karşılaştırılması.....71
Şekil 5.6: Levha Üzerinde Hesaplanan Rastgele Kuvvet Dağılımı 72
Şekil 5.7: L Levhanın Frekans Tepki Fonksiyonu Matrisine Ait Koşul Sayısı – Frekans Grafiği.....72
Şekil 5.8: L Levha Üzerinde Modal Çekiç ile FTF Ölçümü 73
Şekil 5.9: Farklı Zamanlarda Uygulanan İki Tahrik Kuvvetinin Karşılaştırılması....74
Şekil 5.10: Levha Üzerindeki Kuvvet Dağılımı.....75
Şekil 5.11: FTF Matrisinin Koşul Sayılarının Frekansa Bağlı Değişimi 76
Şekil 5.12: Çamaşır Makinası Gövdesi 77
Şekil 5.13: Gövde Paneli Üzerindeki Noktalara Gelen Kuvvetler.....78
Şekil 5.14: Çamaşır Makinası Gövdesine Uygulanan Darbe Kuvvetlerin Karşılaştırılması 79
Şekil 5.15: Çamaşır Makinası Gövdesi Üzerinde Hesaplanan Kuvvet Dağılımı 80
Şekil 5.16: Çamaşır Makinası Gövdesi Üzerinde Hesaplanan Kuvvet Dağılımı 81
Şekil 5.17: Çamaşır Makinası Gövdesi FTF Matrislerinin Koşul Sayısı-Frekans Grafiği.....81
Şekil 5.18: Çamaşır Gövdesinden Alınan FTFlerin Karşılaştırılması.....84
Şekil 5.19: Simetrik Olması Gereken İki FTF'nin Karşılaştırılması 85

SEMBOL LİSTESİ

$[H(\omega)]$	: Frekans Tepki Fonksiyonu Matrisi
$\{F(\omega)\}$	: Kuvvet Vektörü
$\{X(\omega)\}$	: Titreşim Ölçümü Vektörü
H_{ij}	: Frekans Tepki Fonksiyonu
$f(t)$	: Zamana Bağlı Kuvvet
$x(t)$	: Zamana Bağlı İvme Ölçümü
$[K]$	: Katılık Matrisi
$[M]$	: Kütle Matrisi
$[C]$	: Sönüm Matrisi
$[Z]$	: Dinamik Katılık Matrisi
$\alpha(\omega)$	: Frekans Tepki Fonksiyonu
m_r	: Modal kütle
k_r	: Modal katılık
$[\psi]$	: Özvektör Matrisi
$\{\psi\}$	: Özvektör
$\{\psi\}_r$	: r. Özvektör
$[\phi]$	: Normalize Özvektör Matrisi
$\{\phi\}$	: Normalize Özvektör
$\{\phi\}_r$	: r. Normalize Özvektör
λ	: Özdeğer
η	: Sönüm Katsayısı
$[U]$	: Sol Ortogonal Matris
$[\Sigma]$	: Tekil Değerler Matrisi
$[V]$	: Sağ Ortogonal Matris
s	: Tekil Değer
f_0	: Başlangıç Frekansı
k_t	: Frekans Artım Oranı
i	: Sanal operatör $\sqrt{-1}$
n	: Kuvvet Sayısı
m	: Ölçüm Sayısı
N	: Yapıya Ait Toplam Düğüm Noktası Sayısı, Toplam Veri Sayısı
f_s	: Örnekleme Frekansı
T	: Örnekleme Zamanı
Δt	: Ölçümler Arasındaki Zaman Artımı
Δf	: Frekans Çözünürlüğü
F_k	: Yapının k. Noktasına Uygulanan Tahrik
X_j	: Yapının j. Noktasında Oluşan Tepki

$[\ ]^T$: Matrisin Transpozu

$[\ ]^{-1}$: Matrisin Tersi

$[\ ]^+$: Dikdörtgen Matrisin Genelleştirilmiş Tersi

TİTREŞİM VERİLERİ YARDIMIYLA BİLİNMEYEN TAHRİK KUVVETLERİNİN BELİRLENMESİ

ÖZET

Bir yapıya uygulanan dinamik tahrik kuvvetlerinin belirlenmesi, mekanik sistemlerin tasarım ve optimizasyonunun en önemli adımlarından biridir. Bununla birlikte, çalışma koşullarında yapıya etkiyen bu kuvvetler hakkında doğrudan ölçüm ile her zaman sonuç elde edilemez. Bu ölçümleri yapmak kimi zaman mümkün olmamakta, kimi zaman yapılabilse bile herhangi sebeplerden dolayı kullanışlı olmadıklarından tercih edilmemektedirler. Bu durum, dinamik kuvvetlerin alternatif yollar kullanılarak belirlenmesi ihtiyacını oluşturur. Takım tezgahlarındaki kesme kuvvetleri, yataklardaki tepki kuvvetleri, bazı makina parçalarındaki aerodinamik kaynaklı kuvvetler ve dönel makina parçalarındaki tahrik kuvvetleri, alternatif kuvvet belirleme metodlarının önemini anlatmak için gösterilebilecek kimi örneklerdir.

Dinamik kuvvetlerin belirlenmesi için kullanılabilecek yöntemlerden birisi bu kuvvetleri dolaylı olarak belirlemektir. Bu tezde, sisteme ait Frekans Tepki Fonksiyonlarından ve sistemin dinamik tahrik kuvveti altındaki titreşimlerinden faydalanılarak kuvvetlerin belirlenmesine yönelik bir çalışma anlatılmıştır. Bu prosedür, Frekans Tepki Fonksiyonlarının tersinin alınmasını ve ölçülen titreşim seviyelerinin frekans alanında ifade edilmesini gerektirir. Kuvvet Belirleme Yönteminin uygulanabilirliği sayısal analizler ve ardından da deneysel çalışmalar ile sınanmaya çalışılmıştır. Metod değişik kuvvet tipleri (sinuzoidal, darbe, rastgele, cıvıltı) kullanılarak uygulanmıştır. Eğer yapıya uygulanan kuvvetler hem konum hem de genlik açısından doğru bir şekilde belirlenmek isteniyorsa, bazı sayısal özelliklerin iyi bir şekilde kontrol edilmesi büyük önem taşımaktadır.

Sayısal analizlerden ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar, yüksek kalitede veri kullanılması durumunda oldukça tatmin edici sonuçlar elde edildiğini göstermiştir. Deneysel kısımdaki karmaşık yapılara ait bazı örneklerdeki problemler dışında, kuvvet belirleme yönteminin dinamik kuvvetlerin belirlenmesinde hem yer hem de genlik anlamında oldukça iyi sonuçlar verdiği söylenebilir.

FORCE ESTIMATION USING VIBRATION DATA

SUMMARY

The knowledge of the dynamic forces is an essential requirement during the design and optimization stages of mechanical systems. However, the detailed information about these forces is usually not available as the direct measurement of these forces under running conditions is either very difficult or not feasible at all. This makes alternative methods of force estimation necessary and very valuable. Cutting forces of machine tools, supporting forces of bearings, aerodynamic forces on various machine components and excitation forces on rotating machines are some examples to illustrate the need for alternative methods to identify the dynamic forces.

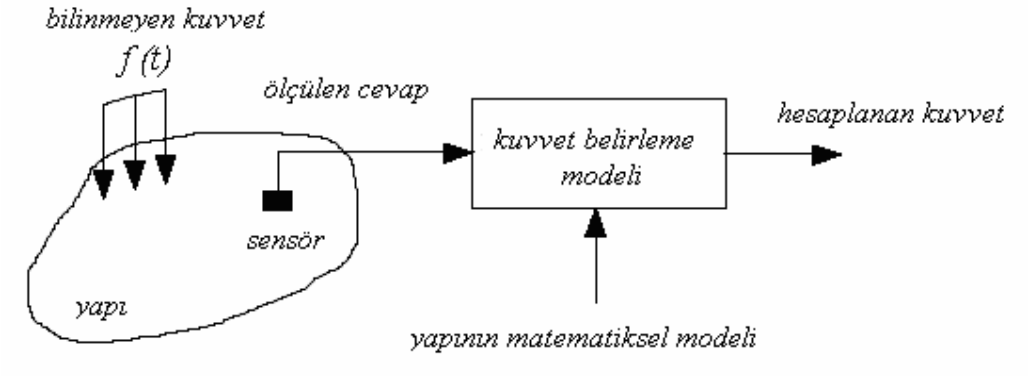
An alternative to the measurement of the dynamic forces is to use indirect methods for force estimation. This thesis addresses such an indirect force determination method which is based on utilising the Frequency Response Functions (FRF) of a system and the vibration levels under operating conditions. This procedure requires a generalised inverse of the FRF matrix and the spectrum of the measured response levels. The applicability of the force estimation method is examined using both numerical simulations and experimental studies. The method was tested using different structures with different types of excitation forces (i.e. sinusoidal, impact, random, chirp). It is shown that careful inspection of the numerical properties of the data is essential if the unique forces are to be determined.

The results of the numerical simulations and experimental studies show that satisfactory results can be obtained if high quality measurements are available. As the accuracy of the measurements decreases, quality of the results decreases too. Although there are some problems in the experimental studies with complex structures, quite good results were obtained for both amplitudes and locations of the force types.

1. GİRİŞ

Bir yapıya etkiyen tahrik kuvvetlerinin belirlenmesi işlemi, yapısal tasarımın önemli adımlarından biridir. Henüz tasarım aşamasındayken yapıya hangi büyüklükte ve tipte kuvvetlerin etkiyeceği belirlenirse daha gerçekçi tasarımlar yapılabilir, daha sonra çalışma esnasında yapıda meydana gelebilecek yorulma, dayanım ve güvenilirlik gibi problemler için önlemler en baştan alınabilir. Ancak tüm bunlarla birlikte, herhangi bir yapıya etkiyen dış kuvvetlerin doğrudan ölçülmesi çoğu zaman mümkün olmamaktadır. Bazen de bu kuvvetlerin doğrudan ölçülebilmesi teoride mümkün olmakla birlikte, pratikte bu ölçümlerin gerçekleştirilebilmesi çok zor veya olanaksız olabilmektedir. Örneğin bazı durumlarda oluşan kuvvetler transdüserlerle ölçülemeyecek kadar büyüktürler. Ya da kuvvetin ölçülmek istendiği nokta veya noktalar transdüserlerin yerleştirilmesi için uygun değildir. Tüm bu anlatılanlar, sistemi tahrik eden dış kuvvetlerin ölçülerek bulunamadığı durumlarda alternatif yollardan tespit edilmesi gerekliliğini doğurmaktadır.

"Kuvvet belirleme" genel anlamda bakılacak olursa bir "tersine işlem" problemidir. Herhangi bir sisteme etkiyen tahrik kuvvetleri bulunmak istenmektedir. Girdi olarak yapı üzerinden ölçülen titreşimler ve sitemi temsil eden bağıntılar kullanılmaktadır. Yapının çalışma anında üzerinden ölçülen titreşimler, sistemi tanımlayan özelliklerle birlikte kullanılacak ve sisteme etkiyen kuvvetler bulunmaya çalışılacaktır.



Şekil 1.1: Kuvvet Belirleme Sürecinin Şematik Gösterimi

Kuvvet belirleme problemi Şekil 1.1'de gösterildiği gibi ifade edilebilir. Bir yapıya etkiyen ancak özellikleri bilinmeyen kuvvetler belirlenmek istendiğinde, yapıyı temsil edecek bir matematiksel modele ve bilinmeyen kuvvetler nedeniyle sistemde oluşan titreşim verilerine ihtiyaç duyulur. Matematiksel model, sisteme uygulanan giriş kuvvetleri ile sistemden alınan titreşimler arasındaki bağıntıyı oluşturan fonksiyonlardan oluşur. Genel anlamda bulunmak istenen, kuvvet veya kuvvetlerin zamana ve/veya frekansa bağlı özellikleri ve/veya yapı üzerinde uygulanan yerleri olabilir [11].

Yapıya uygulanan dış kuvvetler üç ana başlık halinde toplanabilir. Bunlardan birincisi, noktasal kuvvetler veya yayılı yükler gibi konum değiştirebilen ama sabit karakterli kuvvetlerdir. İkinci sınıfa sokabileceğimiz dış kuvvetler ise zamana bağlı olarak değişen kuvvetlerdir. Darbe kuvvetleri, harmonik, periyodik ve rastgele kuvvetler bu tip kuvvetlere örnek olarak gösterilebilirler. Bir diğer kuvvet tipi ise hem yer değiştiren hem de zamana bağlı olarak değişen hareketli kuvvetlerdir. Hidrolik akış sonucu oluşan kuvvetler de hareketli kuvvetler sınıfına sokulabilirler. Literatürde değişik kuvvet tipleriyle ilgilenen çok sayıda çalışma mevcuttur.

1.1. Literatür Araştırması

Literatürde kuvvet belirleme ile ilgili bir çok çalışma bulunmaktadır. Aşağıda literatürde ön plana çıkan çalışmaların kısa bir özeti verilmiştir. Tüm kuvvet tipleri için geçerli olan tek bir modelin olmadığı ve değişik durumlar için değişik yaklaşımlarla çalışılması gerektiği unutulmamalıdır.

1983 yılında Hillary [1], ankastre bir kiriş üzerine etkiyen sinüzoidal kuvvetlerin ve bir türbinin kanatlarına gelen darbe kuvvetlerinin en küçük kareler yöntemiyle bulunması üzerinde çalışmıştır. Bu çalışmada ilk olarak kuvvet belirleme ile ilgili temel bağıntılara değinilmiş, basit deneysel çalışmalar yapmak için bir ankastre kiriş kullanılmıştır. Kiriş üzerine uygulanmış olan noktasal sinüzoidal kuvvetler, kiriş üzerinden alınan ölçümler kullanılarak bulunmaya çalışılmıştır. Çalışmanın bir sonraki aşamasında harmonik kuvvetlerin belirlenmesi ile ilgilenilmiş ve bu yapılırken karşılaşılan sorunlar ve bunların çözümlerine dair öneriler detaylı olarak verilmiştir. Daha sonra, ankastre kiriş modeli üzerindeki geçici (transient) kuvvetlerin belirlenmesine yönelik sayısal çalışmalar yapılmıştır. Çalışmanın son bölümünde ise bir türbinin kanatlarına gelen değişken karakterli aerodinamik kuvvetin tespit edilmesine ilişkin bir çalışma yapılmıştır. Burada, kanat üzerindeki değişken kuvvetin eşdeğer noktasal kuvvetler olarak kabul edilebileceği yönünde bir varsayım yapılmış ve kısmen başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Stevens, 1987 yılında 'Force Identification Problems' adlı çalışmasında lineer sistemlerde kuvvet belirleme sürecine genel bir bakış yapmıştır [2].

Dascotte ve Desanghere, 1991 yılında yaptıkları çalışmada [3], gerçekte ölçülen ve sayısal olarak hesaplanan titreşimler arasındaki farkın azaltılması ile dinamik kuvvetlerin güncellenmesine yönelik bir optimizasyon metodu üzerine çalışmışlardır. Buna göre, güncelleme işlemi, ölçülen yapısal cevaplarla başlar ve bu sonuçları sayısal modelden elde edilen sonuçlarla eşlemeye çalışır. Bu yöntem, yapıyı oldukça yüksek doğrulukla temsil eden bir sonlu elemanlar modeline ihtiyaç duymaktadır. Sayısal modelin cevabı ile gerçek durumda ölçülen cevap arasındaki farkın giriş kuvvetlerindeki farktan kaynaklandığından emin olunmalıdır ki bu da muhtemelen önce sayısal model üzerinde yapılacak bir model güncelleme işlemini gerektirecektir. Literatürde kuvvet güncelleme işlemi, En Küçük Kareler veya Bayesian Optimizasyon yöntemleriyle yapılmaktadır.

Carne, Bateman ve Mayes [4], 1992 yılında yayınlanan çalışmalarında Ağırlıklandırılmış İvmelerin Toplamı Yöntemi (SWAT: Sum of Weighted Accelerations Technique) adını verdikleri tekniği kullanarak darbe kuvvetlerini içeren problemlerde kuvvetleri yalnızca kütle merkezine etkiyen bir dış özdeş kuvvet olarak bulan, zaman alanını kullanan bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Bu tekniğin

dezavantajı, uygulanan tekil kuvvetleri ayrı ayrı bulamaması, sonuç olarak bir bileşke değer vermesidir. Genaro ve Rade ise 1998 senesindeki çalışmalarıyla SWAT tekniğini daha başarılı bir şekilde uygulamayı başarmışlardır. Bu çalışmadaki bir kısıt ise kullanılan sensör sayısının ilgilenilen frekans aralığındaki mod sayısına eşit veya mod sayısından fazla olması gerekliliğidir.

O'Callahan ve Piergentili [5], 1996 yılında sistemin Frekans Tepki Fonksiyonlarını ve operasyon esnasında alınan cevapları kullanarak yapıyı tahrik eden kuvveti tespit etmeye çalışmışlardır. Yapının her bir frekansa karşılık gelen FRF matrisinin tersi alınmış ve bulunan sonuç cevap matrisi ile çarpılarak bilinmeyen dinamik kuvvetler belirlenmeye çalışılmıştır. Buna göre, hesaba katılan noktalar, gerçekte var olan dinamik kuvvet noktalarını içeriyor ise doğru sonuç bulunabilmektedir. Bir başka deyişle, bu çalışmada önerilen yöntem, bulunmaya çalışılan kuvvetlerin yeri biliniyorsa etkin şekilde çalışabilmektedir.

Steltzner ve Kammer [6], 1999 senesinde 'Input Force Estimation Using an Inverse Structural Filter' ismi ile yayınlanan çalışmalarında zaman alanında çalışan bir kuvvet belirleme metodu oluşturmaya çalışmışlardır. Çalışmada geliştirilen yöntem, yapıya etkiyen dinamik kuvvet nedeniyle oluşan yapısal cevabı girdi olarak kabul etmekte ve buna ilişkin dinamik kuvvet verisini çıktı olarak sunmaktadır. Kullanılan teknik herhangi bir sayısal model, örneğin sonlu elemanlar modeli, kullanmamaktadır. Çünkü Ters Yapısal Filtre (TYF - Inverse Structrural Filter, ISF) gerçek yapı üzerinden kuvvet ve yapısal cevap ölçülerek hesaplanmaktadır. TYF, yapının frekans tepki fonksiyonunun zaman alanındaki karşılığına benzetilebilir. Sistem kullanılmaya başlandığında, çalışma esnasında ölçülen sensör verisi TYF'ye beslenerek zamana bağlı kuvvet çıktısı elde edilmektedir. Yöntemin çalışabilmesi için en az giriş kuvvetlerinin uygulandığı nokta sayısı kadar ölçüm noktasına ihtiyaç vardır. Çalışma sonunda yöntemi sınamak için iki adet deneme de yapılmıştır. Bu denemelerin ilkinde tek yönlü bir kütle-yay zinciri üzerindeki tek bir kuvvet, ikincisinde ise bir uzay mekiği üzerindeki altı tane kuvvet belirlenmeye çalışılmıştır.

Tao, Liu ve Lam, 2001 yılında yaptıkları çalışmada [7] bir motorun bağlantı noktalarından alınan hız bilgisiyle motorun kütle merkezindeki tahrik kuvvetini ve momentini bulmayı amaçlamışlardır. Motorun rijit ve yere dört adet izolatör ile bağlı olduğu kabul edilmiştir. Çalışmada öncelikle teorik çalışma yapılarak kuvvetin

bulunabilmesi için gerekli bağıntılar elde edilmiştir. Bağlantı noktalarından alınan tüm hız (genlik ve faz) bilgisiyle motorun kütle merkezindeki tahrik kuvveti ve momenti bulunabilmektedir. Bilinmeyen sayısından fazla olacak şekilde bir grup denklem tanımlanmış ve çözüm için klasik sayısal metodlar yerine optimizayon metodları kullanılmıştır. Genetik algoritma kullanılarak tahrik kuvvetleri bulunabilmiştir.

Guillaume ve diğerleri (2002) ölçülen cevapları ve yapının modal parametrelerini girdi olarak kullanan ve bilinmeyen kuvvetleri çıktı olarak veren bir yöntem üzerine çalışmışlardır [8]. Çalışmada kullanılan kuvvet belirleme süreci, frekansa bağlı frekans tepki fonksiyonlarının tersinin alınmasını gerektirmektedir. FTF matrisleri frekansa bağlı olarak modal parametrelerden türetilmektedirler ve eksik ranklı olduklarından tersleri alınarak kuvvet belirleme işlemleri yapıldığında bilinmeyen kuvvet tekil çözüm olarak değil, tüm yapıya yayılmış olarak bulunmaktadır. Sonuçta, elde edilen cevaplara neden olan bir kuvvet bileşkesi bulunmakla beraber, kuvvetin yerinin tam olarak belirlenmesi mümkün olmamıştır. Tekil bir çözüm elde edilebilmesi için çalışmada ağırlıklandırılmış "pseudo-inverse" algoritması adı verilen bir yöntem kullanılmıştır. Buna göre ters alma işleminden önce FTF matrisleri W ile gösterilen diagonal bir ağırlık matrisi ile çarpılmıştır. Böylece en başta hesaba katılan bazı noktaların sonuç üzerindeki etkisi baskın hale gelirken diğer bazı noktaların etkisi ise azaltılmış olmaktadır. Böylece tekil çözümü bulmak mümkün olabilmektedir. Çalışmanın sonunda çelik bir kiriş ile deneysel çalışmalar yapılarak yöntemin doğruluğu sınanmış, ayrıca değişik W faktörlerinin sonuç üzerindeki etkisi incelenmiştir.

2003 yılında Ma, Chang ve Lin [9] kirişlere gelen kuvvetleri tekrarlı bir metod yardımıyla hesaplamayı Kalman Filtresi ve düzelticiden oluşan, zaman alanında çalışan bir yaklaşım ile başarmışlardır. Kalman filtresi, durum uzayı (state-space) ile gösterilen bir sistemde, modelin önceki bilgileri ile birlikte giriş ve çıkış bilgilerini kullanarak sistemin durumunu yüksek doğrulukla belirlemeye yarayan oldukça kullanışlı bir matematiksel araçtır. Ma, Chang ve Lin'in çalışmasında ilk olarak sistem bir dizi 'durum-uzayı' denklemi ile modellenmektedir. Daha sonra sistemde bilinmeyen kuvvetlerden dolayı oluşan cevaplar ölçülmekte ve Kalman filtresi denklemleri kullanılmaktadır. Tekrarlı bir en küçük kareler algoritması ile de sonuca

gidilmektedir. Çalışmanın doğruluğu, ucuna bir kütle bağlanmış ankastre bir kiriş üzerinde yapılan sayısal denemeler ile sınanmıştır. Sayısal denemelerde kirişe sinüzoidal, üçgensel darbe, dikdörtgensel darbe, seri halde darbe ve rastgele olmak üzere beş değişik tip kuvvet uygulanmıştır. Simülasyon sonuçları, yöntemin bu durumlar için doğru bir şekilde çalıştığını göstermiştir.

Ma ve Ho [10], 2003 yılında tahrik kuvvetlerinin Kalman Filtresi ve düzeltici yardımıyla bulunması işlemini lineer olmayan yapılara uygulamaya çalışmışlardır. Kuvvet belirleme alanında yapılan çalışmaların çoğu lineer sistemler ile sınırlı kalmış olsa da, mekanik sistemlerde lineer olmayan karakterin varlığı ve bu karakterin genliklerin artışı ile doğru orantılı olduğu bilinmektedir. Ma ve Ho'nun çalışmasında da yapıların doğrusal olmayan özellikleri göz önünde bulundurulmuştur. Çalışmada ilk olarak kütle-yay-sönüm sistemlerine ait temel eşitliklere değinilmiş ve daha sonra Kalman Filtresi ve tekrarlı en küçük kareler algoritmasından oluşan kuvvet belirleme metodu oluşturulmuştur. Bu yapılırken, yay ve sönüm kuvvetleri yer değiştirmenin ve hızın analitik fonksiyonları olarak düşünülmüş ve kuvvet serileri şeklinde yazılmıştır. Yüksek mertebeli terimler ihmal edilerek problem belli bir seviyeden sonra yeniden lineerlik kabulü ile çözülmeye çalışılmıştır. Neticede nonlineer özellikler taşıyan direngenlik ve sönüm matrisleri oluşturulmuş, onlarla işlemler yapılmıştır. Oluşturulan kuvvet belirleme metodu daha sonra sayısal simülasyonlarla sınanmıştır. Lineer olmayan kütle-yay-sönüm sistemleri ile yapılan denemeler yöntemin doğruluğunu göstermektedir.

Wang, çalışmasında önce kuvvet belirleme yöntemlerine genel bir bakış yapmıştır [11]. Öncelikle kuvvet belirleme sürecinin teorik altyapısı gözden geçirilmiştir. Kuvvet belirleme metodları doğrudan metod ve optimizasyon metodu olarak ikiye ayrılmış, daha sonra bunlar da değişik parametreler göz önünde bulundurularak alt gruplara bölünmüştür. Çalışmanın ikinci bölümünde rastgele bir yapıya uygulanan darbe kuvvetlerinin ve harmonik kuvvetlerin bulunmasında kullanılabilecek bir metodun teorik formülasyonu çıkarılmıştır. Yeni metodun optimizasyon metodu sınıfına sokulabileceği belirtilmiş ve sistemi temsil etmesi için modal model kullanılmıştır. Yöntemde, sistemin bilinmeyen bir tahrik kuvvetine karşılık gelen ivme cevabı teorik olarak modal parametreler ve sisteme uygulanan kuvvetin bir fonksiyonu olacak şekilde elde edilmiştir. Daha sonra teorik ivme cevabı ile deneysel

ivme cevabı arasındaki farkın karesi olacak şekilde bir amaç fonksiyonu belirlenerek, amaç fonksiyonunun minimize edilmeye çalışılabileceği belirtilmiştir. Aynı işlemin araya bir Fourier Dönüşümü eklenerek frekans alanında da yapılabileceği hatırlatılmıştır. Formülasyon, sadece darbe kuvveti ve harmonik kuvvet için çıkarılmış olmakla birlikte, metodun diğer kuvvet tiplerine de uyarlanabileceği belirtilmiştir. Çalışmanın sonunda elde edilen yöntemin doğruluğunu sınamak için herhangi bir deneysel çalışma yapılmamıştır.

1.2. Amaç ve İçerik

Yapılara etkiyen aktif dinamik kuvvetlerin tespit edilmesi, sistemlerin tasarımı, çalıştırılması ve optimizasyonu açısından büyük önem taşımaktadır. Bir makinaya gerçek çalışma koşullarında etkiyen dinamik kuvvetlerin biliniyor olması, bu sistemde meydana gelebilecek bazı problemlere karşı önceden önlem alabilmeyi mümkün kılacaktır. Bununla birlikte, bazen dinamik kuvvetlerin doğrudan ölçülmesi mümkün olmamaktadır. Bazen de kuvvetler doğrudan ölçülebilir olmakla beraber, bu işlem çok pratik olmadığından yapılamamaktadır. Bu sebeplerden dolayı yapıya etkiyen dinamik kuvvetlerin dolaylı yollardan belirlenmesine ihtiyaç vardır.

Bu tezin kapsamında, bir yapıya etkiyen tahrik kuvvetlerinin belirlenmesine yönelik olarak bir literatür araştırması yapılmış, daha önce bu alanda yapılan araştırmalar incelenerek bu metodların pratikte uygulanabilirliği incelenmiştir. İncelenen metodlar arasından FTF Tabanlı bir kuvvet belirleme yöntemi seçilmiş ve bu alanda çalışmalar yapılmıştır. Bu metoda göre ilk önce yapı üzerinden alınan frekans tepki fonksiyonları ölçülmekte, daha sonra da bu bilgi yapının üzerinden alınan titreşim ölçümleri ile beraber kullanılarak sisteme uygulanan tahrik kuvvetleri belirlenmeye çalışılmaktadır. Gerekli işlemlerin yapılması için MATLAB yazılımından yararlanılmış, sayısal uygulamalarda ise sonlu elemanlar programı olarak I-DEAS ve dinamik simülasyon programı olarak da ADAMS yazılımları kullanılmıştır.

Tezin ilk bölümünde literatür araştırması ve amaçlara yer verilmiş, literatür araştırmasının sonuçları kısaca değerlendirilmiştir.

İkinci bölümde, kuvvet belirleme yöntemleri sınıflandırılmış ve bu yöntemlerin teorik altyapıları kısaca tanıtılmıştır.

Üçüncü bölümde, çalışmada uygulanmak üzere seçilen FRF Tabanlı Kuvvet Belirleme Yöntemi hakkında geniş bilgi verilmiş ve doğru sonuçlara ulaşmak için yapılması gerekenler irdelenmiştir.

Dördüncü bölümde, kuvvet belirleme yönteminin sayısal uygulamalarına yer verilmiştir. İlk olarak sayısal model hakkında bilgi verilmiş ve daha sonra sayısal model kullanılarak bilinmediği kabul edilen değişik kuvvet tipleri belirlenmeye çalışılmıştır. Sonucun kalitesini yükseltmeye yönelik yaklaşımlar da bu bölümde açıklanmıştır.

Beşinci bölümde, kuvvet belirleme yönteminin deneysel uygulamaları anlatılmıştır. Değişik yapılara tahrik kuvvetleri uygulanmış ve bu kuvvetler nedeniyle yapıda oluşan titreşimler ve yapı üzerinden frekans tepki fonksiyonları ölçülerek en başta uygulanan ve bilinmiyor kabul edilen kuvvetler belirlenmeye çalışılmıştır.

Altıncı ve son bölümde, tezin genel değerlendirmesi yapılmış ve gelecekte yapılabilecek çalışmalar belirtilmiştir.

2. KUVVET BELİRLEME METODLARI

2.1 Giriş

Literatürde, bilinmeyen kuvvetlerin belirlenmesi ile ilgili çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bulunmaya çalışılan veya kullanılan verilerin çeşitliliği nedeniyle değişik bakış açılarına göre değişik sınıflandırmalar yapmak mümkündür. Bu yüzden literatürde mevcut olan bütün çalışmaları tek bir sınıflandırmaya tabi tutmak oldukça zordur. Literatürde tanımları net olarak belirlenmemiş ayrıntılar da mevcuttur. Örneğin belirlenmeye çalışılan dış kuvvet tipleri açısından sınıflandırma yapmak mümkündür. Belirlenmeye çalışılan kuvvet tipleri, konumları belli ama genlikleri sürekli olarak değişen, genlikleri sabit ama konumları sürekli olarak değişen veya hem genlikleri hem de konumları sürekli olarak değişen kuvvetler olabilir. Kuvvetin yerinin en başta biliniyor veya bilinmiyor oluşu da kuvvet belirleme metodları için bir başka sınıflandırma yaklaşımı olabilir. Bilinmeyen dış kuvvetlerin bulunmaya çalışılan özelliği büyüklük, yer, yön, zaman geçmişi veya frekansa bağımlı olarak genlik ve faz bilgisi olabilir.

Kuvvetler belirlenmeye çalışılırken kullanılan model tipleri de bir başka sınıflandırma yöntemi oluşturabilir. Sayısal model, deneysel model veya her ikisinin birden kullanımı benimsenebilir. Sayısal model, bir yapının bilgisayar ortamında hazırlanmış ve yapının özelliklerini taşıdığı kabul edilen modelidir. Günümüzde sayısal modelleme için kullanılan en yaygın metodlardan biri Sonlu Elemanlar Modelidir (SEM). Sayısal modelde yapının kütle, sönüm ve katılık matrislerinden oluştuğu kabul edilir. Sayısal model yapının sürekli değil ayrık olarak modellenmiş halidir. Burada dikkat edilmesi gereken önemli noktalardan biri, eğer sayısal model kullanılarak gerçek bir yapı üzerindeki kuvvetler belirlenecekse bu sayısal modelin doğru tanımlanmış ve gerçek yapıyı kabul edilebilir seviyede temsil ediyor olması gerekliliğidir. Bu durumda çalışmanın ilk aşaması gerçek yapı ile sayısal model arasındaki uyumun saptanması için uygulanacak bir model güncelleme çalışması

olacaktır. Kuvvet belirleme yöntemleri uygulanmaya çalışılırken seçilebilecek diğer bir model tipi de deneysel model olabilir. Bu tip çalışmalarda sistem sayısal olarak modellenmez ve gerçek yapı üzerinden alınan gerçek ölçümler kullanılabilir. Çok karmaşık yapıların doğru sayısal modellerini oluşturmak oldukça güç olabileceğinden, bu tip durumlarda deneysel verilerin kullanılması tercih edilebilir. Deneysel çalışmanın başlıca dezavantajları ise deneysel ölçüm alma işleminin sayısal ortamdaki gibi ideal durumda gerçekleştirilememesi nedeniyle oluşabilecek hatalar ve ölçüm zorluklarıdır.

Sistemin cevaplarının temsil edilmesi açısından da kuvvet belirleme yöntemleri, zamana bağlı veya frekansa bağlı kuvvet bulma yöntemleri olarak sınıflandırılabilir. Zaman alanında çalışılıyorsa, tahrik kuvveti ile titreşimler arasında bir konvolusyon integral denklemi oluşturulabilir. Yapısal titreşimle ilgili olarak Darbe Cevap Fonksiyonu (DCF - Impulse Response Function, IRF) da kullanılabilir. Frekans alanında yapılacak çalışmalarda ise, tahrik kuvveti ile cevap arasındaki ilişkiyi kurabilmek için yapısal Frekans Tepki Fonksiyonları deneysel olarak ölçülmeli veya teorik olarak hesaplanmalıdır.

Sistemin cevabının ölçülmesi de kuvvet belirleme prosedürü için gerekli bir işlemdir. Titreşimlerin ölçülmesi için çok değişik tipte sensörler kullanılabilir. Birim gerilme sensörleri (strain-gauge), ivme ölçerler, lazer ölçüm cihazları ve piezoelektrik sensörler, kullanılabilecek ölçüm araçlarından bazılarıdır.

Kuvvet belirleme metodlarının sınıflandırılmasında kullanılan en genel yaklaşım metodun işleyişi ile ilgili olandır ve buna göre kuvvet belirleme metodları doğrudan metodlar ve tekrarlı metodlar / optimizasyon metodları olarak ikiye ayrılabilir. Doğrudan metodlar yapı üzerinden alınan veya yapı üzerinden değil de doğru olduğu düşünülen bir sayısal model üzerinden alınan Frekans Tepki Fonksiyonlarını (FTF) kullanır ve bunları kullanarak doğrudan sonuca gitmeye çalışır. Buna göre çalışmanın ilk adımı yapıyı temsilen FTF'lerin bulunmasıdır. Eğer sayısal model kullanılıyorsa FTF'ler numerik olarak hesaplanır, deneysel model kullanılıyorsa FTF'ler deneysel olarak ölçülür. Daha sonra ise yapı üzerine etkiyen bir dinamik tahrik kuvveti nedeniyle yapı üzerinden titreşim seviyeleri ölçülerek ve bu iki veri kullanılarak sonuç bulunmaya çalışılır. Doğrudan metodları optimizasyon metodlarından ayıran en önemli özellik işlemin tek adımda gerçekleştiriliyor

olmasından ileri gelir ve herhangi bir tekrarlı çözüm arama çalışması yapılmaz. Optimizasyon metodunda ise, sonuç bulunmaya çalışılırken bir optimizasyon probleminin çözülmesi gerekecektir. Bu metodda bir adet deneysel model ve bir adet de doğruluğu kanıtlanmış sayısal model mevcuttur. Gerçek yapı üzerinde bilinmediği farzedilen kuvvetler vardır ve yapı üzerinden bu kuvvetler nedeniyle oluşan titreşim seviyeleri ölçülür. Benzer şekilde sayısal model üzerine de bir kuvvet uygulanıp onun üzerinden de titreşim ölçümleri alınmaktadır. Optimizasyon Metodunun temel mantığı, sayısal modelde elde edilen titreşim seviyeleri ile deneysel durumda elde edilen titreşim seviyeleri arasındaki farkı minimize ederek bilinmeyen dinamik kuvvetleri tekrarlı bir çözüm yöntemi yardımı ile tahmin etmeye çalışmaktır [11].

Şimdiye dek bahsedilenler ışığında en temel halde Kuvet Belirleme Metodları Tablo 2.1'de gösterildiği gibi ikiye ayrılabilir. Bununla beraber, yukarıda da belirtildiği gibi çok değişik snıflandırmalar da yapmanın mümkün olduğu unutulmamalıdır.

Tablo 2.1: Kuvvet Belirleme Metodlarının Sınıflandırılması



Genelde, titreşim verisi kullanarak kuvvet belirleme metodları Bölüm 3'te detaylı olarak açıklandığı üzere şu temel cevap belirleme formülüne dayanır:

$$\{X(\omega)\} = [H(\omega)]\{F(\omega)\} \tag{2.1}$$

Burada {X} yapıda tahrik kuvveti nedeniyle oluşan cevap vektörünü, [H] frekans tepki fonksiyonu matrisini ve {F} de yapıya etkiyen dinamik kuvvet vektörünü ifade etmektedir.

Herhangi bir yapının bir kuvvete karşı verdiği tepki frekansa bağlı olarak değişmektedir. Değişik frekanslardaki zorlamalara karşı verilen bu tepkiler, yapının

karakteristik özellikleridirler. Frekans Tepki Fonksiyonları, yapıların kendilerine has özelliklerinin belirlenmesi için ölçülürler. Frekans Tepki Fonksiyonları, bir yapıya herhangi bir frekansta uygulanan bir tahrik kuvveti ile bu tahrik kuvvetine karşılık oluşan tepkinin oranlanması ile elde edilir. Dolayısıyla eğer yapının frekans tepki fonksiyonları ve yapıya uygulanan kuvvetler biliniyorsa ikisinin çarpılmasıyla yapının uygulanan tahrik kuvveti nedeniyle oluşturacağı titreşimlerin özellikleri belirlenebilir. (2.1) denklemi bu durumu basit bir şekilde ifade etmektedir.

Kuvvet belirleme bağıntısı ise (2.1) denkleminin tersinin alınması ile elde edilir. (2.1) denkleminin tersi alındığında bu kez hesaplanmak istenen değişken yapı üzerine gelen kuvvetler, kullanılan değişkenler ise yapı üzerinden alınan titreşim ölçümleri ve FTF'lerin tersleridir. Dolayısıyla, kullanılması gereken denklem de:

$$\{F(\omega)\} = [H(\omega)]^{-1}\{X(\omega)\} \tag{2.2}$$

haline dönüşür.

Kuvvet belirleme işlemi elde edilen bu son bağıntı ile yapılabilir. FTF matrisinin ve bu matrisin tersinin oluşturulması sonuçların kalitesini etkileyen en önemli faktördür. FTF matrisinin tersinin oluşturulması, FTF matrisinin yapısına bağlı olarak zorluklar içerebilir. İlerleyen bölümlerde FTF matrisinin oluşturulması ve tersinin alınması ile ilgili detaylı bilgiler verilecektir.

En temel halde Doğrudan Metodlar ve Optimizasyon Metodları olarak ikiye ayrılan Kuvvet Belirleme Metodlarının açıklamaları aşağıda verilmektedir.

2.2 Doğrudan Metodlar

Doğrudan metod, yapının ölçülmüş veya doğruluğu saptanmış olan frekans tepki fonksiyonlarını kullanarak tek adımda sonuca gitmeyi amaçlayan kuvvet belirleme metodudur. Bu metoda ait işlemler aşağıda sıralanmış ve Şekil 2.1'de verilmiştir.

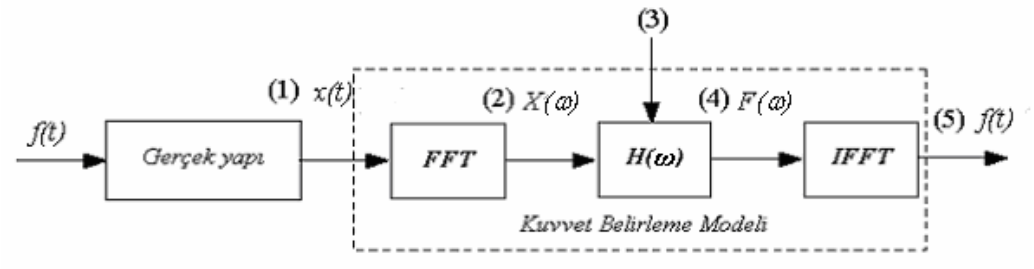
1) Bilinmeyen kuvvetler nedeniyle oluşan zamana bağlı yapısal titreşimlerin ölçülmesi.

2) Zamana bağlı veriyi frekansa bağlı veriye dönüştürmek için Fourier Dönüşümünün yapılması.

3) Yapısal Frekans Tepki Fonksiyonlarının ölçülmesi veya hesaplanması.

4) $\{F(\omega)\}=[H(\omega)]^{-1}\{X(\omega)\}$ formülü ile verilen ilişkinin kullanılması.

5) Bulunan frekansa bağlı kuvvet verisinin ters Fourier dönüşümü ile zamana bağlı veriye dönüştürülmesi.



Şekil 2.1: Doğrudan Kuvet Belirleme Metodlarının Şematik Gösterimi

İlk adımda bahsedilen titreşimlerin belirlenmesi işlemi için yapısal cevabı doğru bir şekilde yansıtacak sensör seçiminin önemi büyüktür. Genellikle ivmeölçerler veya birim gerilme sensörleri kullanılmakla birlikte, yüzeye temas etmeyen lazer ölçüm cihazları da ölçüm araçları olarak kullanılabilmektedir. İkinci adımdaki Fourier Dönüşümü analizörler yardımıyla bulunabileceği gibi sayısal olarak da hesaplanabilir. Günümüzde Fourier Dönüşümü için kullanılan en yaygın sayısal metod Hızlı Fourier Dönüşümüdür (HFD, Fast Fourier Dönüşümü - FFT) Üçüncü adımda, yapısal frekans tepki fonksiyonları elde edilmektedir. Seçilen model tipine göre FTF'ler deneysel olarak ölçülmekte veya sayısal olarak hesaplanmaktadır. FTF'ler matris formunda ifade edilirler. Yapının tam FTF Matrisinin elde edilmesi, yapının içerdiği tüm koordinatlardan tahrik edilerek yine tüm bu noktalara ait tepkilerin ölçülmesi demektir. Bu durumda FTF matrisleri kare olmakta ve tersleri alınabilmektedir. Sayısal analizlerde yapının tam FTF Matrislerini hesaplamak kolaydır. Ancak pratikte, FTF Matrislerinin ancak bir ya da birkaç sütununun ölçülmesi zaman ve maliyet nedenleri ile tercih edilmektedir. Bu durumda ise FTF matrisleri dikdörtgen olmakta ve klasik yoldan tersleri alınamamaktadır. Bu gibi durumlar için matrisin genelleştirilmiş tersini alma, Tekil Değerlerine Ayrıştırma

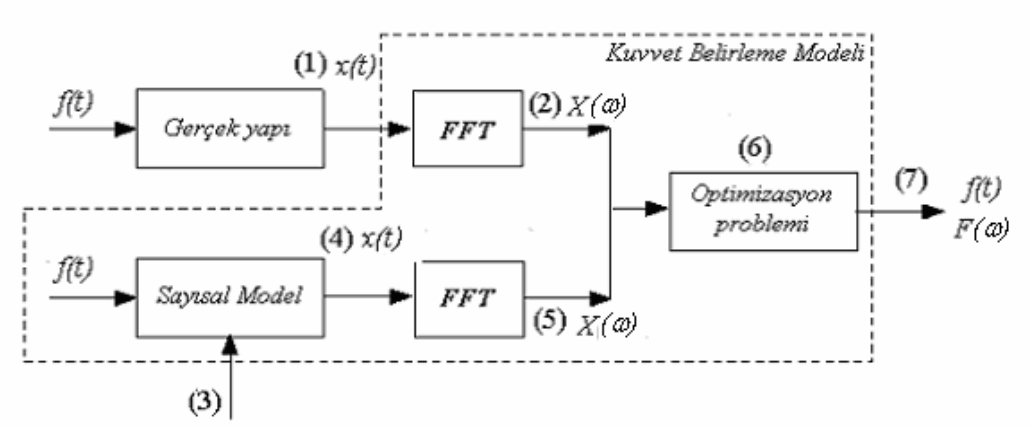
gibi sayısal metodlar kullanılmalıdır. Eğer matrisi oluşturan sütunlar lineer bağımlı ya da bir başka deyişle matris eksik ranklı ise matrisler kullanılarak bulunabilecek bilinmeyen sayısı azalır. FTF Matrislerinin tersi bulunduktan sonra kuvvet berlirleme metodu uygulanarak yapıya etkiyen kuvvetler tespit edilebilmektedir. Son adımda ise, (eğer istenirse) elde edilmiş olan frekansa bağlı kuvvet verisi Ters Fourier Dönüşümü yardımıyla zamana bağlı fonksiyonlar haline getirilebilir [11].

2.3. Optimizasyon Metodları

Optimizasyon metodlarında, sonuç bulunmaya çalışılırken yapının ölçülen frekans tepki fonksiyonları yerine doğru olduğu kabul edilen bir sayısal modelin üzerinden alınan yapısal tepki fonksiyonları ve cevaplar kullanılır. Ayrıca, sayısal model ile paralel olarak ilerleyen bir de deneysel model mevcuttur. Optimizasyon metodlarındaki temel amaç gerçek yapı üzerinden ölçülen titreşimler ile sayısal model üstünden alınan titreşimler arasındaki farkı en aza indirmek ve bu şekilde bilinmeyen dinamik kuvvetleri tahmin etmektir. En aza indirgeme işlemi, tanımlanan bir optimizasyon probleminin çözülmesi ile yapılmaktadır. Optimizasyon Metodlarında sonucu bulmak için bir hedef fonksiyon tanımlanmakta ve bu hedef fonksiyona ulaşabilmek için tekrarlı bir çözüm yöntemi belirlenmektedir. Optimizasyon metodlarının temel adımları aşağıdaki gibi sıralanmış ve Şekil 2.2'de gösterilmiştir [11].

1) Bilinmeyen kuvvetler nedeniyle oluşan olan yapısal titreşimlerin ölçülmesi.
2) Zamana bağlı veriye Fourier dönüşümünün uygulanması.
3) Yapının matematiksel modelinin oluşturulması.
4) Matematiksel model üzerinden yapısal cevapların tahmin edilmesi.
5) Matematiksel modelden elde edilen cevaplara Fourier Dönüşümünün uygulanması.
6) Optimizasyon probleminin oluşturulması.
7) Optimizasyon probleminin tahrik kuvvetleri için çözümü.

Optimizasyon metoduna ait adımların şematik gösterimi aşağıdaki şekilde yapılmışır.



Şekil 2.2: Optimizasyon Metodunun Adımlarının Şematik Gösterimi

2.4. Bu Tezde Kullanılan Kuvvet Belirleme Metodu

Yukarıda açıklanan titreşim verilerine dayalı kuvvet belirleme metodları arasından bu tezde kullanılmak üzere FTF Tabanlı Doğrudan Kuvvet Belirleme Metodu seçilmiştir. Uygulamalar, sayısal ve deneysel olarak gerçekleştirilmiş ve sonuçlar iki bölüm halinde sunulmuştur.

Sayısal uygulamalar çerçevesinde, üzerine etkiyen tahrik kuvvetinin belirleneceği yapı ilk önce bir sonlu elemanlar programında modellenmiştir. Bu yapı üzerinde kuvvet belirleme çalışmasında kullanılmak üzere belirli sayıda düğüm noktası alınmış ve bu düğüm noktalarının her birinden tahrik uygulanarak ve her birinden cevap ölçülerek FTF matrisi oluşturulmuştur. Daha sonra, yapı üzerine bir dinamik kuvvet belirli süre uygulanmış, bu dinamik kuvvetler sonucunda her bir düğüm noktasında oluşan titreşim seviyeleri elde edilmiş ve bu sonuçlara sayısal ortamda Fourier Dönüşümü uygulanarak frekans alanına geçilmiştir. Son olarak da FTF matrisinin tersi ile birlikte yapı üzerinden ölçülen titreşimler kullanılarak kuvvetler hesaplanmıştır. Yöntemin doğruluğunu sınamak amacıyla, hesaplanan kuvvetler yapıya uygulanan gerçek kuvvetlerle karşılaştırılmıştır.

Deneysel uygulamalarda ise FTF matrisi direkt olarak gerçek yapı üzerinden ölçülmüş ve bu veriler kullanılarak sonuca gitmeye çalışılmıştır. Pratikte gerçek bir yapının tüm FTF matrisini elde etmek çok zahmetli olacağından FTF matrisinin

sadece birkaç sütunu ölçülmüştür ve bu durumda dinamik kuvvetlerin belirlenmesi hedeflenmiştir. Yapının tahrik edilmesi için modal sarsıcı veya çekiç kulanılırken, titreşim ölçümleri ise ivmeölçerler ile yapılmıştır.

2.5. Sonuç ve Değerlendirme

Tezde kullanmak üzere Doğrudan Kuvvet Belirleme Yönteminin seçilmesinin en önemli nedeni matematiksel altyapısının nispeten daha basit ve uygulanmasının daha kolay olmasıdır. Optimizasyon Metodlarındaki optimizasyon probleminin çözüm işlemi yöntemi zorlaştırmaktadır. Doğrudan metodda ise buna benzer bir durum yaşanmamakta ve tek adımda sonuca ulaşılabilmektedir.

Tezin sonraki bölümlerinde ilk olarak Frekans Tepki Fonksiyonu Tabanlı Kuvvet Belirleme Yönteminin teorik altyapısı anlatılmış, daha sonra ise sayısal ve deneysel uygulamalara geçilerek yöntemin doğruluğu sınanmıştır.

3. FTF TABANLI KUVVET BELİRLEME YÖNTEMİ

3.1. Giriş

Bu tezde detaylı olarak araştırılan kuvvet belirleme metodu "Frekans Tepki Fonksiyonu Tabanlı Kuvvet Belirleme Yöntemi" isimli yaklaşımdır. İsminden de anlaşılacağı gibi bu yöntem sisteme ait frekans tepki fonksiyonlarını kullanarak sonuca ulaşmayı hedefleyen doğrudan bir yöntemdir. Sistemin dinamik özelliklerini temsil eden FTF'ler ölçülmekte ve bu ölçümler yapı üzerinden ölçülen titreşim verileri ile beraber kullanılarak yapıya uygulanan kuvvetlerin belirlenmesi amaçlanmaktadır.

N serbestlik dereceli bir yapının hareket denklemi en genel halde Denklem 3.1'de verilmiştir. Burada [M], [C] ve [K] *NxN* boyutlu kütle, sönüm ve katılık matrisleridirler [15].

$$[M]\{\ddot{x}\}+[C]\{\dot{x}\}+[K]\{x\}=\{f(t)\} \tag{3.1}$$

Harmonik kuvvet olması durumunda, yapının aynı frekanslı ancak farklı genlik ve fazlarda uygulanan bir kuvvet seti tarafından tahrik edildiği düşünülürse:

$$\{f(t)\}=\{F\}e^{i\omega t} \tag{3.2}$$

ifadesi yazılabilir. Buna karşılık ise aşağıdaki gibi bir çözümün varlığı kabul edilebilir.

$$\{x(t)\}=\{X\}e^{i\omega t} \tag{3.3}$$

Burada {F} ve {X} kompleks vektörlerdir ve boyutları da N*x1*'dir. Gerekli değişkenler yerine konduğunda (3.1) denklemi şu hale gelir:

$$\left([K]-\omega^2[M]+i\omega[C]\right)\{X\}e^{i\omega t}=\{F\}e^{i\omega t} \tag{3.4}$$

Bu denklem bilinmeyen cevapların hesaplanması için yeniden düzenlenirse

$$\{X\}=\left([K]-\omega^2[M]+i\omega[C]\right)^{-1}\{F\} \tag{3.5}$$

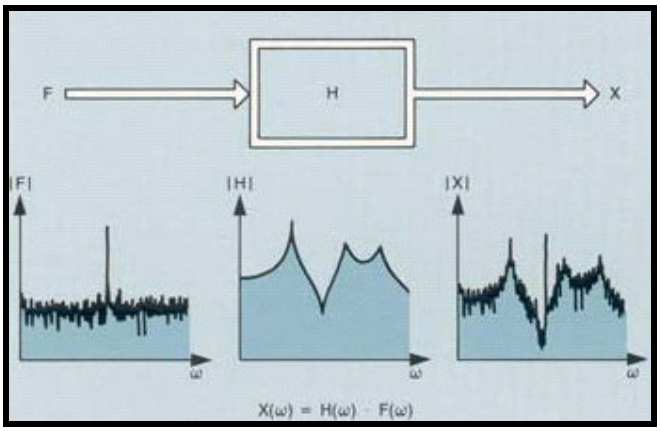
ifadesine elde edilir. Bu da

$$\{X\}=[Z]^{-1}\{F\} \tag{3.6}$$

şeklinde yazılabilir. *Z*, yapının dinamik katılık matrisidir ve hesaplanabilmesi için katılık, sönüm ve kütle matrislerinin bilinmesi gereklidir. Oysa dinamik katılık matrisinin tersi sistemin Frekans Tepki Fonksiyonuna eşittir ve bunun deneysel olarak ölçülmesi mümkündür. Öyleyse dinamik katılık matrisinin tersi yerine FTF Matrisi yerleştirilirse bağıntı aşağıda verilen hale dönüşür.

$$\{X(\omega)\}=[H(\omega)]\{F(\omega)\} \tag{3.7}$$

Bu denklem uyarınca bir yapı üzerinden alınan FTF ölçümleri ve bu yapıyı tahrik eden kuvvetlerin çarpılması sonucu, bu kuvvetlerin yapı üzerinde oluşturucağı titreşimler belirlenebilmektedir. (3.7) denkleminin şematik hali Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1: Cevap Belirleme Yönteminin Şematik Gösterimi [16]

Yukarıdaki denklemlerde {F} kuvvet vektörünü, {X} yapısal titreşim vektörünü ve [H] de FTF matrisini temsil etmektedir. Frekans Tepki Fonksiyonunun değerleri

frekansa bağlı olarak değiştiğinden matris ve vektörler de ω'ya bağlı olarak verilmiştir. Denklem (3.8)'de ise matrisler ve vektörler daha açık biçimde gösterilmiştir.

$$\begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ \vdots \\ X_N \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} & \cdots & H_{1N} \\ H_{21} & H_{22} & \vdots & \cdots & \vdots \\ H_{31} & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ H_{N1} & H_{N2} & H_{N3} & \cdots & H_{NN} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ \vdots \\ F_N \end{Bmatrix} \tag{3.8}$$

(3.7) denklemindeki [H(ω)] ifadesinin tersinin alınıp eşitliğin diğer tarafına aktarılmasıyla denklem (3.9)'da verilen hale gelmektedir. Bu durumda artık yapıya etkiyen tahrik kuvvetleri bulunabilmektedir. Bunun için yapı üzerinden alınan FTF Matrisinin tersi kullanılmalı ve bu ifade de yapı üzerinden alınan titreşim ölçümleri ile çarpılmalıdır.

$$\{F(\omega)\} = [H(\omega)]^{-1}\{X(\omega)\} \tag{3.9}$$

Pratikte, FTF Tabanlı kuvvet belirleme yönteminin en büyük zorluğu [H] matrisini oluşturmak ve bu matrisin tersini güvenilir bir şekilde belirleyebilmektir. Yapının dinamik özelliklerini temsil eden veri FTF matrisini oluşturduğundan, yapı üzerinden ölçülen frekans tepki fonksiyonlarının yüksek kalitede ölçülmüş veya hesaplanmış olması gerekir. Öte yandan, (3.7) denkleminden (3.9) denklemine geçilirken ters alma işleminde karşılaşılabilecek bir takım problemler de sonucun kalitesini doğrudan etkileyecektir. Bu yüzden ters alma işlemi için özellikle Tekil Değerlere Ayrıştırma metodunun kullanılması gerekebilmektedir. Ayrıca, belirlenmeye çalışılan kuvvet sayısı ve bunları bulabilmek için kullanılacak titreşim ölçümü sayısı da sonuç üzerinde etkili olan değişkenlerdir. Bilinmeyen kuvvetlerin tespit edilebilmesi için öncelikle sağlanılması gereken şart, en az belirlenmeye çalışılan kuvvet sayısı kadar cevabın ölçülmüş olmasıdır. Örneğin n tane giriş kuvvetinin m adet ölçüm kullanılarak belirlenmesi durumunda m>n şartının sağlanması doğru sonuçlara ulaşmayı kolaylaştıracaktır. Belirlenmeye çalışılan kuvvet sayısından fazla ölçüm almak, daha az bilinmeyeni daha fazla denklem kullanarak çözmeye çalışmak

anlamına geleceğinden, önemli avantaj sağlayacaktır. Bu durumda oluşturulan bağıntı, aşağıdaki hali alır:

$$\{F(\omega)\}_{nx1} = [H(\omega)]^{-1}{}_{nxm}\{X(\omega)\}_{mx1}, \text{ (m>n)} \tag{3.10}$$

Aşağıdaki bölümlerde, yöntemin işleyişi ile ilgili dikkat edilmesi gereken noktalara daha detaylı olarak değinilmiştir.

3.2. Frekans Tepki Fonsiyonlarının Ölçümü

Bir yapının frekansa bağlı herhangi bir kuvvete karşı verdiği tepkiler yapının frekansa bağlı özelliklerine göre değişmektedir ve bu özellikler yapıya özgüdür. Bu yüzden yapının zorlanmış titreşim altındaki davranışının belirlenmesine ihtiyaç duyulur. Bu özelliklerin belirlenebilmesi için Frekans Tepki Fonksiyonu (FTF) adı verilen fonksiyonlar kullanılmaktadır. FTF, ölçülen tepkiler ve uygulanan kuvvetler arasındaki transfer fonksiyonu hesaplanarak, yani çıkış ve giriş arasındaki oran alınarak elde edilmektedir. Bir yapının titreşim davranışının belirlenebilmesi için oldukça pratik ve yaygın bir metod olan FTF ölçümü, kuvvet belirleme için de büyük öneme sahiptir. Bu yüzden FTF ölçümü yapılırken dikkat edilmesi gereken hususları gözden geçirmekte fayda vardır.

Hassas olarak Frekans Tepki Fonksiyonlarının ölçülebilmesi için yapının uygun sınır koşullarının tanımlanması ve uygun nokta veya noktalardan tahrik edilmesi gerekmektedir. Pratikte, FTF ölçümlerinde en çok tercih edilen sınır koşulu serbest sınır koşuludur. Bu durumda, üzerinde ölçüm yapılacak yapıya ait hiçbir sınır koşulunun olmadığı durum yaratılmaya çalışılır ve gerçekte bu hale mümkün olduğunca yaklaşabilmek için yapı oldukça esnek yaylarla bir yere asılır veya bağlanır.

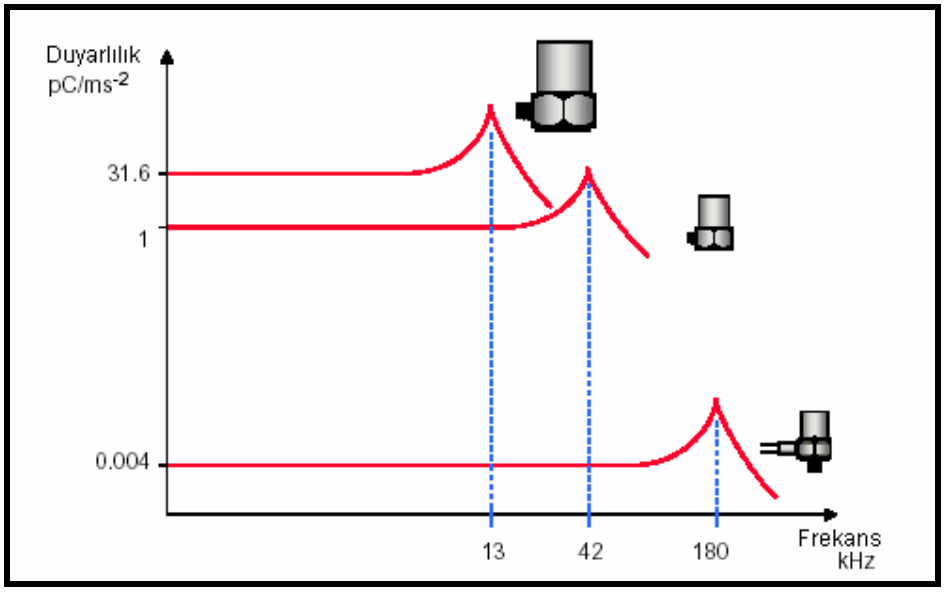
Sıkça tercih edilen bir başka sınır koşulu ise ankastre sınır koşuludur. Bu durumda, yapı belirli kısımlarından bir yere sabitlenmektedir. Deneysel ve sayısal çalışmaların ayrı kollardan yürütüldüğü durumlarda, ankastre sınır şartını seçmek bazı problemlere neden olabilir. Çünkü pratikte ankastre sınır şartını sağlamak yapının tamamıyla rijit (esnek olmayan) bağlantılar kullanılarak bağlanmasını

gerektirdiğinden çoğu zaman mümkün olmamakla birlikte, mümkün olsa bile zahmetli bir çalışma gerektirmektedir. Bu nedenle FTF ölçümlerinin yapılacağı sınır koşulları amaca bağlı olarak dikkatlice planlanmalı ve ölçümler bu koşullarda yapılmalıdır. Kuvvet belirleme açısından bakılacak olursa, kuvvet belirleme işlemi hangi sınır koşullarında gerekiyor ise Frekans Tepki Fonksiyonlarının da o koşullarda ölçülmesi gerekmektedir. Bir başka deyişle, yapının hangi durumda üzerine etkiyen kuvvetler belirlenmek isteniyorsa, FTF ölçümünün de yapı o halde iken yapılması şarttır. Çünkü, başta da belirtildiği üzere yapının kuvvet altındaki davranış biçimi sınır koşulları ile beraberce düşünüldüğünde yapının karakteristik bir özelliğidir. Bu yüzden, FTF ölçümü ve kuvvet belirleme prosedürü farklı durumlarda yapıldığında kullanıcıyı yanlış sonuçlara götürecektir.

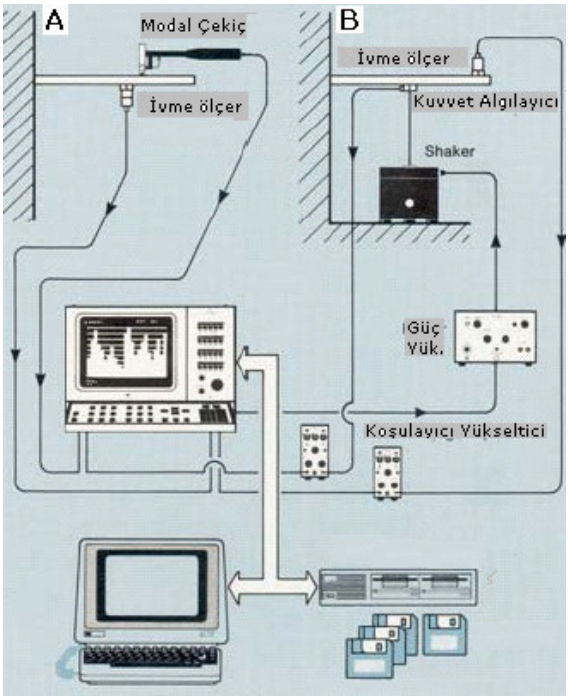
Yapının tahrik edilmesi de FTFlerin hassas olarak ölçülebilmesi için göz önünde bulundurulması gereken önemli etmenlerden birisidir. Tahrik şekli ve tahrik noktalarının seçimi FTF'lerin doğruluğuna ve kalitesine doğrudan etkide bulunmaktadır. Yapının tahrik edilmesi için genellikle çekiç veya sarsıcı kullanılmaktadır. Her iki durumun da kendilerine özgü olarak olumlu ve olumsuz yönlerinin bulunması ile birlikte, en uygun tahrik tipinin seçimi ölçüm sonuçları için oldukça önemlidir. Yapıyı tahrik etmek için modal çekicin kullanıldığı durumlarda, her bir ölçüm için yapıya çekiç ile vurulması gerekmektedir. Çekicin oluşturduğu darbe kuvveti, yapının geniş bir frekans aralığında tepkiler vermesi ile sonuçlanacak ve yapı üzerinden ölçülen bu tepkilerin kuvvete oranlanması ile FTF elde edilecektir. Yapıyı tahrik eden kuvvetin ölçülmesi ise çekicin ucundaki bir piezoelektrik sensör vasıtası ile yapılmaktadır. Ölçümlerde çekiç kullanmanın getireceği en önemli dezavantaj, özellikle nokta sayısının fazla olduğu durumlarda, her bir ölçüm için tekrar vurma gerekliliği ve bu yüzden oluşacak zaman kaybıdır. Ayrıca, diğer dezavantajlar olarak tam olarak istenen yere vuramama riski ve çekiç kullanımının basit görünmesine rağmen el becerisi ve deneyim gerektirmesi sayılabilir. Bu nedenlerden dolayı, nokta sayısının fazla olduğu durumlarda çekiç yerine sarsıcı kullanımı tercih edilebilir. Sarsıcı, yapının tahrik uygulanmaya karar verilen noktasına bağlanarak burada değişik kuvvet tiplerini, değişik frekans aralıklarında uygulayabilen bir alettir. Ölçüm süresini büyük ölçüde kısaltacağından tercih edilebilir, ancak yapı ile etkileşim halinde olacağından sınır koşullarını değiştirebileceği de göz önünde bulundurulmalıdır. İşte bu sebepten, özellikle küçük

ve hafif yapıların uyarılmasında kullanılmaları genelde tercih edilmez veya büyük dikkat gerektirir [12], [13], [14].

FTF ölçümlerinin başarısını etkileyen diğer faktörlerden biri de kuvvet ve titreşim seviyelerinin değerlerini ölçen algılayıcılardır. Titreşim ölçümlerinde sıklıkla ivmeölçerler kullanılmakla birlikte, duruma göre hız veya deplasman ölçümü de tercih edilebilir. Titreşim ölçümlerinde genellikle piezoelektrik sensörler tercih edilmektedir. Bu tip algılayıcılar, basınç, ivme, kuvvet gibi büyüklükleri ölçmek için piezoelektrik etki denen ve bu tip etkiler altında elektriksel sinyal üretimine dayanan bir çalışma esasına dayanırlar. Herhangi bir mekanik etkiye maruz kaldıklarında ürettikleri elektrik sinyalinden yola çıkılarak mekanik etkinin büyüklüğü elde edilebilmektedir. Algılayıcıların, ölçülmek istenen genlik ve frekans aralığına göre seçilmeleri de büyük önem taşımaktadır. Şekil 3.2 fiziksel büyüklükleri farklı algılayıcıların frekans ve duyarlılık değerleri arasındaki bağıntıyı göstermektedir.



Şekil 3.2: Tipik İvmeölçerlerin Frekansa Bağlı Duyarlılıkları [16]



Şekil 3.3: Modal Çekiç (A) ve Sarsıcı (B) Kullanıldığı Durumda Ölçüm Sistemi [16]

Şekil 3.3.'te gösterilen şematik bir FTF ölçüm sistemine bakılarak sistemin parçalarının açıklanması gerekirse, ilk olarak yapının uygun bir şekilde tahrik edilmesinden ve bu işlem için kullanılacak olan tahrik elemanından bahsedilebilir. Ölçüm sonucunda elde edilmek istenenlere bağlı olarak, yapı değişik şekillerde uyarılmak istenebilir. Yapının hangi frekans aralığındaki frekans tepki fonksiyonu ölçülmek isteniyorsa, tahrik elemanının oluşturduğu sinyalin de bu aralıktaki tüm frekans bileşenlerini içinde bulundurması istenir. Şekil 3.4'te gösterilen sarsıcının kullanıldığı durumlarda, sarsıcıya bağlanmış olan kontrol elemanından (veya analizörden) gelen bilgiye göre gerekli kuvvet sinyali oluşturulur. Analizörler değişik tipte kuvvet sinyalleri oluşturabilmektedirler (Sinüzoidal, darbe, cıvıltı, rastgele, vs..). Ancak sinyal üreticinin ürettiği sinyalin genliği yapıyı uyaracak olan sarsıcıyı sürmeye genellikle yeterli olmamaktadır. Şematik gösterimdeki sinyal yükselticinin kullanılma amacı da üretilen sinyalin önce gerektiği kadar güçlendirilmesi ve daha sonra sarsıcıya gönderilmesidir [13].



Şekil 3.4: Modal Sarsıcı

Kuvvet uygulayıcı eleman olarak çekicin kullanıldığı durumlarda ise çekicin yapı üzerinde vurulması ile bir darbe kuvveti elde edilmekte ve bu darbe kuvveti de yapıyı geniş bir frekans aralığında uyarmaktadır. Eğer elde edilen uyarı frekans aralığı istenen aralıkta değilse, çekiç ucu değiştirilip daha uygun bir seçim ile istenen frekans aralığında uyarım gerçekleştirilmeye çalışılır. Frekans Tepki Fonksiyonlarının ölçülmesinde kullanılan bir modal çekiç Şekil 3.5'te gösterilmektedir.



Şekil 3.5: Modal Çekiç

Algılayıcıların ürettiği sinyaller de oldukça küçük mertebelerde olduğundan, bu küçük sinyallerin de veri işlemeye uygun hale getirilebilmesi amacıyla koşullayıcı yükselticiler kullanılır. Piezoelektrik ivme ve kuvvet ölçerler koşullayıcı

yükselticilere bağlanarak, ürettikleri sinyallerin istenilen değerlere yükseltilmesi sağlanabilir.

FTF ölçümü için tüm bağlantılar yapıldıktan, gerekli kuvvet uygulanıp istenen tepki değerleri de ölçüldükten sonra sıra verilerin işlenmesine gelmiştir. Zamana bağlı olarak ölçülen her bir sinyal analizörün içindeki işlemci kullanılarak Fourier Dönüşümü yardımıyla frekansa bağlı veriye dönüştürülür. Fourier Dönüşümü zaman alanındaki bir bilgiyi frekans alanında ifade etmeye yarayan matematiksel bir dönüşümdür ve FTFler de frekans alanında ifade edildiği için zamana bağlı kuvvet ve tepki bilgisinin oranlanmadan önce frekansa bağlı halde ifade edilmelidirler.

Fourier Dönüşümü (FD - Fourier Transform, FT), periyodik bir fonksiyonu bu fonksiyonun frekans bileşenlerinden oluşan sürekli bir fonksiyona dönüştüren matematiksel bir işlemdir.

Zamana bağlı ve f(t) şeklinde ifade edilen bir sinyal için Fourier dönüşümü aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$F(\omega) \equiv \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \tag{3.11}$$

Zaman sinyaline geri dönmek için kulanılan ters Fourier dönüşümü ise,

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega \tag{3.12}$$

olarak gösterilir. Bu ifadelerde i, $i \equiv \sqrt{-1}$ olacak şekilde tanımlanan birim karmaşık sayıyı göstermekte; ω ise frekansı ifade etmektedir.

Orijinal sinyal olan f(t) ile çalışılırken, zaman alanı ve gerçek sayılarla ilgilenilmektedir. Fourier Dönüşümü F(ω) kullanılırken ise ilgilenilen alan frekans alanı ve elemanlar karmaşık sayılardır.

Fourier dönüşümü ayrık bir sinyale uygulanırsa Ayrık Fourier Dönüşümü (AFD - Discrete fourier Transform, DFT) ismini alır. Ayrık Fourier Dönüşümü aşağıda verildiği gibi tanımlanmaktadır:

$$F(k\Delta f) \equiv \sum_{n=0}^{N-1} f(n\Delta t) e^{-i(2\pi k\Delta f)(n\Delta t)}, \quad \text{k = 0, 1, 2, ..., N-1 için.} \tag{3.13}$$

(3.13) bağıntısında verilen Δf terimi frekans çözünürlüğünü ifade etmektedir.

Burada, sürekli bir sinyal yerine ayrık bir sinyal kullanılmakta olduğundan integralin yerini toplam işleminin aldığına dikkat edilmelidir. İlgili değişkenler aşağıda tanımlanmaktadır:

- N = Toplam örnek (veri) sayısı
- T = Örnekleme zamanı
- Δt= Ölçümler arasındaki zaman artımı. $\Delta t = \frac{T}{N}$.
- f_s = Örnekleme frekansı. $f_s = \frac{1}{\Delta t} = \frac{N}{T}$.

Ayrık Fourier Dönüşümü, ayrık bir sinyalin frekans içeriğini işlemek için kullanıldığından dijital bir araç olarak değerlendirilebilir.

Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD - Fast Fourier Transform, FFT), uygulama prensibi Ayrık Fourier Dönüşümü ile aynı olan fakat Ayrık Fourier Dönüşümünün oldukça hızlı bir versiyonudur. Dolayısıyla yukarıda AFD için bahsedilen kuralların tümü HFD için de geçerlidir. Ancak HDF nin uygulanabilmesi için veri sayısı N'nin 2 veya 2'nin katları olması gerekmektedir.

Bir HFD işleminin sonucunda bir karmaşık sayılar serisi elde edilir. Pek çok HFD yazılımı N adet gerçel veri için N adet karmaşık sayılar serisi üretmektedir Fakat Nyquist Kriteri uyarınca bunların sadece yarısı kullanılabilir veri sınıfına girer.

Daha hassas HFD ölçümü için sızıntı (leakage) olayına ve pencereleme fonksiyonlarına dikkat etmek gerekir. Sızıntı, tam olarak periyodik olmayan sinyallerin Fourier Dönüşümünün alınması esnasında veya frekans çözünürlüğünün uygun olarak ayarlanmadığı durumlarda oluşur. Örneğin harmonik bir sinyal için,

ilgilenilen zaman sinyalinin başlangıç ve bitiş noktaları arasında faz farkı varsa bu hata ile karşılaşılacaktır. Sızıntı sonucunda frekans spektrumunda görülmesi gereken noktalar dışındaki bölgelerde de bazı frekans bileşenleri ile karşılaşılır. Sızıntı tamamiyle sinyalin periyodik olmamasından ileri gelir. Eğer periyodik olmayan bir sinyalin HFD'si alınmak isteniyorsa, sızıntıdan kaçınmak için pencereleme (windowing) kullanımı gerekir. Buna göre ilgilenilen sinyal, pencereleme fonksiyonu ismi verilen genellikle t=0 anında 0'dan başlayıp t=T/2'de maksimuma ulaşan ve t=T'de yine sıfıra ulaşan bir başka fonksiyon ile çarpılmaktadır. Böylece sinyalin başlangıç ve bitiş noktaları sıfırlanmakta ve periyodik olmayan sinyallerde istenmeyen sızıntı etkisi minimize edilmektedir. Değişik sinyaller için değişik pencereleme fonksiyonları kullanılmalıdır. Örneğin, genliği gittikçe azalan bir sinyal için eksponansiyel pencere kullanımı uygun olacaktır. Ancak, pencereleme işlemi sinyalin genliğini de değiştirilebileceğinden kullanırken gereken özen gösterilmeli, hatta gerekmediği zaman kulanılmamalıdır.

Bu tez boyunca yapılan işlemlerde yapı üzerinden ölçülen zaman sinyalerinin tümü için aynı pencere tipi kullanılmış ve karşılaştırma yapılırken oluşabilecek genlikle ilgili hataların önüne geçilmeye çalışılmıştır.

Elde edilen kuvvet ve tepki bilgisi frekans alanında ifade edildikten sonra, yapılacak son işlem çıkış ve giriş değerlerinin oranlanması ve FTF büyüklüğünün elde edilmesidir. Oluşturulan grafikler, analizör tarafından bağımsız değişkeni frekans ve bağımlı değişkeni de FTF büyüklüğü olacak şekilde çizdirilir, görüntülenir ve istenirse daha sonra incelenmek veya kullanılmak üzere kaydedilebilir. Analizördeki kanal sayısına bağlı olarak farklı sayılarda FTF aynı anda elde edilebilir. FTF fonksiyonu frekansa bağlı karmaşık bir fonksiyon olduğu için bu fonksiyonun frekansa bağlı faz değerleri de mevcuttur. Bu nedenle genlik-frekans formatı haricinde daha değişik şekillerde de bu fonksiyonları çizdirmek ve sunmak mümkündür.

FTF Ölçüm yöntemleri, uygulanan tahrik kuvveti ve ölçülen tepki sayısına bağlı olarak üçe ayrılabilirler. Bunlar sırasıyla:

i) Tek Girdi Tek Çıktı (TGTÇ - Single Input Single Output, SISO)

ii) Tek Girdi Çok Çıktı (TGÇÇ - Single Input Multi Output, SIMO)

iii) Çok Girdi Çok Çıktı (ÇGÇÇ – Multi Input Multi Output, MIMO)

TGTÇ ölçümlerinde, sadece bir noktadan tahrik uygulanıp bir noktadan tepki ölçülerek FTF hesaplanmaktadır. Diğer taraftan TGÇÇ ölçümlerinde, yapı tek bir noktadan tahrik edilirken birden çok noktadan aynı anda tepki ölçülmektedir. ÇGÇÇ ölçümlerinde ise tahrik birden fazla noktadan verilirken, aynı zamanda da birden çok noktadan tepki ölçülmektedir. Eğer, N adet serbestlik derecesi olan bir yapı ile ilgileniliyorsa, en genel halde bu yapının uzaysal FTF matrisinin boyutu "N x N" olacaktır. Yukarıda bahsedilen her bir ölçüm tipi ise bu FTF matrisinin farklı bölümlerini ifade etmektedir. TGTÇ ölçümünde bu matrisin sadece tek bir elemanı, TGÇÇ ölçümünde matrisin bir sütunu ve ÇGÇÇ ölçümünde ise kullanılan tahrik noktasına bağlı olarak matrisin birden fazla sütunu ölçülebilmektedir [13].

FTF matrisinde satır indisi ölçüm noktalarını sütün indisi ise tahrik noktalarını gösterecek şekilde belirlendiğinde, TGTÇ sonucu:

$$H(\omega) = \left[H_{ij}(\omega)\right] \tag{3.14}$$

TGÇÇ sonucu:

$$H(\omega) = \begin{Bmatrix} H_{i1}(\omega) \\ H_{i1}(\omega) \\ \vdots \\ H_{i1}(\omega) \end{Bmatrix} \tag{3.15}$$

ve ÇGÇÇ sonucu da:

$$H(\omega) = \begin{bmatrix} H_{11}(\omega) & H_{12}(\omega) & \cdots & H_{1j}(\omega) \\ H_{21}(\omega) & H_{22}(\omega) & \cdots & H_{2j}(\omega) \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ H_{i1}(\omega) & H_{i2}(\omega) & \cdots & H_{ij}(\omega) \end{bmatrix} \tag{3.16}$$

şeklinde ifade edilebilir.

Görüldüğü gibi yukarıdaki üç denklemden (3.16) diğerlerine göre çok daha fazla anlamlı veri içermektedir. Dolayısıyla FTF matrisinin ne kadar fazla sütunu ölçülürse, yapı hakkında o kadar fazla bilgi edinilmiş olacaktır. Kuvvet belirleme işleminde de FTF matrisinin çok sayıda sütununun ölçülmüş olmasının sonuç üzerinde iyileştirici etkisi olacaktır.

3.3. Kuvvet Belirlemeye Etki Eden Faktörler

3.3.1. FTF Matrisinin Etkisi

(3.8) denkleminde de verildiği gibi, kuvvet belirleme yöntemini uygulayabilmek için ilk önce yapı üzerinden alınan FTF'lerin oluşturduğu matrisin tersi alınmalıdır. Bu işlem ise pratikte oldukça zahmetlidir ve hata yapılmadan sonuca ulaşılabilmesi için matrisin eksik ranklı (rank deficient) veya istikrarsız (ill-conditioned) olmamasına dikkat edilmelidir. FRF Matrisi ile yapılacak işlemlere geçmeden önce bu konularda bazı temel bilgileri hatırlatmakta fayda vardır:

Matris Rankı, bir matrisin birbirinden lineer bağımsız olan minimum satır veya sütun sayısıdır. Matrisler kullanılarak yapılan denklem işlemlerinde, matris rankı kaç adet bilinmeyenin çözülebileceğini gösterir. Örnek olarak

$$a = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 4 & 6 \\ 5 & 0 & -4 \end{bmatrix} \tag{3.17}$$

şeklinde bir matris düşünelim. Dikkat edilirse matrisin ikinci satırı birinci satırının iki katıdır. Bir başka deyişle matrisin ilk iki satırı birbirine lineer bağımlıdır. Bu durumda bu matris kullanılarak bulunabilecek bilinmeyen sayısı 3 değil 2 olacaktır.

Bu bölümde üzerinden geçilmesi gereken bir başka sayısal araç da Tekil Değerlerine Ayrıştırma (TDA - Singular Value Decomposition, SVD) yöntemidir. Tekil Değerleine Ayrıştırma, istikrarsız matrislerin ve problemlerin incelenmesinde oldukça etkili bir sayısal araçtır. Tekil Değerlerine Ayrıştırma Metodu kullanılarak bir matrisin tekil değerleri bulunabilmekte ve yine bu metod ile matrisin tersi

alınabilmektedir. Örneğin, *pxq* boyutundaki herhangi bir matris için tekil değer ayrıştırması işlemi alttaki eşitlikte verilmiştir [17].

$$[A]_{p\times q} = [U]_{p\times p}\,[\Sigma]_{p\times q}\,[V]^{T}_{q\times q} \tag{3.18}$$

(3.18) denkleminde verilen $[U]$ matrisi sol ortogonal matris, $[V]$ matrisi sağ ortogonal matris, $[\Sigma]$ ise tekil değerler matrisidir. Tekil değerler matrisinin elemanları tekil değerler olarak adlandırılmaktadır. Bu matris, *p* ve *q* değerlerinden hangisi daha küçük ise o kadar tekil değer içerir. Tekil değerlerin sayısı matrisin rankının belirlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır.$[A]$ matrisinin rankı $[\Sigma]$ matrisindeki sıfır olmayan tekil değerlerin sayısı kadardır. $[\Sigma]$ matrisinin açık şekli aşağıda verilmiştir [13], [17].

$$[\Sigma] = \begin{bmatrix} s_1 & & \cdots & & 0 \\ & \ddots & & & \\ \vdots & & s_i & & \vdots \\ & & & \ddots & \\ 0 & & \cdots & & s_r \\ 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \tag{3.19}$$

Yukarıdaki matriste s tekil değerleri göstermektedir. Bu sayılar ilk tekil değerden itibaren küçülerek devam ederler ve bazı durumlarda belli bir noktadan sonra en baştaki tekil değere göre ihmal edilebilecek kadar küçük bir değere ulaşırlar. Böyle hallerde, belirli bir toleranstan sonraki tekil değerler sıfır kabul edilir ve geri kalan tekil değerlerin sayısı da matrisin etkin rankını belirler.

Bu noktada matrislerin özellikleri ile yapılabilecek bir başka tanım ise "koşul sayısı"dır (Condition number). Herhangi bir matris için koşul sayısı, matrisin en büyük tekil değeri ile en küçük tekil değerinin oranlanması ile elde edilir ve matrisin istikrarı ile ilgili önemli derecede fikir vericidir. Koşul sayısının büyük olduğu durumlarda matrisin satır veya sütunlarının birbirlerine lineer bağımlılığı yüksek demektir ve bu da matrisin tersinin güvenilir bir şekilde alınmasını zorlaştırmaktadır.

Daha sonra da açıklanacağı gibi koşul sayısının küçük olduğu durumlarda daha yüksek doğruluklu sonuçlar elde edilecektir.

Tekil Değerlerine Ayrıştırmanın bir başka avantajı, kare olmayan matrislerin de terslerinin alınabilmesini sağlamasıdır. TDA Metoduna öre göre herhangi bir $[A]$ matrisinin tersi alttaki bağıntıda verilmiştir.

$$[A]^{+}_{q\times p} = [V]_{q\times q}[\Sigma]^{+}_{q\times p}[U]^{T}_{p\times p} \tag{3.20}$$

Bu denklemde verilen $[\Sigma]^{+}_{M\times N}$ ifadesinin açıklaması ise (3.21) denklemi ile verilmektedir.

$$[\Sigma]^{+}_{q\times p} = diag\left(s_1^{-1}, s_2^{-1}, s_3^{-1}, ..., s_r^{-1}, 0, 0, ...0\right) \tag{3.21}$$

Bu arada, ilgilenilen matris kompleks olduğunda denklem (3.20)'deki transpoze işlemi yerine kompleks eşlenik transpoze işlemi yapmak gerekecektir.

Tekil değer ayrıştırmasının kullanılması, FTF matrisinin tersinin alınması sırasındaki çözülebilir denklem sayısının da hesaplanmasını sağlamaktadır. Bu değer de matrisin TDA ile hesaplanan etkin rankı kadar olacaktır.

3.3.2. Ölçülen Koordinat Sayısının Etkisi

Kuvvet belirleme işlemi yapılırken, en az tespit edilmeye çalışılan kuvvet noktası kadar cevap ölçülmesi gereklidir. Bazı durumlarda oluşturulan FTF matrisinin de eksik ranklı veya istikrarsız olacağı göz ününde bulundurulursa ölçüm koordinatlarının arttırılması gerekebilir.

Bir sistemin sadece n adet noktasındaki kuvvet, m adet ölçüm ile tespit edilmeye çalışılıyor olsun. Bu kuvvetlerin doğru bir şekilde bulunabilmesi için en az kuvvet sayısı kadar ölçüme ihtiyaç vardır. Çözüm kalitesini arttırmak amacıyla kuvvet sayısı değiştirilmeden ölçüm alınan nokta sayısı arttırılabilir (m>n). Böylece bilinmeyen sayısından daha fazla denklem elde edilebilecek ve bu durum daha doğru çözümler bulunmasını sağlayacaktır. Bir başka deyişle, kare FTF matrisi yerine dikdörtgen

FTF matrisi kullanmak sonuçların güvenilirliğini artırmak ve tekil çözüm elde edebilmek için önemlidir.

3.3.3. Ölçüm Kalitesinin Etkisi

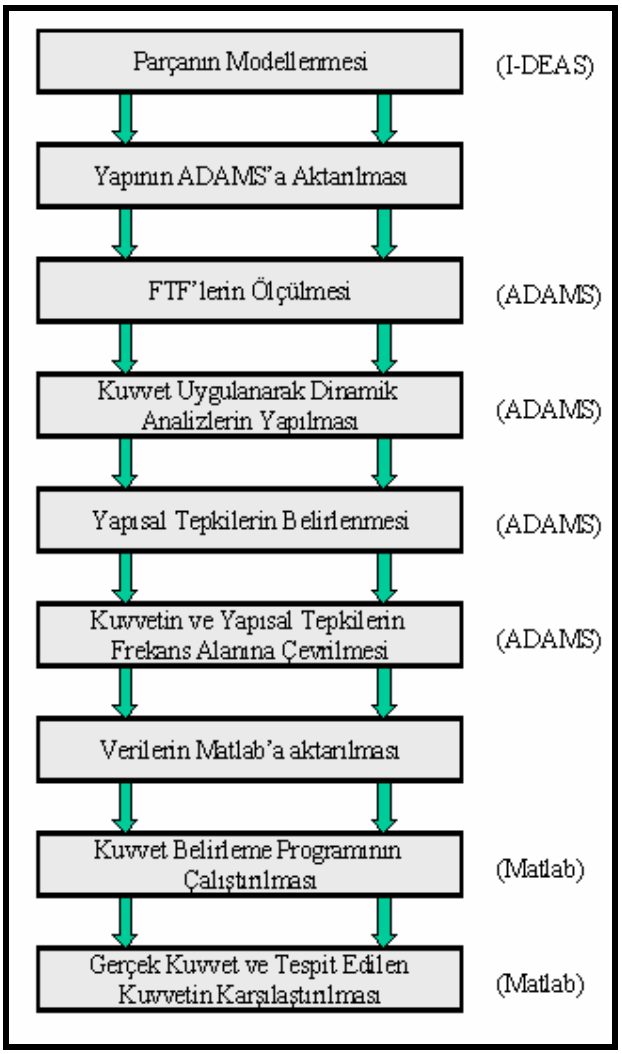
Frekans Tepki Fonksiyonlarının kalitesi, ölçüm sırasında değişik faktörlerden olumsuz yönde etkilenebilmektedir. FTF kalitesinin özellikle oluşabilecek parazitlerden etkilendiği bilinmektedir. Deneysel çalışmalarda, FTF'lerdeki parazit miktarı ortalamaya dahil edilen ölçüm sayısının arttırılmasıyla azaltılsa da tamamen ortadan kaldırılabilmesi mümkün değildir. Kullanılan kuvvet belirleme yöntemi de matris tersi işlemi içerdiğinden parazitlere karşı oldukça duyarlı olabilmektedir. Bu nedenle, deneysel ölçümlerde oluşacak parazitlerden mümkün olduğunca kaçınılmalıdır.

Sistematik hatalar da, ölçüm kalitesini olumsuz yönde etkileyen bir diğer faktördür. Sistematik hata, ölçüm aracından veya doğrudan doğruya ölçüm sisteminin kendisinden kaynaklanan, ölçümden ölçüme tekrar eden hata çeşididir. Ölçülmüş FTF'lerdeki en önemli sistematik hatalar, transdüser kütle etkisinden ve yapı-sarsıcı etkileşiminden kaynaklanırlar. Transdüser kütleleri incelenen yapının yanında çok küçük kaldıklarından genellikle ihmal edilirler. Bununla birlikte, yapıya az da olsa kütle ekledikleri ve sınır şartlarını değiştirdikleri veya sönüm etkisi getirebildikleri doğrudur. Özellikle hafif yapılar söz konusu olduğunda veya sarsıcı ile tahrik durumunda sarsıcının yapıya uygun bir şekilde bağlanmamış olması halinde sistematik hatalar önemli boyutlara ulaşabilir. Tüm bu nedenlerden dolayı, bu etkiden korunmak için sarsıcı konumu düzgün bir şekilde ayarlanmalıdır. Yine de oluşabilecek farklardan ötürü, FTF ölçümü yapının hangi durumunda yapılıyorsa, yapının tahrik edilmesi ve tepkilerin ölçülmesi de aynı konumda yapılmalı ve oluşabilecek sistematik hataların önüne geçilmeye çalışılmalıdır [14].

3.4 Kuvvet Belirleme Yönteminin Akış Şeması

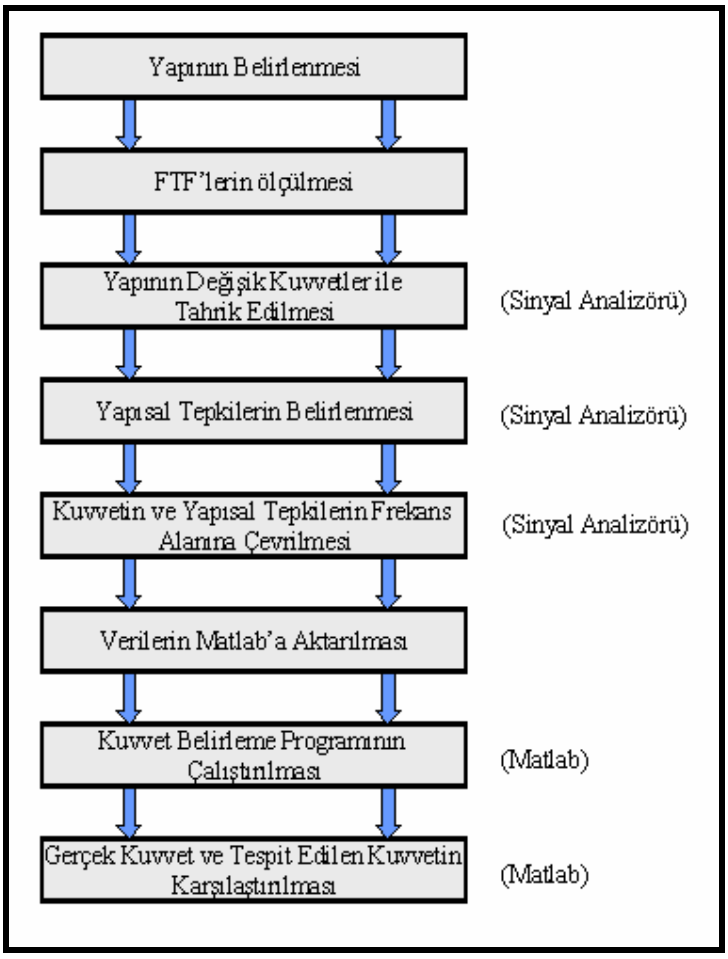
Tezde uygulanan kuvvet belirleme yönteminin ilk adımı, üzerindeki kuvvetlerin belirleneceği yapının kuvvet belirleme amacına yönelik olarak ölçümlere hazırlanmasıdır. Bu yapı üzerindeki kuvvetler hangi sınır şartlarında belirlenecekse o sınır şartları sağlanıyor durumdayken yapının FTF matrisi elde edilmelidir. Sayısal

çalışmalarda bu bölüm ADAMS ve I-DEAS programı kullanarak yapılmıştır. Yapı I-DEAS programı kullanarak modellenmiş ve daha sonra ADAMS programına aktarılmıştır. Burada her bir düğüm noktası üzerinden tahrik uygulanabilecek ve her bir düğüm noktası üzerinden tepki ölçülebilecek şekilde titreşim analizi yapılmış ve yapının istenen boyuttaki uzaysal FTF matrisi elde edilmiştir. Daha sonra yapının değişik durumlardaki dinamik analizlerinin gerçekleştirilebildiği ADAMS programı kullanılarak yapı üzerinde seçilen noktalardan dinamik kuvvet uygulanmıştır. Yapıya ait tüm düğüm noktalarından tepkiler ölçülmüştür. Kuvvet Belirleme İşlemi frekans alanında yapılacağından ölçülen bu tepkilerin Hızlı Fourier Dönüşümleri alınmış ve frekans alanına geçilmiştir. ADAMS programı zamana bağlı veriyi frekans alanında temsil etmek için Fourier Dönüşümü yapabilmektedir. Öte yandan Hızlı Fourier Dönüşümü, yapıya uygulanan kuvvet için de yapılmıştır. Daha sonra elde edilen bu üç veri (yapısal FTF matrisi, yapıya uygulanan kuvvet ve bu kuvvet nedeniyle yapıda oluşan titreşimler) MATLAB ortamına aktarılmışır. MATLAB'de yazılan bir program aracılığı ile burada FTF matrisinin tersi alınmış ve kuvvet belirleme formülü uygulanarak yapı üzerindeki düğüm noktalarına uygulanan kuvvet tespit edilmiştir. Bilinen gerçek kuvvet ile hesaplanan kuvvet üst üste çizdirilmekte ve böylece karşılaştırma yapılabilmektedir. MATLAB programı aynı zamanda, FTF'ye ait koşul sayısı grafiğini de frekansa bağlı olarak çizmekte ve böylece gerçek kuvvetle tespit edilen kuvvet arasındaki farkların nedenleri hakkında da bilgi sahibi olunabilmektedir. Sayısal duruma ait kuvvet belirleme prosedürünün şematik gösterimi Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6: Sayısal Kuvvet Belirleme Prosedürünün Şematik Gösterimi

Deneysel çalışmalarda ise ilk olarak kuvvet belirleme prosedürünün uygulanacağı yapı belirlenmiş ve yapı üzerinden gerçek Frekans Tepki fonksiyonları ölçülmüştür. Daha sonra yapının herhangi bir noktasından kuvvet uygulanmış ve gerekli noktalardan tepkiler ölçülmüştür. Kuvvete ve ölçülen tepkilere Hızlı Fourier Dönüşümü uygulanarak frekans alanına geçildikten sonra elde edilen veriler Matlab programına aktarılmış ve burada Kuvvet Belirleme Programı çalıştırılmışır. Sonuçta tespit edilen kuvvet ve en başta yapıya uygulanan ve (bilinmediği kabul edilen) gerçek kuvvet üst üste çizdirilerek karşılaştırma yapılabilmektedir. Deneysel duruma ait kuvvet belirleme prosedürünün şematik gösterimi Şekil 3.7'de verilmiştir.



Şekil 3.7: Deneysel Kuvvet Belirleme Prosedürünün Şematik Gösterimi

4. KUVVET BELİRLEME YÖNTEMİNİN SAYISAL UYGULAMALARI

Bu bölümde, oluşturulan kuvvet belirleme prosedürünün sayısal modeller üzerinde yapılan denemeleri açıklanmıştır. Kullanılan FTF'ler ve yapılan dinamik analizler sayısal ortamda gerçekleştirilmiştir. Yapı ilk olarak I-DEAS'ta modellenmiş ve daha sonra ADAMS'a aktarılarak üzerinden frekans tepki fonksiyonları hesaplanmış ve dinamik analizler yapılmıştır. Bulunan veriler ise MATLAB'da yazılan bir programda çözdürülerek sonuçlara ulaşılmıştır. Sayısal uygulamalara geçmeden önce sayısal model hakkında genel bilgi vermek yerinde olacaktır.

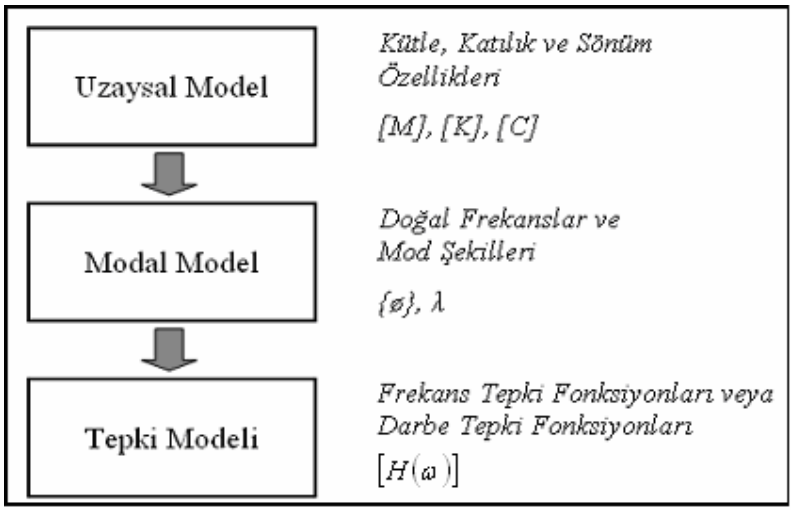
4.1. Sayısal Model

Sayısal çalışmaların açıklanması için, ilk olarak sayısal model hakkında bilgi verilmelidir. Sayısal model, bir yapının bilgisayar ortamında hazırlanmış modelidir. Bir sayısal modelden gerçek yapıyı temsil etmesi ve onun hakkında fikir verici olması istenir. Son yıllarda, sayısal modellerin oluşturulması için sıkça kullanılan bir yöntem Sonlu Elemanlar Metodlarıdır. Sonlu elemanlar teorisine göre yapının özellikleri bilinen basit elemanlardan oluştuğu kabul edilir. Bir yapının sonlu sayıda eleman içeriyor olması kabulü, sayıdal modelin gerçek yapı gibi sürekli değil de ayrık bir sistem olması demektir. Yapının ayrık elemanlardan oluşuyor olması nedeniyle ilgilenilen sistem kütle ([M]), esneklik ([K]) ve sönüm ([C]) matrislerinden oluşmaktadır. Sonlu elemanların yapının geometrik şekline uygun olarak bir araya getirilmiş, aynı zamanda malzeme özelliklerini ve sınır koşullarını da kapsayan durumuna Sonlu Elemanlar Modeli (SEM) denir.

Gerçekte bir yapının sonsuz sayıda serbestlik derecesi bulunmaktadır. Sayısal modelde ise bu sayı sonlu elemanların sayısı ile orantılı olarak sınırlandırılmış olmaktadır. Her bir düğüm noktasında, üç adet öteleme yönüne ait ve üç adet dönmeye ait toplam 6 serbestlik derecesi vardır. Ancak kimi sonlu eleman türleri dönme yönündeki serbestlik derecelerini tanımlamayarak sadece öteleme

yönündekileri tanımlarlar. Doğal olarak bu, yapının gerçek yapı ile benzeşimini etkileyen bir faktördür. Görüldüğü gibi, düğüm noktalarının tanımlanması kadar, bu noktaların tanımlanma biçimi de modelin vereceği sonuçlar üzerinde etkilidir.

Bir yapının sayısal modeli değişik şekillerde ifade edilebilir. Uzaysal Model, Modal Model ve Tepki Modeli olarak isimlendirebileceğimiz üç adet model tipi vardır. Şekil 4.1'de verilen bu sıralama Sayısal Hesap yönü olarak adlandırılmaktadır [15].



Şekil 4.1: Sayısal Hesap Yönü

Sonlu elemanlar modeli kullanılarak yapının katılık matrisi $[K]$, kütle matrisi $[M]$ ve sönüm matrisi $[C]$ elde edilebilmektedir. Bu matrisler yapının Uzaysal Modelini oluştururlar. Katılık, kütle ve sönüm matrisleri kullanılarak oluşturulmuş hareket denklemi Eşitlik (4.1)'de verilmiştir.

$$[M]\{\ddot{x}\}+[C]\{\dot{x}\}+[K]\{x\}=\{f(t)\} \tag{4.1}$$

(4.1) bağıntısı ile verilmiş olan hareket denklemi özdeğer problemine dönüştürülürse özdeğerler (λ) ve özvektör matrisi ($[\psi]$) hesaplanabilir. Sönümün olmaması durumunda Özdeğer problemi (4.2)'de verilen bağıntı ile ifade edilebilir.

$$([K]-[\lambda][M])[\psi]=\{0\} \tag{4.2}$$

Uzaysal modelden modal modele geçerken ortogonalite kurallarına ve kütle normalizasyonuna dikkat edilmelidir. m_r ve k_r sırasıyla modal kütle ve modal katılık, $[\psi]$ ise özvektör matrisi olarak tanımlandığında Ortogonalite özellikleri aşağıda verilmiştir:

$$[\psi]^T [M][\psi] = [m_r] \tag{4.3}$$

$$[\psi]^T [K][\psi] = [k_r] \tag{4.4}$$

r numaralı moda ait kütle normalizasyonu yapılmış mod şekli $\{\phi\}_r$ ile bu ifadenin genel formu $\{\psi\}_r$ arasındaki ilişki de aşağıdaki gibi verilmektedir:

$$\{\phi_r\} = \frac{1}{\sqrt{m_r}} \{\psi_r\} \tag{4.5}$$

Kütle normalizasyonu yapılmış özvektörler ise $[\phi]$ ile ifade edilirse bunlara ait özellikler de (4.6) ve (4.7) denklemleri ile verilebilir. *I* birim matrisi, ω_r ise r. doğal frekansı göstermektedir.

$$[\phi]^T [M][\phi] = [I] \tag{4.6}$$

$$[\phi]^T [K][\phi] = [\omega_r^2] \tag{4.7}$$

Eşitlik (4.2) kullanıldığında, yapının davranışı titreşim biçimleri ve doğal frekanslarla tanımlanmış olmaktadır. Bu model tipi modal model olarak adlandırılmaktadır.

Özdeğerler doğal frekansların karelerini, özvektörler ise mod şekli matrisinin her bir sütununu göstermektedirler. Özdeğerler ve özvektörler kullanılarak, sonlu elemanlar modelinin Frekans Tepki Fonksiyonları elde edilebilmektedir. Özdeğer ve özvektörlere bağlı FTF formülü Eşitlik (4.8)'de verilmiştir.

$$\alpha_{jk}(\omega) = \sum_{r=1}^{N} \frac{(\phi_{jr})(\phi_{kr})}{\omega_r^2 - \omega^2 + i\eta_r \omega_r^2} \tag{4.8}$$

(4.8) bağıntısındaki $\alpha(\omega)$ FTF'yi temsil etmektedir. j ve k indisleri sırasıyla ölçüm ve tahrik noktalarını, r ise mod sayısını göstermektedir.

$$\alpha_{jk}(\omega) = \frac{X_j}{F_k} \tag{4.9}$$

α_{jk} , (4.9) denklemi ile ifade edilebilir. F_k yapının *k.* noktasına uygulanan tahrik ve X_j de bu tahrik kuvvetine karşılık *j.* noktada oluşan tepkidir. Denklem 4.8'deki $\{\phi\}$ özvektörü, λ özdeğeri ve η sönüm katsayısını göstermektedir. Bu eşitlik yardımıyla, modelin düğüm noktalarındaki FTFlerin hesaplanabileceği görülmektedir. Yapının Frekans Tepki Fonksiyonları ile tanımlanmasına dayanan bu modele de Tepki Modeli adı verilmektedir [15].

Orantısız yapısal sönümün mevcut olduğu durumlarda, K matrisi karmaşık sayılardan oluşacaktır. Ayrıca orantısız yapısal sönümün mevcut olduğu durumlarda mod şekilleri ve özdeğerler de kompleks olacaktır.

4.2. Sayısal Hesaplamalarda Kullanılan Bilgisayar Yazılımları

Sayısal model ile ilgili çalışmalarda, sonlu elemanlar programı olarak I-DEAS ve dinamik analiz programı olarak da ADAMS kullanılmıştır. Oluşturulan sistem denklemlerini çözmek için de MATLAB'den faydalanılmıştır.

I-DEAS, bir bilgisayar destekli çizim ve mühendislik (CAD / CAE) programıdır. Bu program kullanılarak çizilen mekanik sistem parçalarına gerekli yapısal özellikler atanarak sonlu elemanlar modelleri oluşturulabilmektedir. I-DEAS kullanılarak, yapılar üzerinde statik analizler, titreşim analizleri ve daha değişik analiz tipleri uygulanabilmektedir

ADAMS, mekanik sistemlerin simülasyonlarını yapmaya yarayan bir yazılımdır. Bu yazılım yardımıyla kurulan modeller üzerinde statik ve dinamik analizler

yapılabilmektedir. ADAMS-Standart modülü sadece rijit yani esnemez parçalarla çalışabilme olanağı sunmaktadır. Gerçekte ise yapının elastik özelliklerinden kaynaklanan titreşim modları bulunmaktadır. I-DEAS'ta oluşturulan yapıyı elastik olarak ADAMS ortamına aktarabilmek için ADAMS-Flex adlı yardımcı bir modülün kullanılması gerekmektedir. ADAMS ortamında yapının herhangi bir noktasına bir kuvvet uygulanarak istenen noktalardan tepkiler ölçülebilmekte ve zamana bağlı olarak elde edilen bu verilerin frekans alanına çevrilmesi için gerekli Fourier Dönüşümü uygulanabilmektedir.

MATLAB, bir teknik programlama dilidir. Bununla birlikte algoritma geliştirme, sayısal hesaplamalar ve veri analizi için de kullanılan bir yazılım paketidir. MATLAB kullanılarak teknik problemler çözülebilir, ayrıca değişik amaçlara yönelik algoritmalar oluşturulabilir. Bu tez boyunca MATLAB yazılımı, kuvvet belirleme için gerekli veriler bulunduktan sonra ilgili sayısal işlemlerin yapılması için kullanmıştır. MATLAB'da yazılan bir algoritma, elde edilen frekans tepki fonksiyonlarını ve yapısal titreşim sonuçlarını kullanarak bilinmeyen kuvvetleri hesaplamaktadır.

4.3. Sayısal Olarak Tekil Çözümün Belirlenebilmesi İçin Gerekli Şartlar

Bu bölümde başarıya ulaşmayan ve yanlış sonuç veren sayısal çalışmalardan örnekler gösterilmiş ve mevcut hataları düzeltmek için yapılabileceklerden bahsedilmiştir. Daha sonra doğru sonucun bulunduğu örneklere geçilmektedir.

Bilindiği gibi FTF Tabanlı Kuvvet Belirleme Metodunun çalışmasında yapısal FTF Matrislerinin ölçülmesi büyük önem taşımaktadır. Bu matrisin tersi alınmakta ve matrisin eksik ranklı olması durumunda sonuçların kalitesi iyi olmamaktadır.

Yapısal FTF Matrisinin sonuç üzerindeki etkisini anlatabilmek için 15 adet noktasında kuvvet belirlenmeye çalışılan bir sayısal levha modeli ADAMS programına aktarılmıştır. Daha sonra yapının bir noktasına 3 N büyüklüğünde sinüzoidal bir kuvvet uygulanmış ve kuvvetin bu frekansına ait kuvvet bileşeni tespit edilmeye çalışılmıştır. Sonuca ulaşabilmek için yapı üzerinden bu frekansa ait 15x15 boyutundaki FTF matrisi hesaplanmış ve kullanılmıştır. Bu durumda yapıya

uygulanan kuvvet tespit edilmeye çalışıldığında yapı üzerindeki noktalarda Tablo 4.1'de verilen şu sonuçlar bulunmuştur:

Tablo 4.1: 15x15 FTF Matrisinin Kullanıldığı Durumda Gerçek ve Hesaplanan Kuvvet

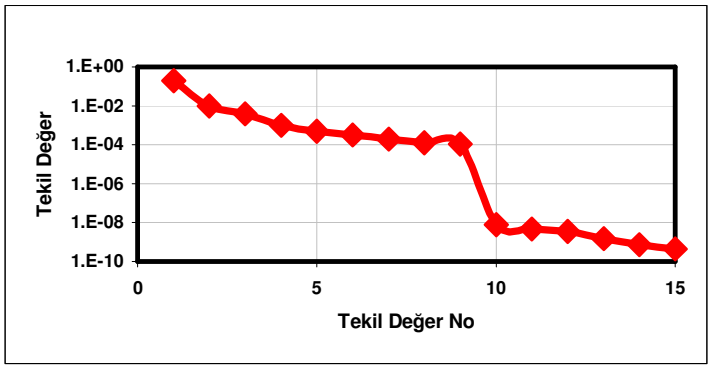
Uygulanan (Gerçek) Kuvvet	**Hesaplanan Kuvvet**
0.0	-0.2211
3.0	2.3482
0.0	-0.2188
0.0	0.2084
0.0	3.1804
0.0	0.2479
0.0	-0.3432
0.0	-4.7718
0.0	-0.4955
0.0	0.4204
0.0	4.8292
0.0	0.6824
0.0	-0.5159
0.0	-39751
0.0	-0.7909

Kuvvet sadece ikinci noktaya uygulanmasına rağmen tüm noktalarda kuvvet hesaplanmıştır. Eğer bulunan bu sonuçlar yapı üzerine uygulanırsa yapı tekil kuvvetin uygulanması sırasında titreştiği gibi hareket edecektir. Başka bir deyişle bulunan sonuç mevcut çözümlerden biri olmakla birlikte aranan "tekil çözüm" değildir. Tekil çözümün bulunamaması ile ilgili olarak kontrol edilmesi gereken önemli bir değişken koşul numarasıdır. Hesapta kullanılan 15x15 boyutundaki FTF matrisinin MATLAB programında hesaplanan tekil değerleri ve koşul sayısı Tablo 4.2'de gösterildiği gibidir.

Tablo 4.2: 15x15 Boyutundaki FTF Matrisinin Tekil Değerleri ve Koşul Sayısı

Tekil Değerler	Koşul Sayısı
1.96E-01	
9.98E-03	
3.89E-03	
1.02E-03	
4.98E-04	
3.07E-04	
1.90E-04	
1.24E-04	4.27E+08
1.06E-04	
7.55E-09	
4.53E-09	
3.53E-09	
1.51E-09	
7.47E-10	
4.59E-10	

Tabloda da görüldüğü gibi matrisin koşul sayısı oldukça yüksek bir değerdedir. Bu durum, matrisin en büyük tekil değeri ile en küçük tekil değeri arasındaki oranın çok fazla olduğu anlamına gelmektedir. Matrisin rankı 15 gibi görünmesine rağmen rank aslında gerçekte bu değerden oldukça düşük olup bu matris kullanılarak hesaplanabilecek en fazla bilinmeyen sayısı gerçekte 15'in altındadır. Tekil değerler arasındaki ilişkinin daha net görülebilmesi için tekil değerler y ekseni logaritmik olarak çizilmiş bir grafiğe yerleştirilmişlerdir. Bu grafik Şekil 4.2'de verilmektedir.



Şekil 4.2: 15x15 Boyutundaki FTF Matrisine Ait Tekil Değerler

FTF Matrsinin ilk 9 tekil değeri birbirine yakın değerlerde seyretmekle birlikte onuncu tekil değerden itibaren çok büyük bir düşüş meydana gelmekte ve daha sonraki tekil değerler ihmal edilebilecek seviyelere düşmektedirler. Bu durumda

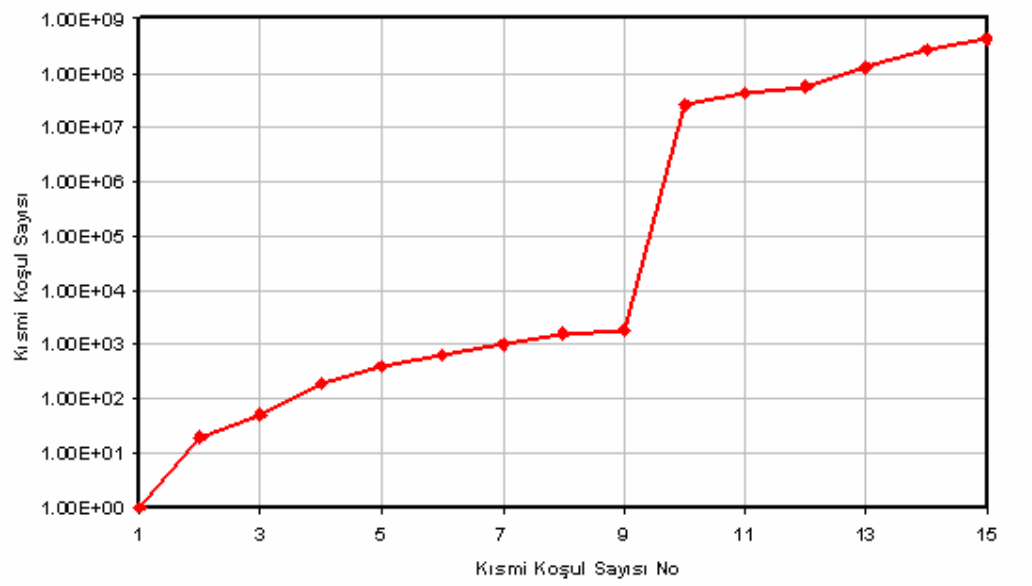
matrisin rankının gerçekte 9 olduğu ve bu matris kullanılarak en fazla 9 bilinmeyenli bir denklemin çözülebileceği sonucu çıkarılır. 15 adet kuvvet tespit edilmeye çalışıldığında tekil çözümün bulunamıyor oluşu doğal bir sonuçtur.

Bu noktada, FTF Matrisinin lineer bağımlılığını kontrol etmek amacıyla kısmı tekil sayıları adı verilen yeni bir karşılaştırma yöntemi de denenmiştir. Buna göre en büyük tekil değer önce kendine ve daha sonra sırasıyla diğer tekil değerlere bölünmektedir. Bu şekilde elde edilen sonuçlar Tablo 4.3'te sunulmuştur.

Tablo 4.3: 15x15 Boyutundaki FTF Matrisinin Tekil Değerleri ve Kısmi Koşul Sayıları

Tekil Değerler	**Kısmi Koşul Sayıları**
1.96E-01	1.0
9.98E-03	1.96E+01
3.89E-03	5.04E+01
1.02E-03	1.91E+02
4.98E-04	3.94E+02
3.07E-04	6.37E+02
1.90E-04	1.03E+03
1.24E-04	1.58E+03
1.06E-04	1.85E+03
7.55E-09	2.60E+07
4.53E-09	4.33E+07
3.53E-09	5.55E+07
1.51E-09	1.30E+08
7.47E-10	2.63E+08
4.59E-10	4.28E+08

Kısmi koşul sayıları, Şekil 4.3'teki gibi y ekseni logaritmik olan bir grafik üstünde gösterilirse aralarındaki ilişki daha net anlaşılmaktadır.



Şekil 4.3: 15x15 boyutundaki FTF Matrisine Ait Kısmi Koşul Sayıları

Değişik koşul sayılarında sonucun nasıl değiştiğini incelemek amacıyla değişik boyutlarda FTF matrisleri kullanılarak kuvvet belirlenmeye çalışılmıştır. Bu çalışmanın özeti Tablo 4.4'te sunulmaktadır.

Tablo 4.4: Değişik Denemelere Ait Kuvvet Belirleme Sonuçları

FTF Matrisinin Boyutu	**Bulunmaya Çalışılan Kuvvet Sayısı**	**Koşul Sayısı**	**Rank**	**Tekil Çözüm Bulunabiliyor mu?**
15x15	15	4.28E+08	9	Hayır
10x10	10	3.85E+08	9	Hayır
9x9	9	2.72E+05	9	Evet
6x6	6	4.23E+03	6	Evet

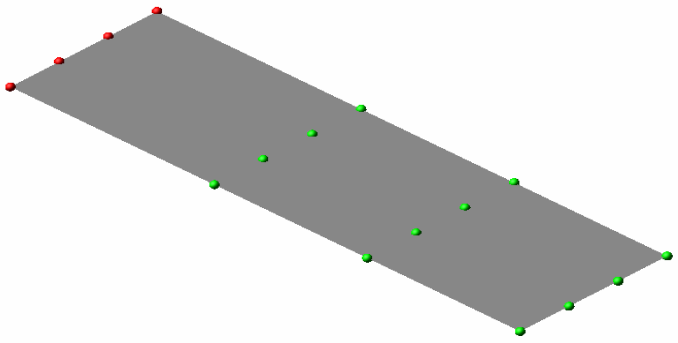
Tabloya göre koşul sayısı düştükçe tekil çözümün bulunma olasılığı artmaktadır. Bu durumda koşul sayısı mümkün olduğunca düşük tutulmalıdır. Bununla birlikte kuvvet belirleme işlemi sonucunda hatalı hesaplanan frekanslarda koşul sayısının yüksek olabileceği düşünülmeli ve sonuçlar bu bilgi ışığında değerlendirilmelidir.

4.4. Düz Levha Üzerindeki Sayısal Uygulamalar

4.4.1. Düz Levha Sayısal Modeli

Kuvvet belirleme yöntemi ile yapılan ilk sayısal çalışma düz levha üzerinde gerçekleştirilmiştir. İlgilenilen düz levha 120 cm x 400 cm boyutlarındadır ve 2 mm kalınlığa sahiptir. Bu parça ilk olarak I-DEAS'ta çizilmiş ve kabuk tipi elemanlar kullanılarak sonlu elemanlara bölünmüştür. Sonlu elemanlar modelinin oluşturulması ile yapının kütle ([M]), sönüm ([C]) ve katılık ([K]) matrisleri elde edilmektedir. Bu matrisler gerçek yapının özelliklerini temsil etmektedirler. Sonlu elemanlar modeli oluşturulduktan sonra titreşim analizi yapılarak özdeğer problemi çözülmüş ve yapının doğal frekansları elde edilmiştir. Daha sonra bu parça ADAMS-Flex modülü aracılığı ile ADAMS programına aktarılmıştır. Kısa kenarından sabitlenen levhanın üzerinden bu halde iken FTF'ler alınmıştır. Sonraki adımlarda ise levhanın bir noktasından kuvvet uygulanmakta ve en başta bilinmediği farzedilen bu kuvvet, ölçülen tepkilerin yardımıyla bulunmaya çalışılmaktadır. İlk etapta yapının 12x12 boyutundaki FTF matrisi ölçülmüş ve 12 adet noktadaki kuvvet dağılımı bulunmaya çalışılmıştır.

Şekil 4.4'de sayısal hesaplarda kullanılan düz levha sayısal modeli gösterilmektedir.



Şekil 4.4: Düz Levha Sayısal Modeli

4.4.2. Kuvvet Belirleme Uygulamaları

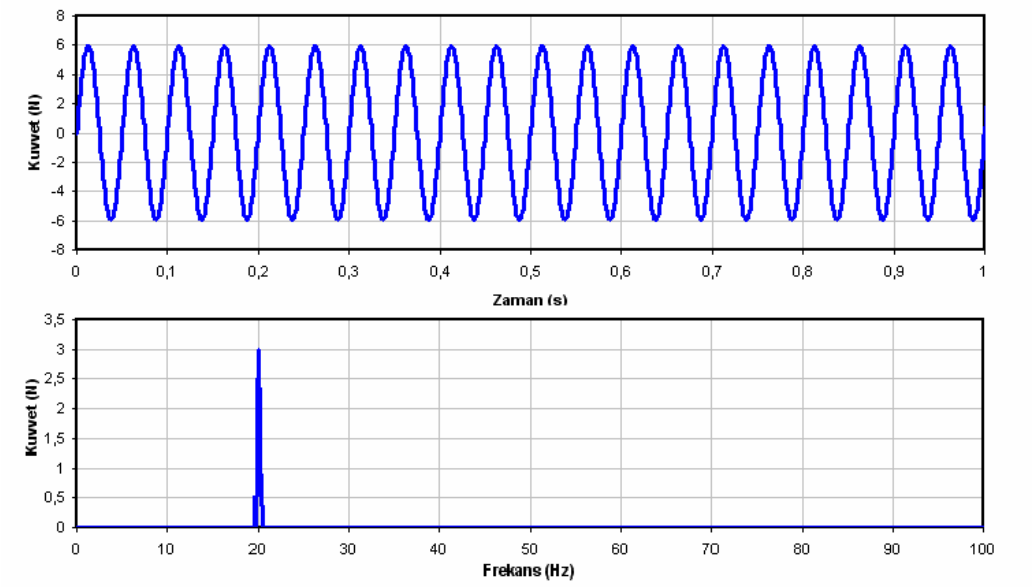
Bu bölümde, düz levha sayısal modeline ait kuvvet belirleme çalışmalarından bahsedilecektir. Levha üzerine sırasıyla birer koordinattan sinüzoidal kuvvet,

periyodik kuvvet, darbe kuvveti ve cıvıltı kuvvet uygulanmış, son örnekte de birden çok noktadan tahrik durumu incelenmiştir.

4.4.2.1. Sinüzoidal Kuvvet

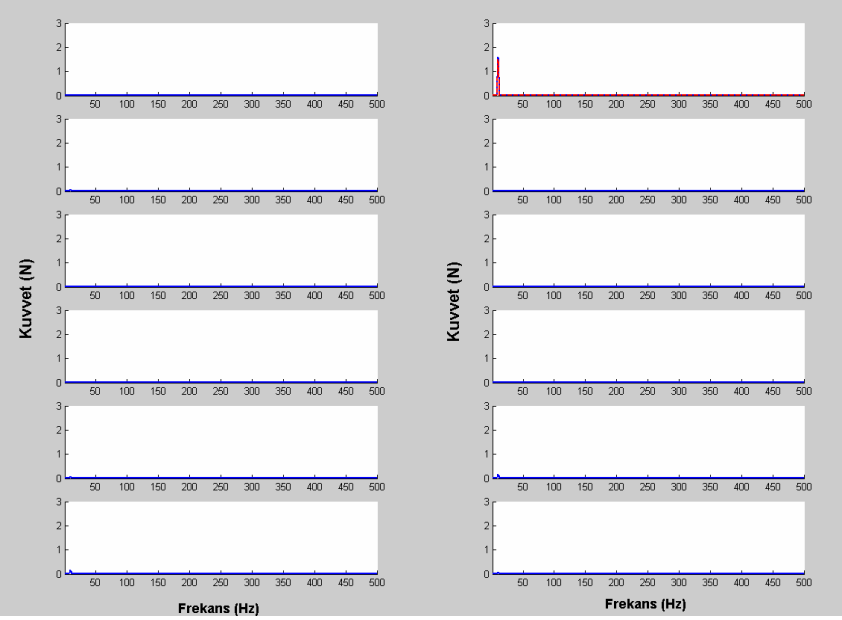
Bu bölümde levha üzerine sinüzoidal bir kuvvet uygulanmakta ve kuvvet belirleme metodu kullanarak bu kuvvet hesaplanarak doğruluğu bilinen gerçek kuvvet ile karşılaştırılmaktadır.

Tipik bir sinüzoidal kuvvet ve bu sinyalin Fourier Spektrumu Şekil 4.5'de gösterildiği gibidir. Eğer sinyal sadece tek bir sinüs sinyalinden ibaret ise Fourier Spektrumunda da sadece o frekansta bir adet tepe noktası görülecek ve diğer frekanslardaki genlikler sıfır olacaktır.



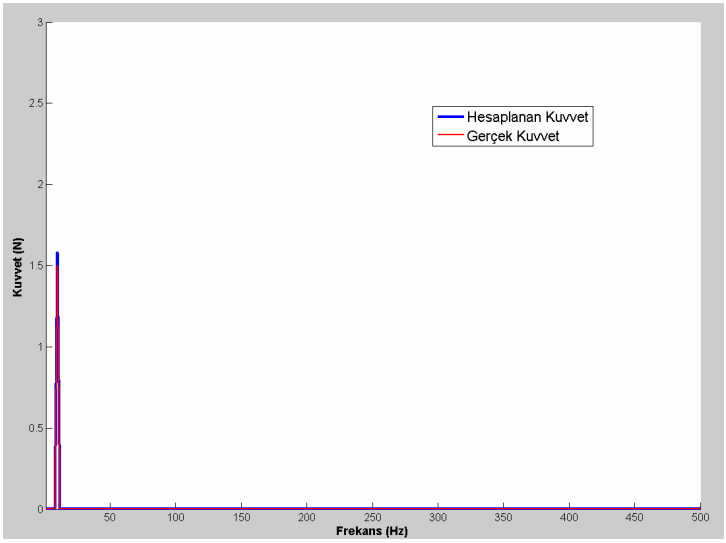
Şekil 4.5: Tipik Bir Sinüs Sinyalinin Zamana ve Frekansa Bağlı Gösterimi

Sinüzoidal kuvvet levhanın 2 no'lu koordinatına uygulanmaktadır. Diğer noktaların herhangi birinde kuvvet bileşeni yoktur. Levha üzerinden Frekans Tepki Fonksiyonları alınmış ve dinamik tahrik kuvveti nedeniyl oluşan titreşimler hesaplanmıştır. Bu veriler kullanılarak gerekli işlemlerden sonra, belirlenen 12 nokta üzerindeki kuvvet dağılımı Şekil 4.6'daki gibi hesaplanmıştır:



Şekil 4.6: Yapı Üzerindeki Noktalara Ait Kuvvet Dağılımı

Görüldüğü gibi sadece 2 no'lu noktada bir kuvvet bileşeni bulunmuş, diğer noktaların hiç birinde kuvvet bulunmamıştır. 2 no'lu noktadaki tepe 10 Hz frekanslı sinüs sinyaline ait kuvvettir. Mavi ile çizilen hesaplanan grafik üzerine kırmızı ile de gerçek kuvvet çizilmiştir. 2 no'lu koordinattaki karşılaştırma daha ayrıntılı bir biçimde Şekil 4.7'de verilmiştir.

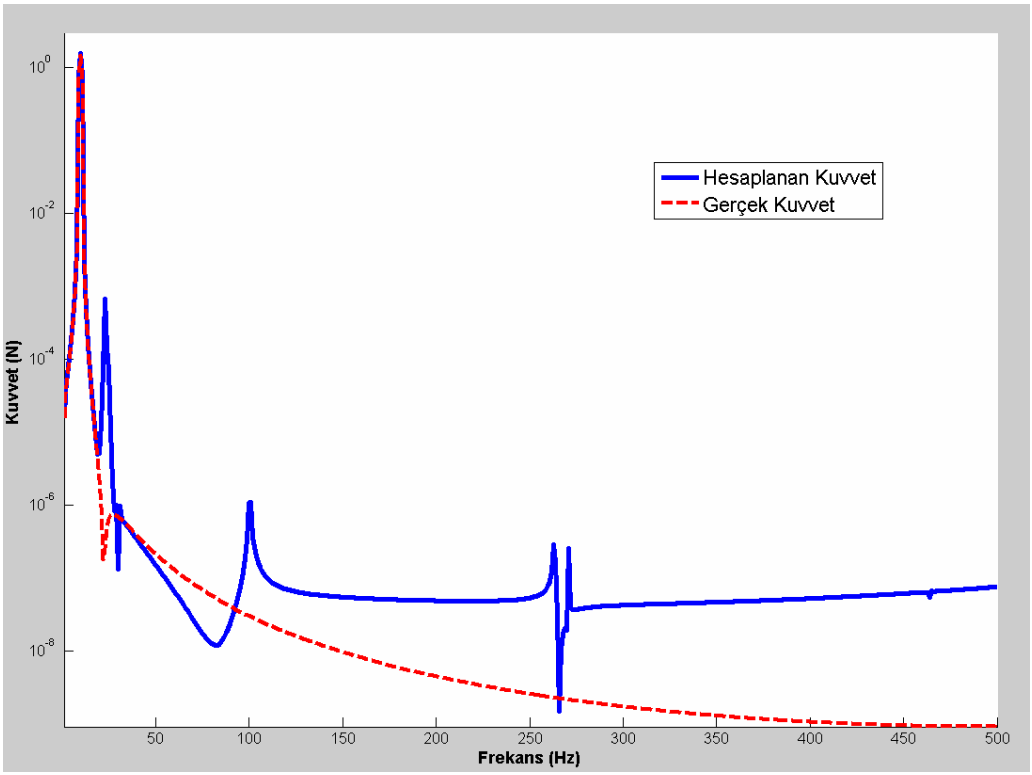


Şekil 4.7: 2 no'lu Noktadaki Gerçek ve Hesaplanan Kuvvet

Şekil 4.7'de verilen ayrıntılı sonuçtan da görüleceği gibi hesaplanan kuvvet gerçek kuvvet ile karşılaştırıldığında bulunan sonucun yüksek doğruluğa sahip olduğu

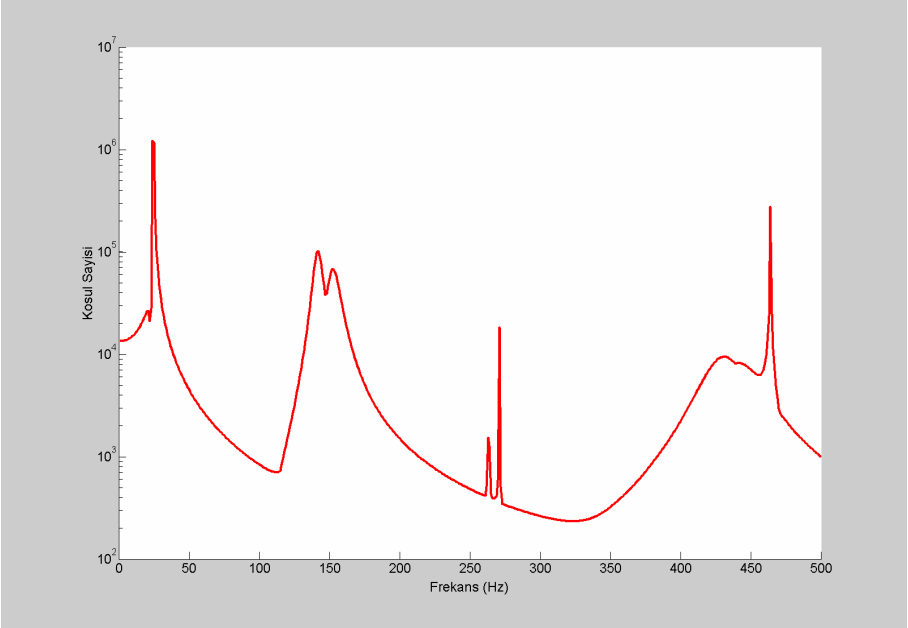
görülmektedir. 10 Hz'deki tepeye ait küçük genlik farkı dışında iki spektrum 500 Hz aralığı boyunca neredeyse aynı bulunmuştur.

Karşılaştırmayı daha ayrıntılı bir biçimde yapabilmek amacıyla kuvvet genliği eksenine lineer olarak değil de logaritmik olarak bakılabilir. Bu durumda gerçek kuvvet ve hesaplanan kuvvet arasındaki fark daha net görülebilecektir. Şekil 4.8'de iki kuvvet arasındaki karşılaştırma, y ekseni logaritmik ifade edilerek gösterilmiştir.



Şekil 4.8: Gerçek ve Hesaplanan Kuvvetin Logaritmik Eksende Karşılaştırılması

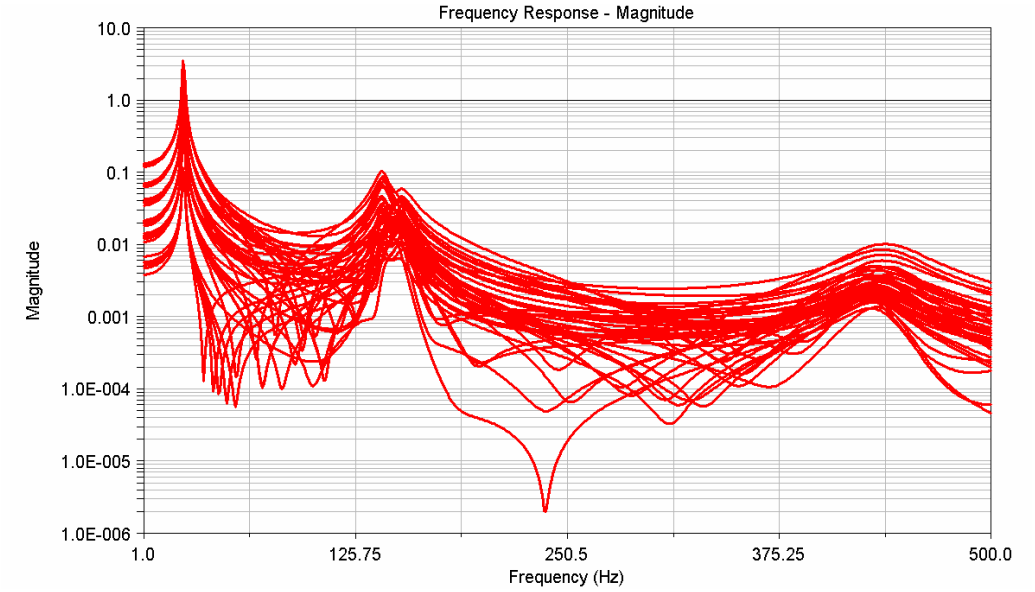
Karşılaştırma, logaritmik y ekseni kullanılarak yapıldığında, ilk bakışta aradaki uyumun çok da fazla olmadığı düşünülebilir. Ancak iki sonucun birbirinden farklılaşmaya başladığı bölgenin 10^{-6} N mertebesinde olduğu ve bu değerin ihmal edilebilecek kadar küçük olduğu göz önünde bulundurulmalıdır.



Şekil 4.9: FTF Matrisinin Koşul Sayısının Frekans ile Değişimi

Şekil 4.8'deki grafikte, hesaplanan kuvvette görülen ama gerçekte bulunmayan tepeler dikat çekicidir. Bunların neden oluştuğunu açıklayabilmek için kuvvet belirleme işleminde kullanılan FTF matrisinin her bir frekans değerine ait koşul sayısı hesaplanmıştır. Şekil 4.9'da gösterilen Koşul Sayısı – Frekans grafiğine bakıldığında kuvvet spektrumunda görülen tepelerin bu yeni grafikteki frekans noktalarında da mevcut olduğu görülmüştür. Koşul Sayısı – Frekans grafiğine bakıldığında aynen kuvvet spektrumunda olduğu gibi yaklaşık olarak 25 Hz, 120 Hz, 270 Hz ve 470 Hz civarlarında genel eğilimi bozacak tepelere rastlanmıştır. Daha önce Bölüm 3'te de bahsedildiği gibi koşul sayısı bir matrisin tekil değerlerinin en büyüğü ile en küçüğünün oranıdır ve bu oranın yüksek olması tekil değerlerin birbirlerinden çok farklı olduğuna, bir başka deyişe de matrisin lineer bağımlı olduğuna işaret eder. Böyle bir matris kullanılarak çözülebilecek denklem sayısı düşük olacaktır. İşte bu yüzden, grafiğin tam da bu noktalarına karşılık gelen frekans değerlerinde yeterince hassas olmayan sonuçlar bulunabilmektedir.

FTF matrisinin koşul sayılarının hangi frekanslarda daha yüksek çıktığının belirlenmesi, hem yapı hakkında hem de kuvvet belirleme yönteminin mantığı hakkında fikir verici olacaktır. Bu durumu yapıdan alınan FTFler üzerinden incelemek amacıyla levha üzerindean alınan FTFlerin hepsi üst üste çizdirilmiş ve Şekil 4.10'da gösterilmiştir.



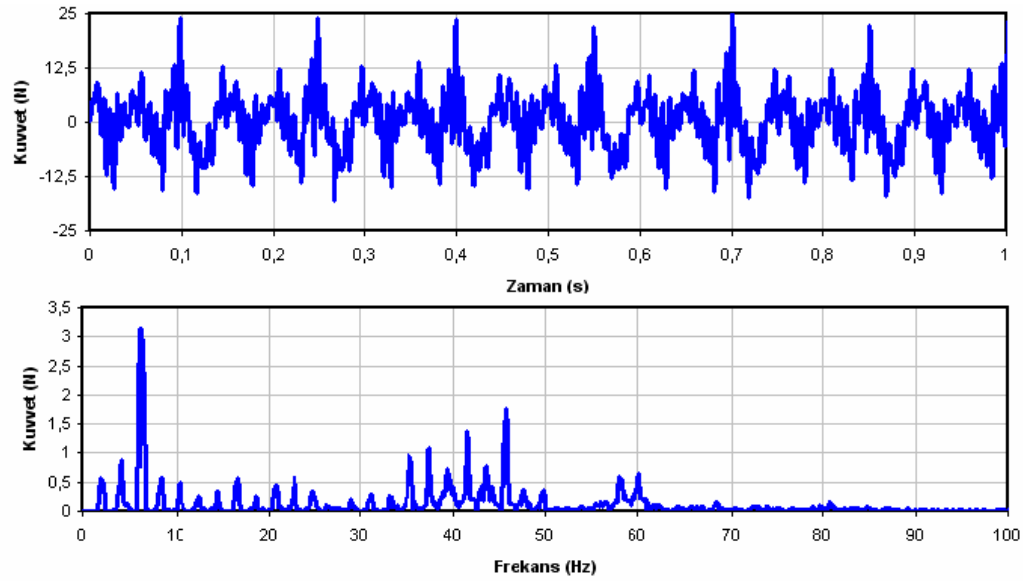
Şekil 4.10: Yapı Üzerinden Alınan FTFlerin Bir Arada Gösterilmesi

Şekil 4.10'dan da açıkça görülebildiği gibi FTF Matrislerine ait koşul sayılarının yüksek olduğu, yani matrislerin lineer bağımlı olduğu frekanslar yapıya ait mod ve antirezonans frekanslarıdır. Tam da bu noktalarda matrislerin düşük koşul sayısına sahip olmaları anlaşılabilir bir durumdur. Çünkü bilindiği üzere, bir yapının herhangi bir frekanstaki hareketi o yapıya ait tüm modların etkisinin toplamı şeklinde ortaya çıkmaktadır. Doğal frekans civarında ise bir modun hareketi diğerlerine nazaran çok baskın hale gelmekte ve hatta bu frekanstaki hareketi tamamen kontrol etmektedir. Bu da o frekanstaki FTF matrisinin rankının düşmesi anlamına gelmektedir.

Sonuç olarak, yapının doğal frekanslarına isabet eden bölümlerde çok ufak da olsa farklılıklar olmakla birlikte yapıya uygulanan gerçek kuvvet ve hesaplanan kuvvet birbirlerini sağlamaktadır.

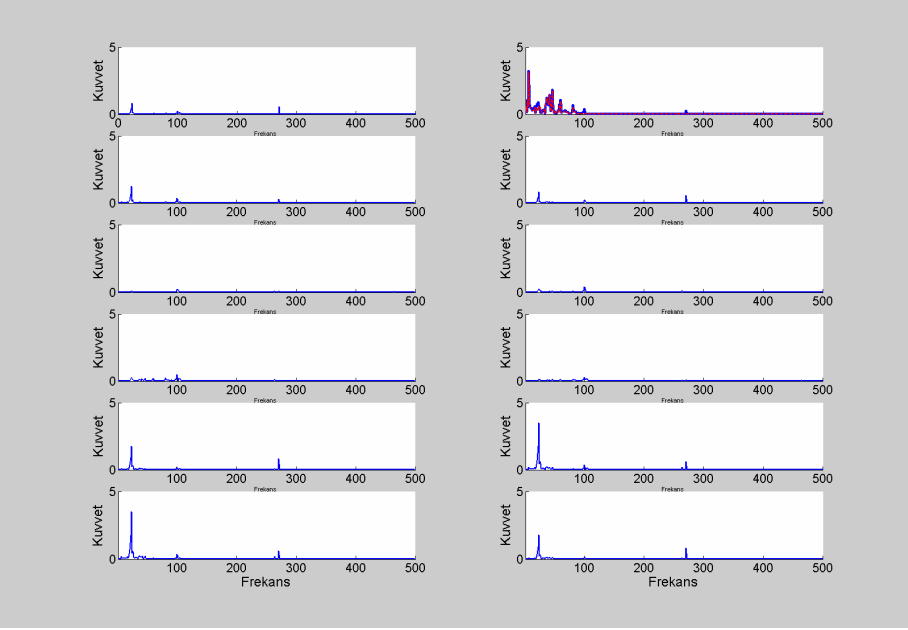
4.4.2.2. Periyodik Kuvvet

Bu bölümde levhanın 2 no'lu noktasına periyodik bir kuvvet uygulanmıştır. Periyodik kuvvet sinyali, yapıyı sadece bir frekansta değil birden çok frekansta uyarabilmek için seçilmiştir. Bu sinyal kullanılarak yapı geniş bir frekans aralığı boyunca uyarılabilmektedir. Örnek bir periyodik kuvvet sinyali ve buna ait Fourier Spektrumu Şekil 4.11'de verilmiştir.



Şekil 4.11: Bir Periyodik Kuvvet Sinyalinin Zamana ve Frekansa Bağlı Gösterimi

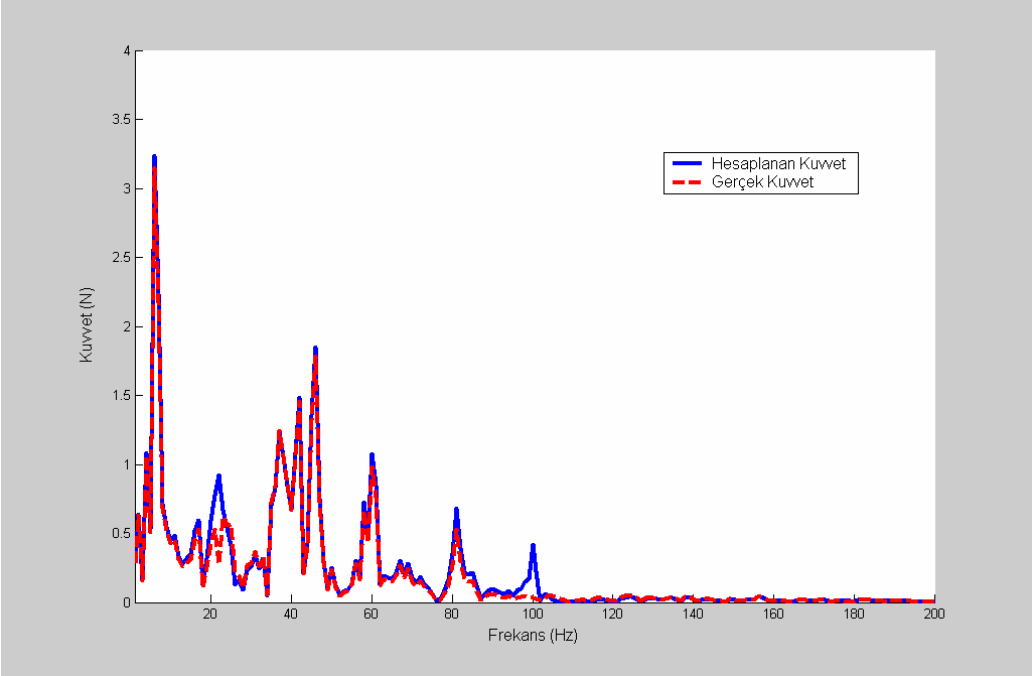
Gerekli işlemlerden sonra 12 noktada hesaplanan kuvet dağılımı Şekil 4.12'de gösterilmektedir. Şekilde, hesaplanan kuvvetler mavi renkte gösterilirken yapıya uygulanan gerçek kuvvet ise kırmızı renkle çizilmiştir.



Şekil 4.12: Yapı Üzerindeki Noktalara Ait Kuvvet Dağılımı

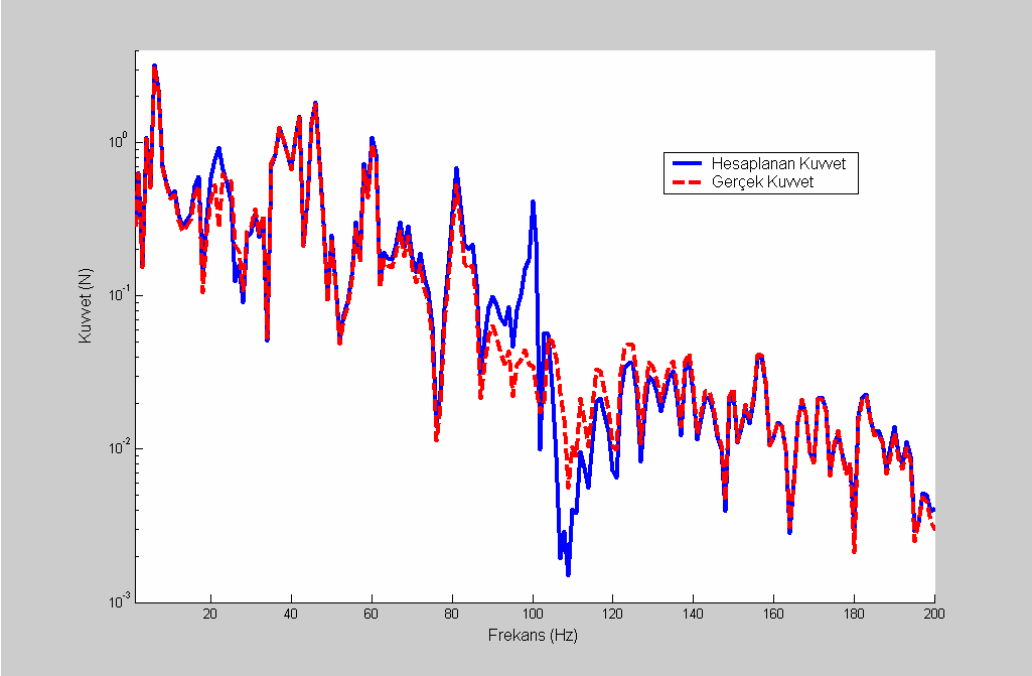
Kuvvetin uygulandığı 2 no'lu noktaya ait grafikte gerçek kuvvet ve hesaplanan kuvvet uyumlu görünmektedir. Diğer noktalara ait grafiklerde "0" kuvvet görülmesi beklenirken, bazı bölgelerde kimi tepeler dikkat çekmektedir. Şekil 4.9'da verilen

FTF Matrisinin koşul sayısı ile değişimi grafiğine bakıldığında 25 Hz civarında FTF matrisine ait koşul sayısının oldukça yüksek olduğu göze çarpmaktadır. Bu da gerçekte var olmadığı halde varmış gibi hesaplanan kuvvetlerin neden görüldüğünü açıklamaktadır. Değişik noktalarda görülen bu sayısal kaynaklı problemler dışında, ikinci noktada hesaplanan kuvvetin gerçek kuvvet ile yüksek uyum gösterdiği de görülmektedir. Bu noktaya ait kuvvet belirleme sonucu Şekil 4.13'te daha ayrıntılı olarak verilmiştir.



Şekil 4.13: 2 no'lu Noktadaki Gerçek ve Hesaplanan Kuvvet

Şekil 4.13'te de görüldüğü gibi bu noktadaki kuvvet doğru bir şekilde hesaplanabilmiştir. Frekans spektrumunun değişik bölümlerindeki genlik farkından dolayı çok net olarak görülemeyen bölümleri de inceleyebilmek amacı ile kuvvet eksen logaritmik hale getirilirse karşılaştırma daha doğru bir şekilde yapılabilir. Gerçek kuvvet ile hesaplanan kuvvetin logaritmik eksen kullanılarak karşılaştırılması Şekil 4. 14'te yapılmaktadır.



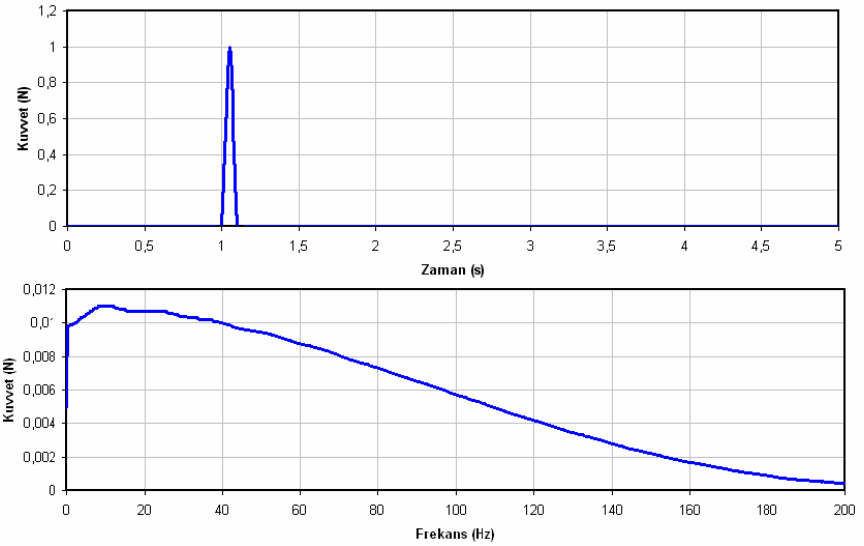
Şekil 4.14: Gerçek ve Hesaplanan Kuvvetin Logaritmik Eksende Karşılaştırılması

Şekil 4.14, hesaplanan kuvvetin gerçek kuvvet ile oldukça iyi bir uyum içerisinde olduğunu göstermektedir. 200 Hz'e kadar verilen sonuçlara göre levha üzerine uygulanan rastgele kuvvet de doğru bir şekilde tespit edilebilmiştir.

4.4.2.3. Darbe Kuvveti

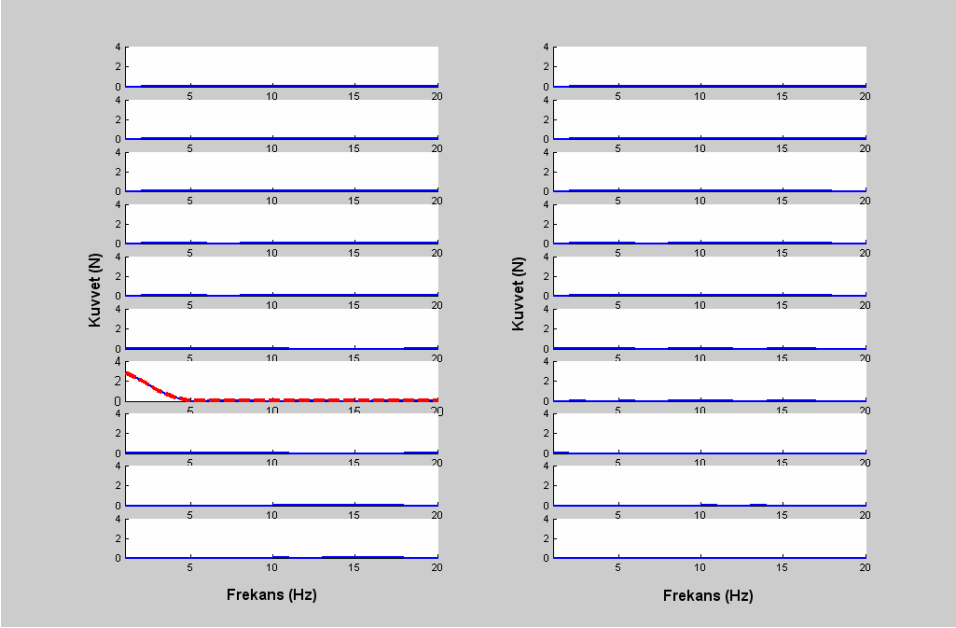
Levha sayısal modeli üzerindeki bir noktaya darbe şeklinde bir kuvvet uygulanmış ve daha sonra bu kuvvet nedeniyle yapı üzerinde oluşan titreşimler ivme ölçümleri ile belirlenmiştir. Kuvvet belirleme metodu kullanılarak, darbe kuvvetinin frekans spektrumu tespit edilmeye çalışılmış ve en başta girilen darbe fonksiyonu ile karşılaştırılarak metodun doğruluğu sınanmıştır.

Yapıya uygulanan darbe kuvveti yapıyı belirli bir frekans aralığı boyunca uyarmakta ve kuvvetin genliği bir frekanstan sonra sıfıra ulaşmaktadır. Tipik bir darbe kuvvetinin zaman ve frekans spektrumu Şekil 4.15'de verilmektedir.



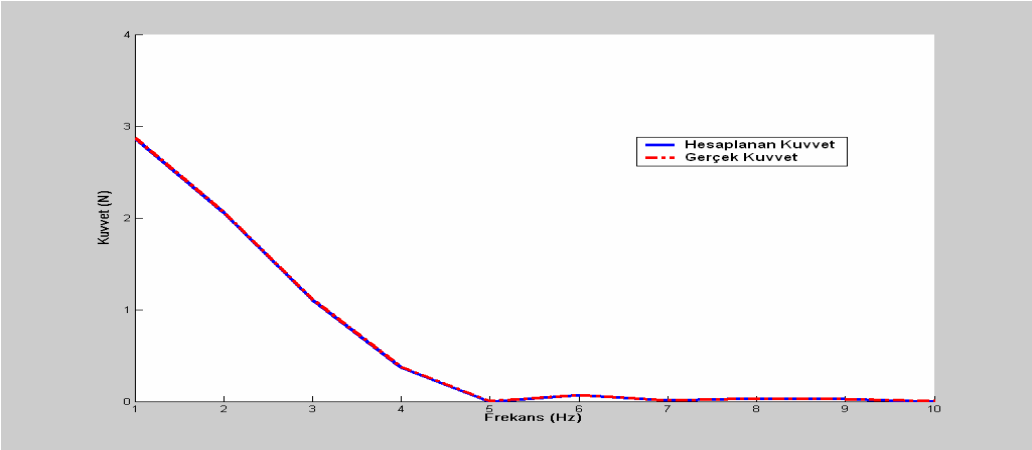
Şekil 4.15: Bir Darbe Kuvvetinin Zamana ve Frekansa Bağlı Gösterimi

Darbe kuvveti, 20 adet nokta üzerinde kuvvet olabileceği varsayımıyla belirlenmeye çalışılmış ve levhanın 13. noktası üzerine kuvvet uygulanmıştır. Şekil 4.16'da da görülebileceği gibi sinyalin uygulandığı 13. noktada kuvvet doğru bir şekilde hesaplanmış ve diğer noktalarda hiç kuvvet olmadığı tespit edilmiştir. Yapı üzerindeki kuvvet dağılımı Şekil 4.16'da verilmiştir.



Şekil 4.16: Yapı Üzerindeki Noktalara Ait Kuvvet Dağılımı

Sayısal analiz esnasında üzerine kuvvet uygulanmayan noktaların tümünde "0" kuvvet bulunurken, kuvvetin uygulandığı 13. noktada darbe kuvveti doğru bir şekilde belirlenmiştir. Daha ayrıntılı bir karşılaştırma için, bu kuvvet üzerindeki hesaplanan ve gerçek kuvvet grafikleri Şekil 4. 17'de verilmektedir.



Şekil 4.17: 13 No'lu Noktadaki Hesaplanan ve Gerçek Kuvvet

Şekil 4.17'nin de gösterdiği gibi 13 no'lu nokta üzerinde hesaplanan kuvvet, bulunması gereken kuvvet ile birebir çakışmaktadır. Bu durumda kuvvet belirleme metodunun sınanması işlemi, darbe kuvveti için de doğru sonucu vermiştir.

4.4.2.4. Cıvıltı (Chirp) Kuvvet

Sayısal çalışmanın bu bölümünde yapı üzerindeki bir noktaya cıvıltı sinyali şeklinde bir kuvvet uygulanmış ve yapı üzerinden alınan FTFler ile titreşim ölçümleri kullanılarak bu tahrik kuvveti tespit edilmeye çalışılmıştır. Ölçümler, yapı üzerindeki 12 noktada yapılmış ve her biri üzerinde kuvvet olabileceği varsayımıyla hesaplamalar yapılmıştır. Öte yandan kuvvet sadece 2 no'lu koordinata uygulanmıştır.

Cıvıltı (chirp) sinyali, frekansı zamanla artan veya azalan bir sinyal tipidir. Cıvıltı sinyal, frekansının artım tipine göre Doğrusal Cıvıltı veya Üstel Cıvıltı olarak ikiye ayrılabilir.

Doğrusal Cıvıltı sinyalinde, anlık frekans zamana göre doğrusal olarak değişmekte ve (4.10) denklemi ile verilmektedir:

$f(t)=f_0+kt$ (4.10)

4.10 denklemindeki f_0, sinyalin başlangıç frekansını ve k ise frekans artım oranını göstermektedir. Buna göre, ilgili frekans bağıntısına sahip bir sinüzoidal sinyalin zamana bağlı formulü (4.11) denklemi ile verilmiştir:

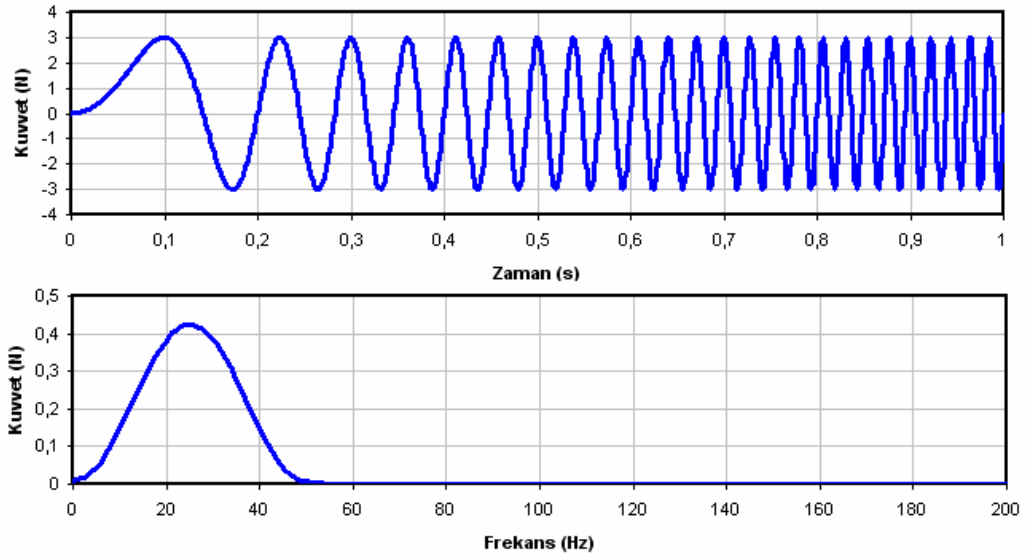
$$x(t)=\sin\left(2\pi\int_0^t f(t')dt'\right)=\sin\left(2\pi\left(f_0+\frac{k}{2}t\right)t\right) \tag{4.11}$$

Üstel Cıvıltı Sinyalinde ise, anlık frekans ile zaman arasında geometrik bir ilişki bulunur. Bir başka deyişle, sinyalin dalga formu üzerinde rastgele seçilen t_1 ve t_2 noktaları arasındaki zaman aralığı sabit kaldıkça bu noktalara ait frekansların oranları $f(t_1)/f(t_2)$ de hep sabit kalacaktır. Üstel Cıvıltı Fonksiyonunda anlık frekansın ve sinyalin denklemleri sırasıyla (4.12) ile (4.13) denklemleri ile verilmiştir.

$$f(t)=f_0k^t \tag{4.12}$$

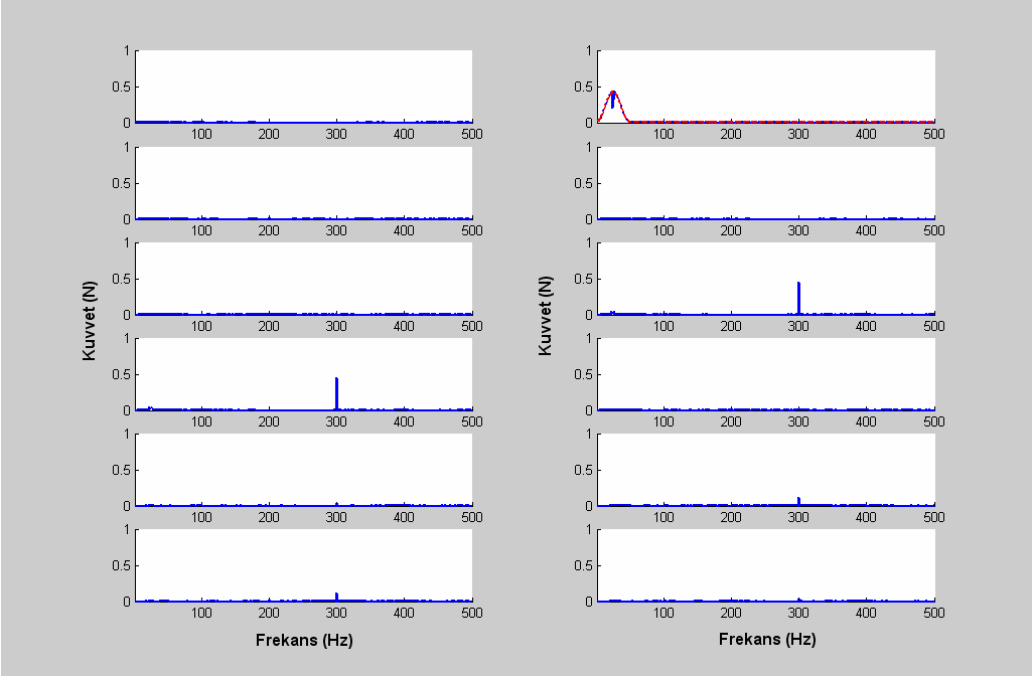
$$x(t)=\sin\left(2\pi f_0\int_0^t k^{t'}dt'\right)=\sin\left(\frac{2\pi f_0}{\ln(k)}\left(k^t-1\right)\right) \tag{4.13}$$

Sayısal denemede yapının üzerine sinüzoidal bir cıvıltı sinyali uygulanmış ve bu kuvvet belirlenmeye çalışılmıştır. Tipik bir sinüzoidal cıvıltı sinyali ve bu sinyale ait Fourier Spektrumu Şekil 4.18'de gösterilmektedir.



Şekil 4.18: Bir Sinüzoidal Cıvıltı Sinyalinin Zamana ve Frekansa Bağlı Gösterimi

Kuvvet Belirleme İşlemi sonucunda yapı üzerindeki her koordinatta bulunan kuvvetler Şekil 4.19'da verildiği gibidir.

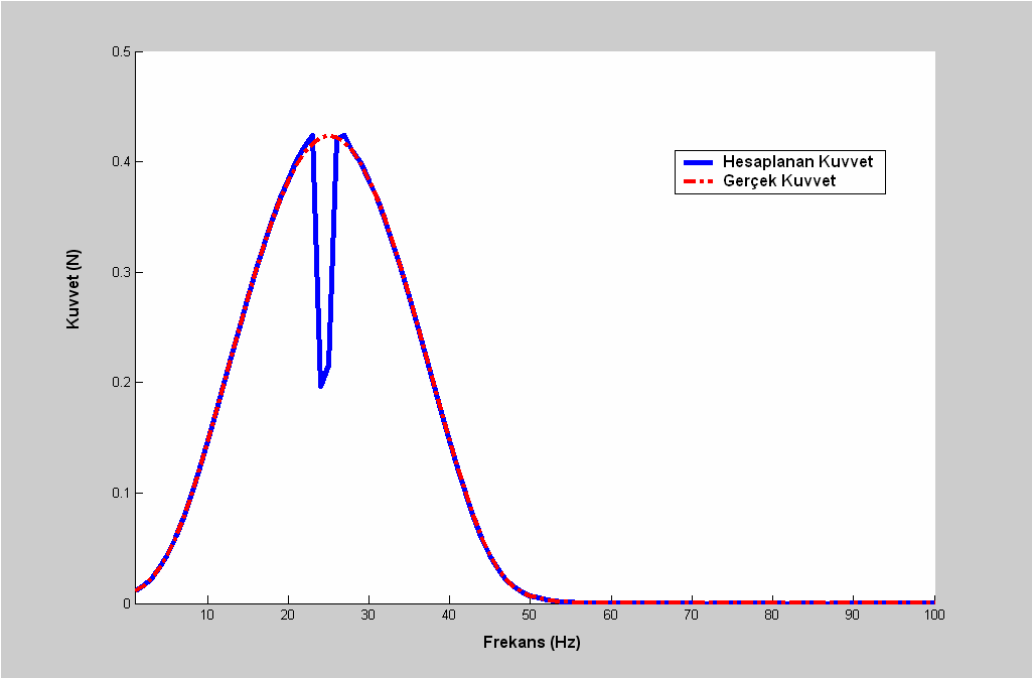


Şekil 4.19: Yapı Üzerindeki Noktalara Ait Kuvvet Dağılımı

Şekil 4.19, 2 numaralı koordinattaki hesaplanan kuvvetin bu noktaya gerçekten uygulanan kuvvet ile birebir örtüştüğünü göstermektedir. Herhangi bir kuvvetin uygulanmadığı diğer koordinatlarda ise beklendiği üzere genellikle hiç kuvvet

bulunmazken, kimi koordinatlarda 300 Hz civarında bazı düzensizlikler görülmüştür. Daha önce Şekil 4.9'de verilen FRF Matrisinin Koşul Sayısının Frekansa Göre değişimi grafiği incelendiğinde bu frekans civarında koşul sayısının oldukça yükseldiği yani matrisin lineer bağımlılığa doğru gittiği görülmektedir. Dolayısıyla buralarda elde edilen sonuçların güvenilmez olabileceği zaten bilinmektedir. Kuvvet dağılımının genel karakteristiğine uygun olmayan bu sapmalar matrisin bu frekansta rankının düşük olmasından kaynaklanmaktadır.

2 No'lu koordinatta hesaplanan kuvvetin daha ayrıntılı incelemesi ise Şekil 4.20 üzerinde yapılmıştır.



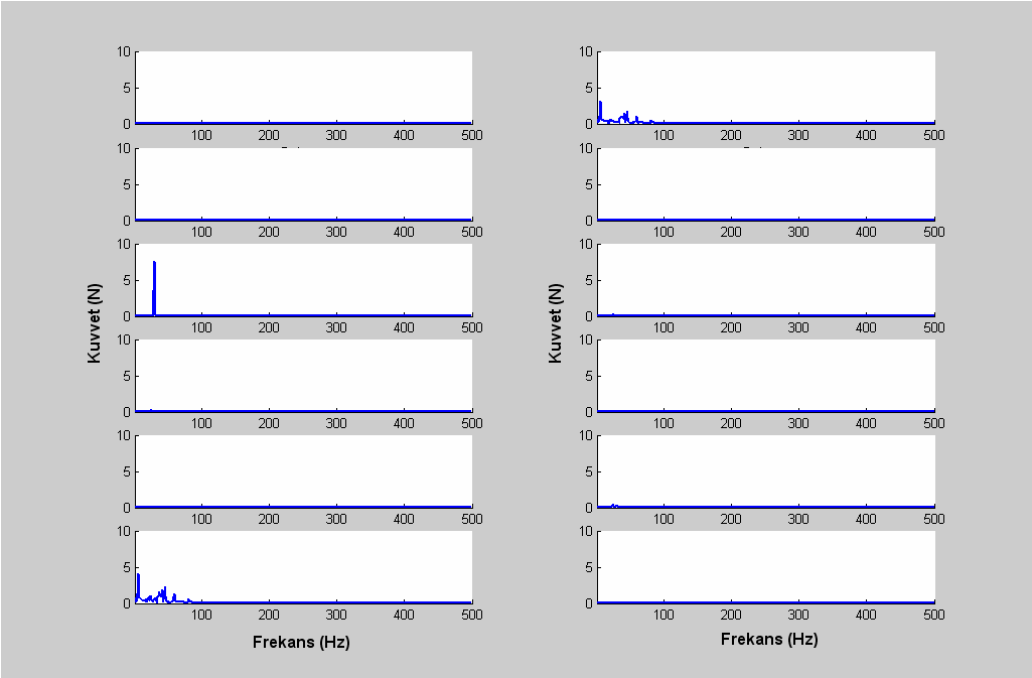
Şekil 4.20: 2 No'lu Noktadaki Gerçek ve Hesaplanan Kuvvet

Şekil 4.20, hesaplanan kuvvetin yapı üzerine gerçekten uygulanan kuvvet ile büyük ölçüde birbirine benzediğini göstermekle birlikte 25 Hz civarında gerçek kuvvette bulunmayan bir sıçrama görülmektedir. Şekil 4.9'da verilen Koşul sayısının frekansa göre değişimi grafiğine bir kez daha müracaat edilirse, bu frekanstaki yanlışlığın koşul sayısındaki yükselişten kaynaklandığı görülür. Genel eğilimin dışında kalacak şekilde hesaplanan bu kuvvetin matrisin bu frekanstaki rankının çok düşük olmasından kaynaklandığı açıkça görülmektedir.

Görüldüğü gibi kuvvet belirleme metodu, sayısal durumda cıvıltı tipi sinyal için de doğru sonuç vermektedir.

4.4.2.5. Birden Fazla Koordinattan Tahrik Durumunun İncelenmesi

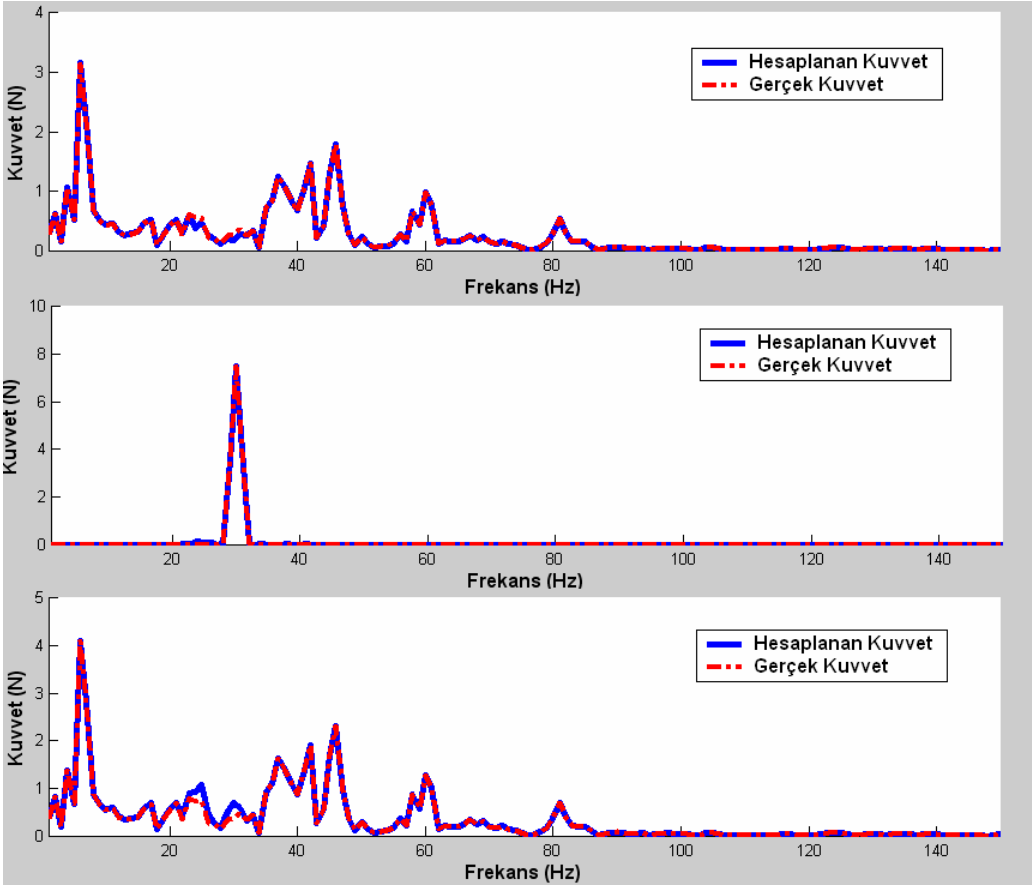
Bu bölümde yapı üzerinde belirlenen noktalardan sadece birine değil, birkaçına tahrik uygulanmakta ve tahrik kuvvetlerinin her biri doğru olarak bulunmaya çalışılmaktadır. Sayısal levha modelinin ikinci ve on birinci noktalarına periyodik kuvvetler, beşinci noktasına ise sinüzoidal kuvvet uygulanmıştır. Daha sonra toplam on iki noktada kuvvet olabilir varsayımıyla hareket edilerek tüm noktalardaki kuvvetler belirlenmeye çalışılmıştır. Bu çalışmaya ait sonuç Şekil 4.21'de gösterilmektedir. Görüldüğü üzere, ikinci beşinci ve on birinci noktalarda bulunması gereken kuvvetler doğru bir şekilde hesaplanmış, kuvvet uygulanmayan diğer koordinatlarda ise herhangi bir bileşen bulunmamıştır.



Şekil 4.21: Yapı Üzerindeki Noktalara Ait Kuvvet Dağılımı

Yapılan işlem sonucu, kuvvetlerin yerleri doğru olarak belirlenmiş, kuvvet uygulanmayan noktalarda herhangi bir kuvvet bulunmamıştır. Kuvvetlerin uygulandığı noktalarda elde edilen sonuçların doğruluğunu kontrol etme amacıyla bu noktalara uygulanan gerçek kuvvetler ve hesaplanan kuvvetler üst üste çizdirilerek

daha ayrıntılı karşılaştırma yapılmıştır. İkinci, beşinci ve on birinci noktalara ait sonuçların daha ayrıntılı gösterimi Şekil 4.22'de verilmiştir.



Şekil 4.22: Hesaplanan ve Gerçek Kuvvetin Ayrıntılı Karşılaştırılması

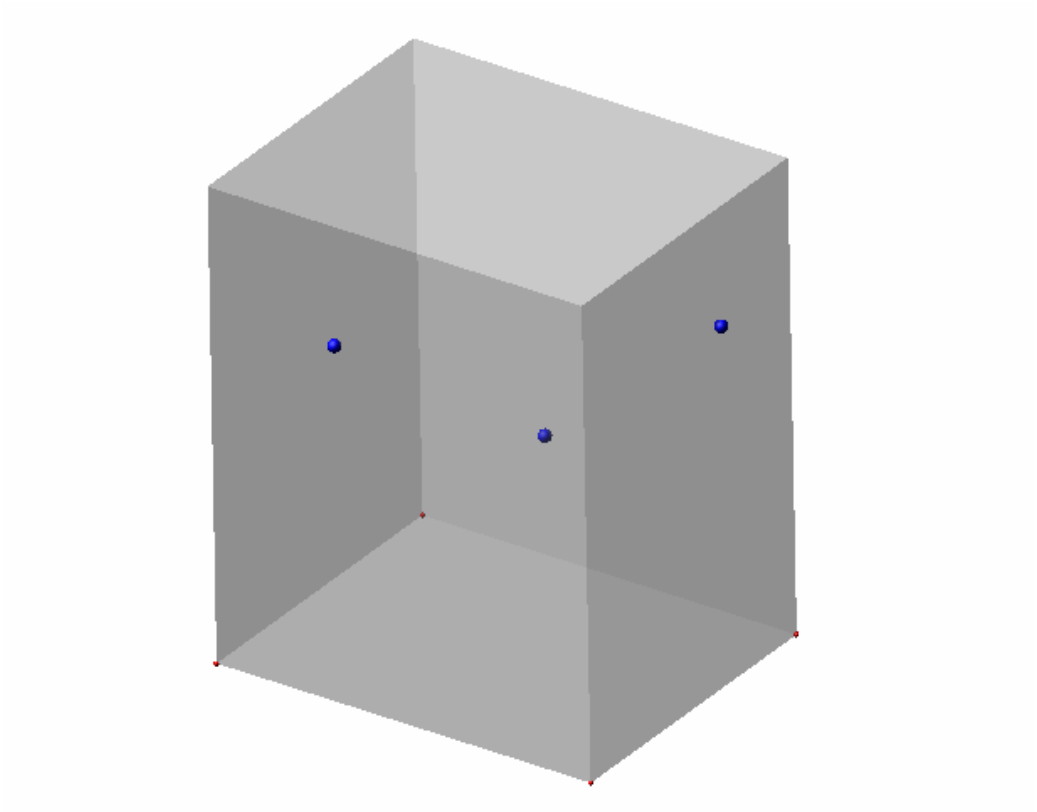
Her üç noktada hesaplanan kuvvet de bu koordinatlara gerçekten uygulanan kuvvetlerle çok büyük ölçüde örtüşmektedir. Bu durumda, kuvvet belirleme metodunun çoklu tahrik durumunda da düzgün bir şekilde çalıştığı rahatlıkla söylenebilir.

4.5. Kutu Üzerindeki Sayısal Çalışmalar

4.5.1. Kutu Sayısal Modeli

Kuvvet belirleme yöntemi ile yapılan diğer sayısal çalışma Şekil 4.23'te gösterilen bir kutu üzerinde gerçekleştirilmiştir. Yapı, üst kenarı açık olacak şekilde modellenmiştir. Bu parça ilk olarak I-DEAS'ta çizilmiş ve kabuk tipi elemanlar

kullanılarak sonlu elemanlara bölünmüştür. Sonlu elemanlar modeli oluşturularak yapının kütle ([M]), sönüm ([C]) ve katılık ([K]) matrisleri elde edilmektedir. Bu matrisler gerçek yapının özelliklerini temsil etmektedirler. Sonlu elemanlar modeli oluşturulduktan sonra titreşim analizi yapılarak özdeğer problemi çözülmüş ve yapının doğal frekansları elde edilmiştir. Daha sonra bu parça ADAMS-Flex modülü aracılığı ile ADAMS programına aktarılmıştır. Alt kenarındaki köşelerinden yere sabitlenen kutunun bir noktasından kuvvet uygulanmakta en başta bilinmediği farzedilen bu kuvvet, ölçülen tepkilerin yardımıyla bulunmaya çalışılmaktadır. Yapının 32x32 boyutundaki FTF matrisi hesaplanmış ve bu 32 noktadaki kuvvet dağılımı bulunmaya çalışılmıştır.



Şekil 4.23: ADAMS'ta Kullanılan Sayısal Kutu Modeli

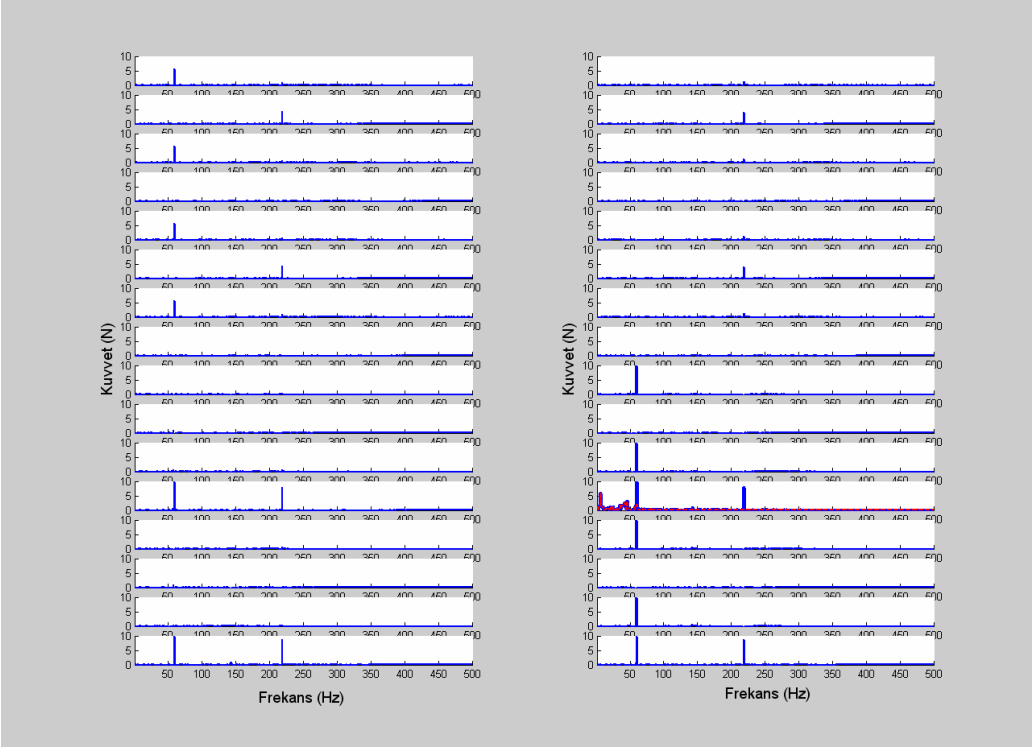
4.5.2. Kuvvet Belirleme Uygulamaları

Aynen levha örneğinde olduğu gibi bu model üzerine değişik tipte kuvvetler uygulanmış ve daha sonra bu kuvvetler tespit edilmeye çalışılmıştır. Ancak, benzer verileri tekrarlamaktan kaçınmak adına burada sadece geniş bir frekans bandında

bileşenleri bulunan periyodik kuvvete ait sonuçlar sunulmuştur. Ayrıca birden fazla koordinattan tahrik edilme durumu da incelenmiştir.

4.5.2.1. Periyodik Kuvvet

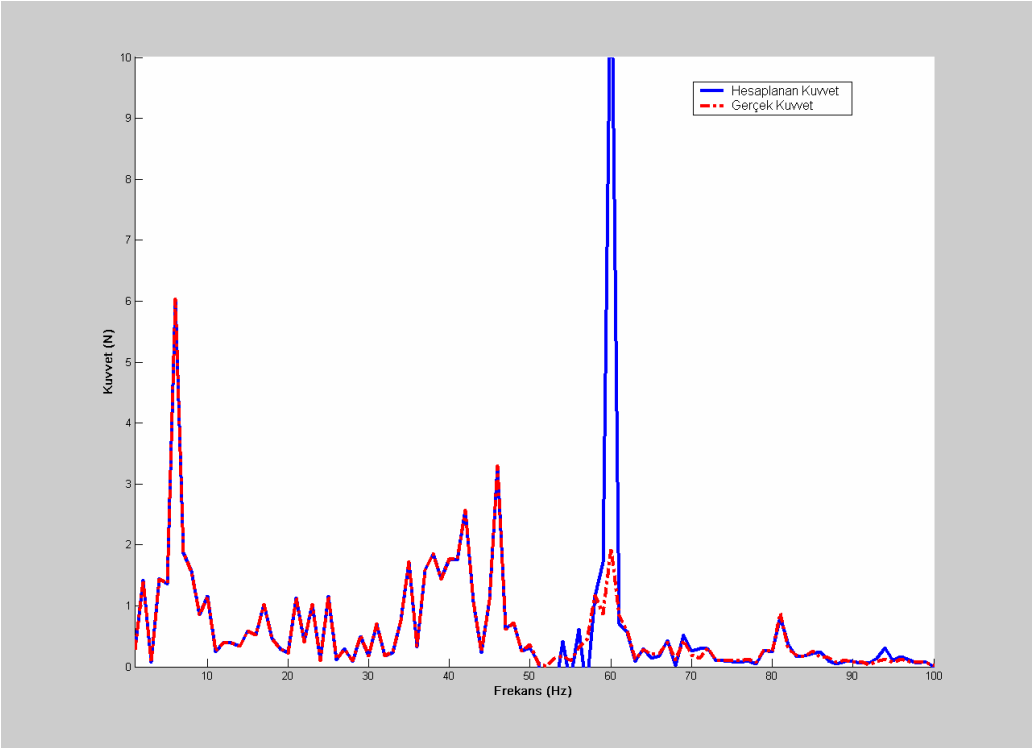
Kutunun sayısal modeli üzerindeki yirmi dördüncü noktaya periyodik bir kuvvet uygulanmış ve bu tahrik sonucu yapı üzerinde oluşan titreşim seviyeleri belirlenmiştir. Yapı üzerinden alınan 32x32 boyutundaki FTF matrisi ile titreşim seviyeleri beraber kullanılarak tahrik kuvvetleri hesaplanmış ve en baştan bilinen değerlerle karşılaştırılmıştır. 32 adet koordinatta da kuvvet olabileceği varsayımı altında Kuvvet Belirleme Metodu çalıştırıldığında bulunan sonuç Şekil 4.24'te verilmiştir. Bu şekilde, hesaplanan kuvvetler mavi renkle, yapıya uygulanan gerçek kuvvet ise kırmızı renkle gösterilmiştir.



Şekil 4.24: Kutu Üzerinde Hesaplanan Kuvvet Dağılımı

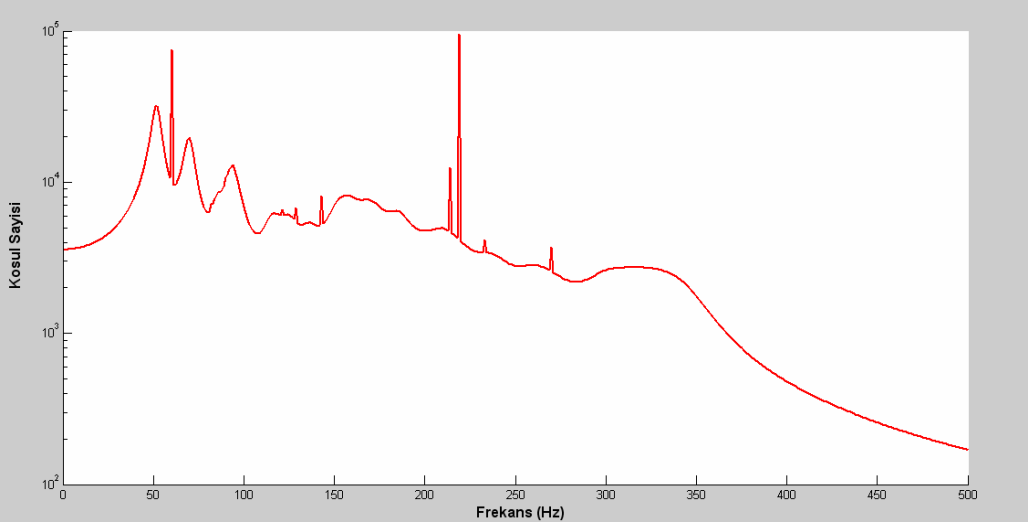
Görüldüğü gibi kuvvetin uygulandığı yirmi dördüncü noktada gerçekten de bir periyodik kuvvet sinyali bulunmuştur. Bunun dışındaki herhangi bir noktada sürekli bir kuvvet hesaplanmamıştır. Ancak, hem yirmi dördüncü noktada hem de diğer noktaların bazılarında 50 Hz ve 220 Hz civarında birtakım tepeler görülmektedir. İlk

olarak, yirmi dördüncü noktada hesaplanan ve bu noktaya uygulanan gerçek kuvvetin 100 Hz'e kadar verilen daha ayrıntılı karşılaştırılması Şekil 4.25'te sunulmuştur.



Şekil 4.25: 24 No'lu Noktada Hesaplanan ve Gerçek Kuvvetin Karşılaştırılması

Hesaplanan kuvvet ve gerçek kuvvet 60 Hz'deki fark dışında neredeyse üst üste seyretmektedirler. Bu frekansta genel eğilimin dışında bu büyüklükte bir bileşenin hesaplanması koşul sayısının bu bölgede çok yüksek değerler almış olabileceğine akla getirmektedir. Kutunun sayısal modeline ait FTF matrisinin Koşul Sayısı-Frekans grafiği incelendiğinde 60 Hz civarında matrisin koşul sayısının çok büyük olduğu görülmüştür. Bu grafik Şekil 4.26'da verilmiştir.



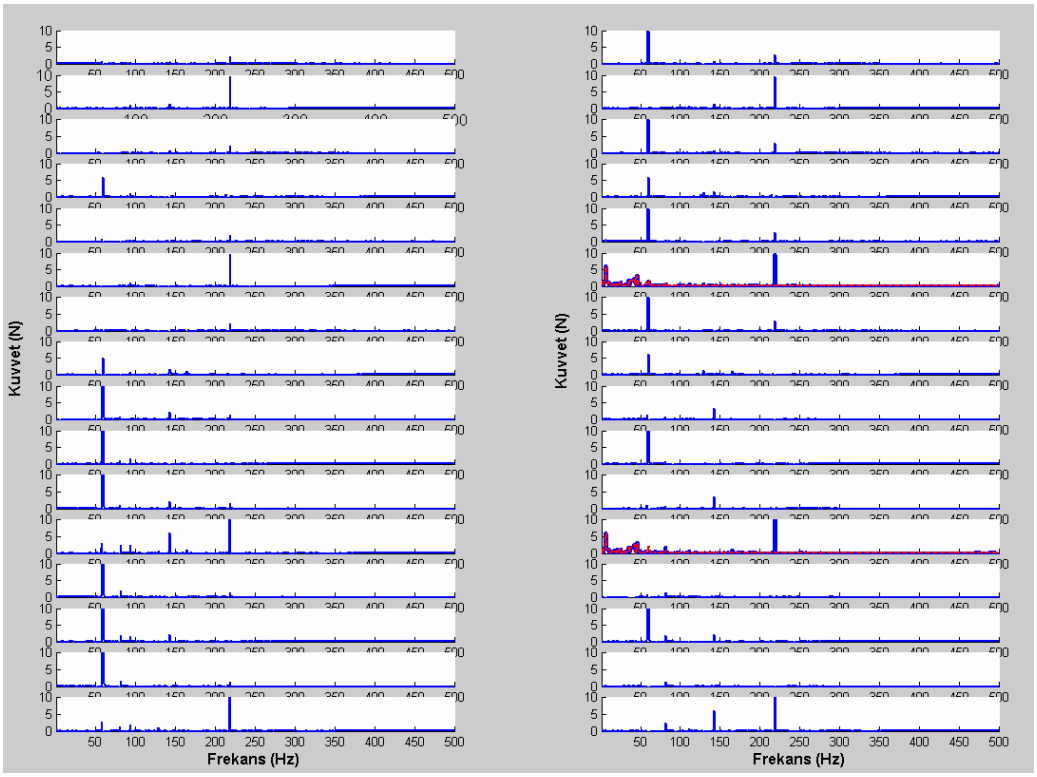
Şekil 4.26: Kutuya Ait FTF Matrislerinin Koşul Sayısının Frekansa Göre Değişimi

Tahmin edildiği üzere 60 Hz civarında koşul sayısında çok büyük artış göze çarpmaktadır. Bu durumda matrisin bu frekanstaki rankı çok düşük ve bu yüzden de çözülebilecek denklem sayısı düşüktür. Benzer şekilde 220 Hz'de de bir tepe vardır ve 32 noktanın bazılarında görülmemesi gerektiği halde bulunan kuvvet bileşenleri bu noktadaki rankın oldukça düşük olmasından dolayı hesaplanmaktadır.

60 ve 220 Hz bölgelerindeki münferit hatalar sayılmazsa kutu üzerinde periyodik kuvvet belirleme durumuna ait sonuçlar oldukça olumludur.

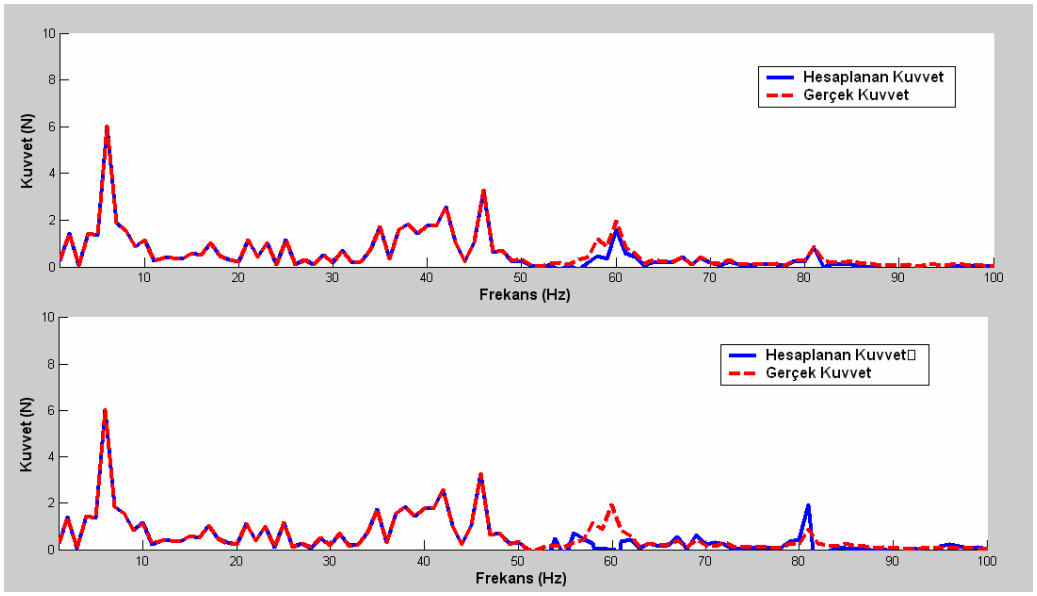
4.5.2.2. Birden Fazla Tahrik Durumunun İncelenmesi

Bu bölümde yapı üzerinde belirlenen noktalardan sadece birine değil, iki tanesine tahrik uygulanmış ve tahrik kuvvetlerinin her biri doğru olarak bulunmaya çalışılmıştır. Sayısal levha modelinin 12. ve 24. noktalarına periyodik kuvvetler uygulanmıştır. Daha sonra toplam otuz iki noktada kuvvet olabilir varsayımıyla hareket edilerek tüm noktalardaki kuvvetler belirlenmeye çalışılmıştır. Bu çalışmaya ait sonuç Şekil 4.27'de gösterilmektedir. Görüldüğü üzere, on ikinci ve yirmi dördüncü noktalarda bulunması gereken kuvvetler hesaplanmış, kuvvet uygulanmayan diğer koordinatlarda ise koşul sayılarının çok yüksek olduğu yani güvenilmez sonuçların alındığı 60 Hz ve 220 Hz civarı dışındaki yerlerde herhangi bir bileşen bulunmamıştır.



Şekil 4.27: Kutu Üzerinde Hesaplanan Kuvvet Dağılımı

Kuvvetlerin hesaplandığı on ikinci ve yirmi dördüncü noktalardaki durum ise ayrıntılı şekilde Şekil 4.28'de verilmiştir.



Şekil 4.28: 12. ve 24. Noktalarda Hesaplanan ve Gerçek Kuvvetin Karşılaştırılması

Görüldüğü üzere, kuvvetin uygulandığı noktalarda, hesaplanan kuvvet gerçek kuvvet ile neredeyse birebir uyumludur.

Yapı üzerine periyodik kuvvetin birden fazla noktadan sayısal olarak uygulandığı durumda da Kuvvet Belirleme Metodu ile kabul edilebilir sonuçlar bulunmaktadır.

5. KUVVET BELİRLEME YÖNTEMİNİN DENEYSEL UYGULAMALARI

5.1. Deney Düzeneği ve Ölçümler

Kuvvet Belirleme Yönteminin sayısal modeller üzerinde sınanmasından sonra bu bölümde de deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu bölümde sayısal modelleme programlarında oluşturulan modeller üzerinde değil gerçek yapılar üzerinde çalışılmıştır. Frekans Tepki Fonksiyonları ve dinamik tahrik altında yapıda oluşan titreşimler, seçilen bir yapı üzerinden deneysel olarak ölçülmüş ve bunlar kullanılarak tahrik kuvvetleri hesaplanmaya çalışılmıştır.

Kuvvet belirleme yönteminin deneysel uygulamaları bir adet L şekilli plaka ve bir çamaşır makinası gövdesinin yan paneli üzerinde gerçekleştirilmiştir. Yapılar üzerinde FTF ölçümleri yapılmış ve daha sonra bir tahrik kuvvetinin etkisi altında titreşim ivmeleri ölçülerek bu titreşimlere neden olan kuvvetler bulunmaya çalışılmıştır. Yapıların FTF'leri sarsıcı ya da modal çekiç kullanılarak ölçülmüş ve yapıya sinüzoidal, darbe, rastgele gibi kuvvetler uygulanarak bu kuvvetler tespit edilmeye çalışılmıştır.



Şekil 5.1: Bruel Kjaer Type 2035 Sinyal Analizörü (ve modal çekiç)

Deneysel çalışmalar boyunca her türlü ölçüm yapılırken Şekil 5.1'de gösterilen Bruel-Kjaer Type 2035 Sinyal Analizörü kullanılmıştır. Analizörün 4 adet kanalı bulunduğundan ve her bir ölçüm adımında kanallardan birine kuvvet transdüseri bağlandığından bir seferde sadece üç adet ölçüm alınabilmiştir. Bir başka deyişle, yapı üzerinde belirlenen tüm noktalardan ölçüm alabilmek için tekrarlı ölçümlerin yapılması gerekmiştir.

İvmeölçerlerle yapılan titreşim ölçümlerinin Fourier Dönüşümleri analizör yardımı ile hesaplanmıştır. Alınan titreşim ölçümlerinin zamana bağlı veri olarak kaydedilmesi ve daha sonra herhangi bir programda Fourier Dönüşümünün alınması da mümkün olmakla birlikte kullanılacak pencereleme işlemleri nedeniyle oluşabilecek genlik farklarından kaçınmak için Fourier Spektrumuna geçiş işlemi sinyal analizöründe yapılmıştır. Dolayısıyla hem FTFler hem de dinamik tahrik nedeniyle oluşan titreşimlerin frekans alanındaki karşılıkları sinyal analizörü kullanılarak ölçülmüş olmaktadır.

5.2. L Levha Üzerinde Yapılan Deneysel Çalışmalar

Deneysel bölümdeki çalışmaların ilki Şekil 5.2'de gösterilen L levha üzerinde gerçekleştirilmiştir.



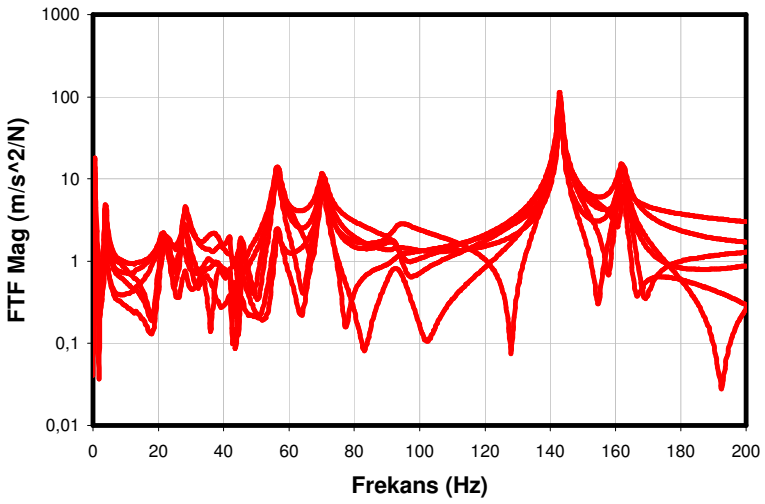
Şekil 5.2: L Şekilli Levha

Levha üzerinde sinüzoidal, rastgele ve darbe olmak üzere üç tip kuvvet belirlenmeye çalışılmıştır. Sonraki bölümlerde bu çalışmalara ait ayrıntılı bilgi verilmektedir.

5.2.1. Sinüzoidal Kuvvet

Çalışmanın bu bölümünde yapı üzerine modal sarsıcı ile sünüzoidal bir kuvvet uygulanmış ve daha sonra bu kuvvet bilinmiyormuş farzedilerek Kuvvet Belirleme Metodu ile hesaplanmaya çalışılmıştır. Sonuçta hesaplanan kuvvet yapıya uygulanan kuvvet ile karşılaştırılmış ve sonuçlar yorumlanmıştır.

İlk olarak yapı üzerinde altı adet ölçüm noktası belirlenmiştir. Yapı yumuşak bir zemin üzerinde dururken sarsıcı ile iki noktasından sarsılmış ve her bir durumda seçilen altı noktanın tümünden FTF'ler ölçülmüştür. Sarsıcının tahrik noktası değiştirilirken yapının pozisyonunun değiştirilmemesi için büyük çaba sarfedilmiştir. Çünkü daha önceki bölümlerde de belirtildiği gibi kuvvet belirleme metodu yapının hangi hali için uygulanacaksa, FTF'ler de o hale ait olacak şekilde ölçülmelidir. Toplamda 6x2 boyutunda bir FTF matrisi elde edilmiş ve bu matris ile çalışılmıştır. L Levha üzerinde ölçülen FRF'lerin bir kısmı toplu halde Şekil 5.3'te gösterilmiştir.

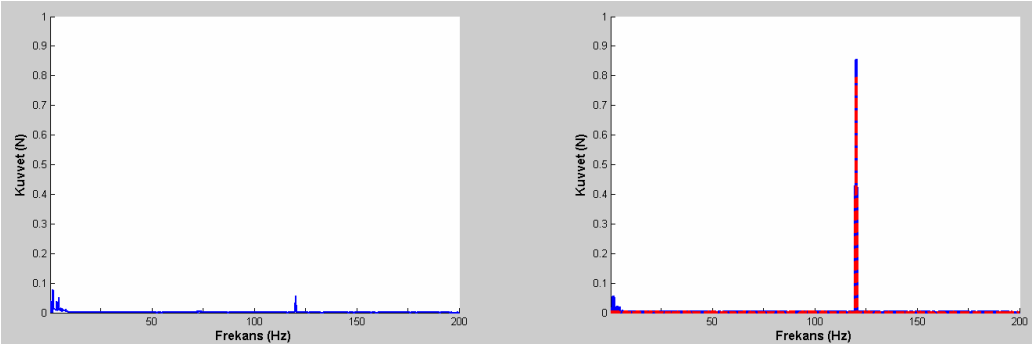


Şekil 5.3: L Levha üzerinde alınan Frekans Tepki Fonksiyonları

Frekans Tepki Fonksiyonu Matrislerinin oluşturulmasının ardından, sinyal analizöründe oluşturulan 120 Hz frekanslı bir sinüs sinyali yapı üzerine uygulanarak bu tahrik sonucu yapı üzerinde oluşan titreşimler altı noktadan ölçülmüştür. Yapı üzerinde sadece iki noktada kuvvet olabileceği kabulü altında yapıya uygulanan

kuvvetin yeri ve genliği bulunmaya çalışılmıştır. Bu durum, bilinmeyen iki adet değişkenin altı tane denklem kullanılarak çözülmesi demektir. Titreşim ölçümü sayısının ölçülen FTF sütunlarından fazla olması kasıtlı olarak gerçekleştirilen bir işlemdir.

Levhanın sadece 2 no'lu koordinatına kuvvet uygulanmıştır. Kuvvet Belirleme Metodunun ölçülen verilerle birlikte kullanılması sonucu bulunan kuvvet dağılımı Şekil 5.4'te gösterilmektedir. Bu şekilde mavi ile gösterilen sonuçlar hesaplanan kuvvetler, kırmızı ile gösterilen kuvvet ise yapıya uygulanan gerçek kuvvettir.



Şekil 5.4: Levha Üzerindeki 2 Noktada Belirlenen ve Gerçek Kuvetlerin Spektrumu

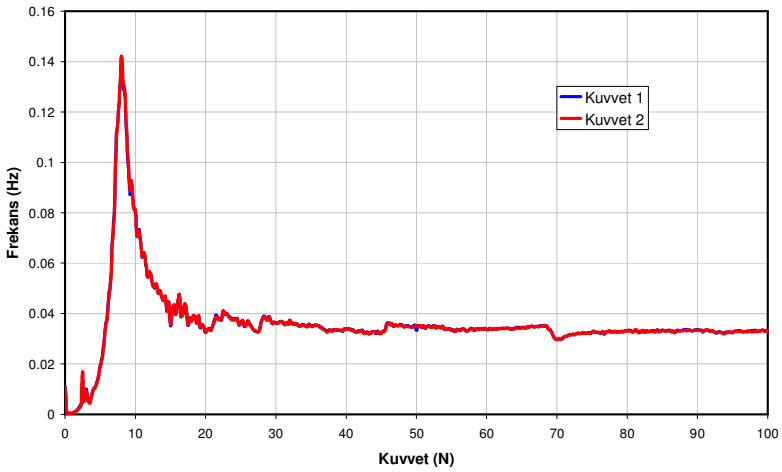
Görüldüğü gibi ikinci noktada bulunması gereken kuvvet küçük bir genlik farkına rağmen doğru bir şekilde hesaplanmıştır. Bununla birlikte diğer noktaya kuvvet uygulanmamış olmasına rağmen bu noktada da küçük bir kuvvet bileşeni hesaplanmıştır. Bu hatanın sebebi, yapı üzerinden ölçülen FTF'lerin deney şartlarından ileri gelen bazı nedenlerden ötürü parazitler içermesi olabilir. Sarsıcı ile yapı üzerine uygulanan kuvvetin tam bir noktasal yük olmaması ve yayılı yük gibi davranması da problemlere neden olmaktadır.

L Levha üzerine sinüzoidal kuvvet uygulama durumunda elde edilen sonuçların kuvvetin hem genliğini hem de yerini bulma konusunda yeterli olduğu söylenebilir.

5.2.2. Rastgele Kuvvet

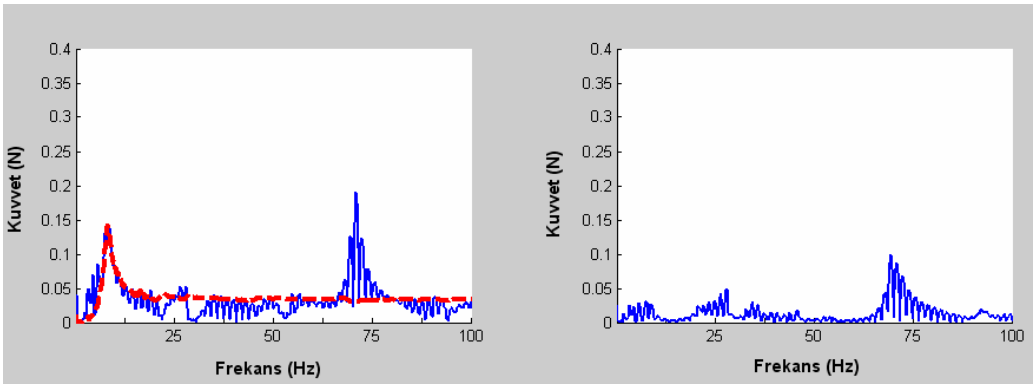
L Levha üzerinde belirlenmeye çalışılan ikinci kuvvet tipi rastgele kuvvettir. Sinyal analizöründe rastgele bir white-noise oluşturularak bu sinyal modal sarsıcı ile yapıya uygulanmıştır. Rastgele kuvvet yapıyı geniş bir frekans aralığında uyarabilmek için seçilmiştir. Öte yandan, yapı üzerinde ölçüm alınacak altı adet noktaya karşılık her

bir adımda sadece üç adet ölçüm alınabilmesi nedeniyle titreşim ölçümü toplamda iki adımda tamamlanabilmektedir. Eğer her adımda rastgele sinyaller kullanılacak olursa adımların her birinde yapıya farklı kuvvetler uygulanmış olacaktır. Oysa altı adet ivme ölçümünün aynı şartlar altında alınması gerekmektedir. Yapıyı hem geniş bir frekans aralığında uyarabilmek hem de adımlar boyunca uygulanan kuvveti hep sabit tutabilmek amacı ile tipik rastgele kuvvet yerine "pseudo-random" denen kuvvet çeşidi kullanılmıştır. Bu sinyal bir rastgele sinyal parçasının belirli aralıklarla tekrar edilmesi ile oluşur. Dolayısıyla hem rastgele bir sinyal oluşturulmuş olmakta hem de bu sinyal tekrarlanarak periyodiklik sağlanmış olmaktadır. Pseudo-random tipi kuvvet kullanılarak titreşim ölçümlerinin yapıldığı iki adımda da aynı kuvvetin uygulanmasına çalışılmıştır. Bu kuvvetlerin frekans spektrumlarının verildiği Şekil 5.5'te de görüldüğü gibi ufak farklara rağmen kuvvetler birbirlerine oldukça benzemektedirler.



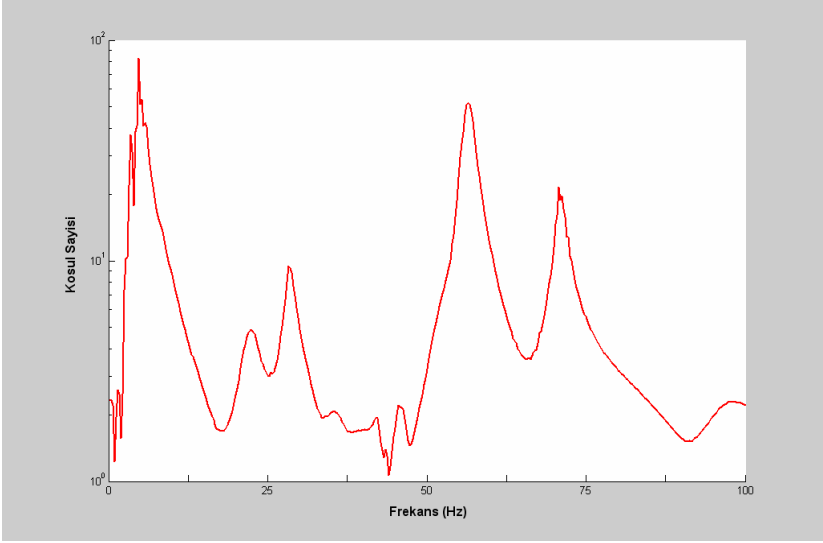
Şekil 5.5: Farklı Zamanlarda Uygulanan Rastgele Kuvvetlerin Karşılaştırılması

Yapılan ölçümler kullanılarak Kuvvet Belirleme Metodu bu duruma uygulandığında üzerinde kuvvet olabileceği farzedilen iki noktada bulunan sonuçlar Şekil 5.6'da verilmiştir.



Şekil 5.6: Levha Üzerinde Hesaplanan Rastgele Kuvvet Dağılımı

1 No'lu koordinatta bulunması gereken kuvvet mertebe olarak doğru bir şekilde hesaplanmıştır. Buna rağmen hem bir numaralı koordinatta hem de iki numaralı koordinatta 25 ve 75 Hz civarlarında gerçekte olmayan bazı tepeler bulunmuştur. Yapının Frekans Tepki Fonksiyonlarına ait Koşul Sayısı – Frekans grafiği incelenirse problemli kısımlarda koşul sayısının oldukça yükseldiği, matrisin tersinin alınmasının bu yüzden zorlaştığı ve hatalı sonuçların bulunduğu görülmektedir. L levhanın frekans tepki fonksiyonlarına ait Koşul Sayısı – Frekans grafiği Şekil 5.7'de verilmiştir.



Şekil 5.7: L Levhanın Frekans Tepki Fonksiyonu Matrisine Ait Koşul Sayısı – Frekans Grafiği

Hesaplanan kuvvet spektrumunda koşul sayısının düşük kaldığı bölümler göz önüne alınmazsa L Levha üzerinde rastgele kuvvetin de doğru bir biçimde bulunduğu

söylenebilir. Daha fazla veri kullanıldığında ve daha kaliteli ölçüm sonuçları ile çalışıldığında sonucun doğruluğunun artacağı öngörülebilir.

5.2.3. Darbe Kuvveti

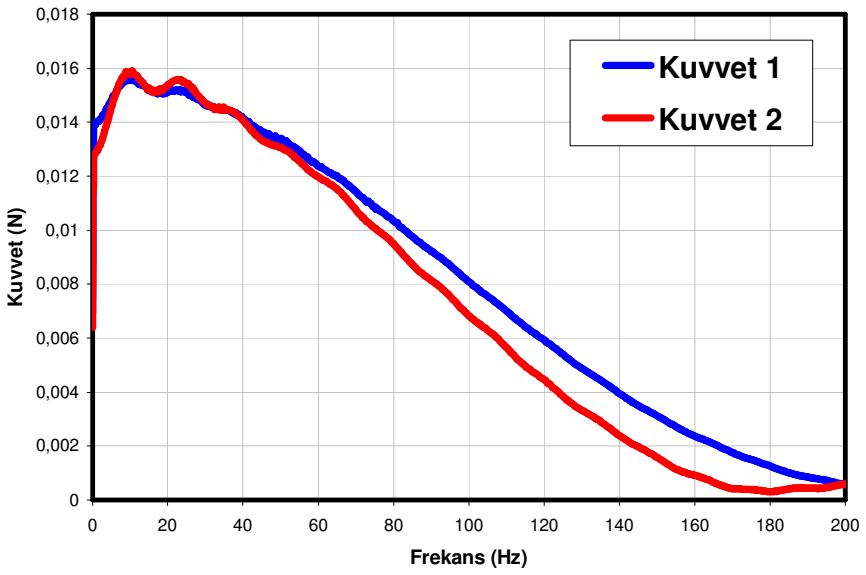
Deneysel durumda L Levha üzerinde belirlenmeye çalışılan diğer bir kuvvet tipi darbe kuvvetidir. Darbe kuvveti yapının serbest sınır koşullarına ait durum için belirlenmeye çalışılmıştır. Bunun için levha misinalar yardımıyla asılmış ve üç değişik noktasından tahrik edilirken toplamda altı adet noktadan da FTF ölçümü alınmıştır. Neticede levhanın 6x3 boyutundaki FTF matrisleri elde edilmiştir. Yapısal FTF ölçümü esnasında bu kez sarsıcı kullanılmamıştır. Yapı Şekil 5.8'de gösterildiği üzere modal çekiç ile uyarılmıştır.



Şekil 5.8: L Levha Üzerinde Modal Çekiç ile FTF Ölçümü

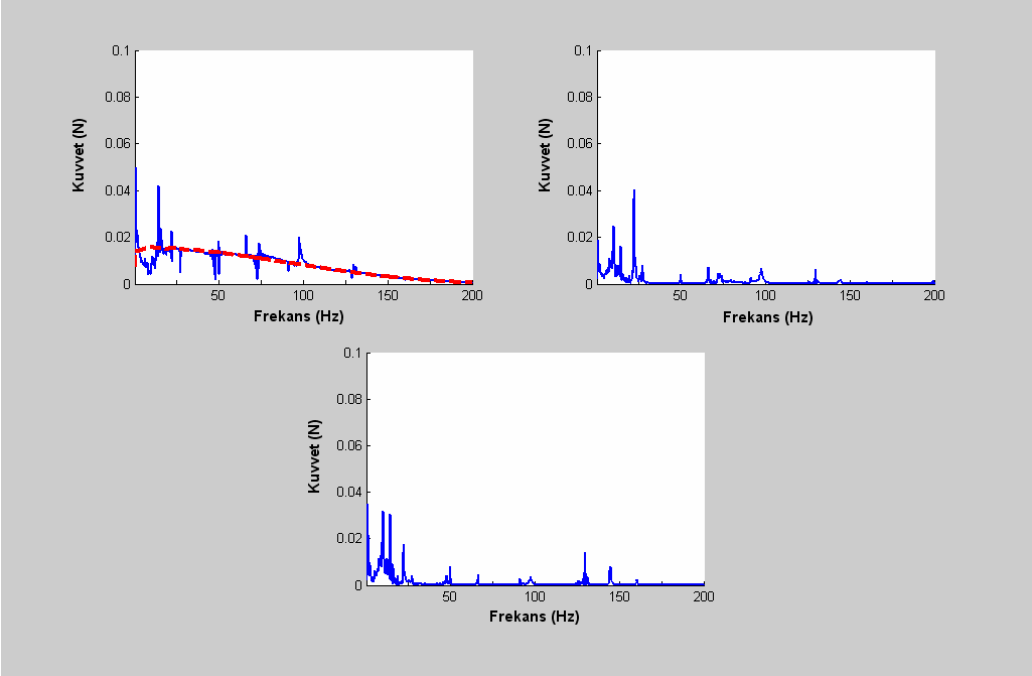
Yapı üzerinde FTF ölçümleri toplandıktan sonra yine modal çekiç kullanarak yapı 1 numaralı noktasından bir darbe kuvvetine maruz bırakılmış ve bu kuvvetin yapı üzerinde oluşturduğu titreşimler ivmeölçerler ile ölçülmüştür. Toplamda 6 adet ivme

ölçümü alındığından ve analizörün kanal sayısı nedeniyle her bir seferde üç ölçüm yapılabildiğinden altı tane ölçümü toplayabilmek için iki adıma ihtiyaç duyulmuştur. Teorik olarak yapıya etkiyen bir tahrik kuvveti nedeniyle oluşan altı tane titreşim ölçümüne ihitiyaç duyulmaktadır, bu yüzden de her iki adımda da yapıya aynı tahrik kuvvetlerinin uygulanmış olması gerekmektedir. Öte yandan bunu sağlamak pratikte kolay olmamıştır. İlk adımda oluşturulan darbe kuvveti kaydedilmiş, ikinci adımda ilki ile mümkün olduğunca benzer bir kuvvet elde edilinceye kadar vuruşlar tekrarlanmıştır. Sonuçta her iki adımda yapıya uygulanan kuvvetler olabildiğince yakın tutulmaya çalışılmakla beraber, bu ancak sınırlı miktarda sağlanabilmiştir. Bu kuvvetlerden birisi belirlenmeye çalışılan tahrik kuvveti olarak belirlenmiş ve işlem sonucunda karşılaştırma onun üzerinden yapılmıştır. İki adımda uygulanan tahrik kuvvetleri arasındaki farkın sonuca hata olarak yansıyacağı unutulmamalıdır. Her iki adımda uygulanan tahrik kuvvetlerinin karşılaştırılması Şekil 5.9'da gösterilmektedir.



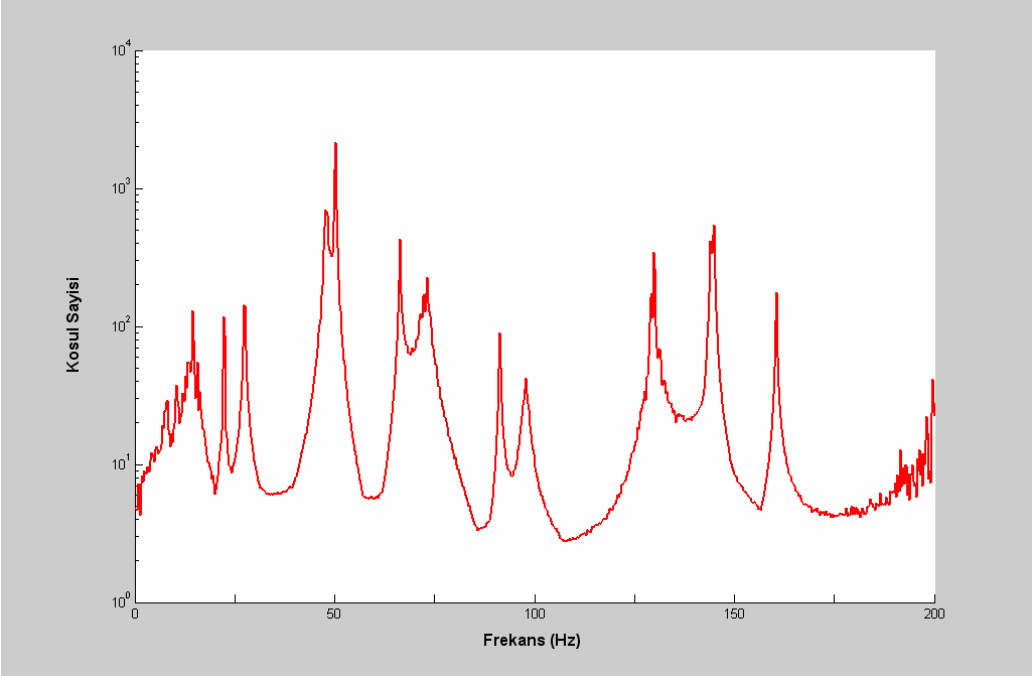
Şekil 5.9: Farklı Zamanlarda Uygulanan İki Tahrik Kuvvetinin Karşılaştırılması

Yapılan ölçümler kullanılarak Kuvvet Belirleme Metodu bu duruma uygulandığında üzerinde kuvvet olabileceği farzedilen üç noktada bulunan sonuçlar Şekil 5.10'da verilmiştir.



Şekil 5.10: Levha Üzerindeki Kuvvet Dağılımı

Şekil 5.10 incelendiğinde gerçek kuvvetin uygulandığı ilk noktada kuvvetin genel eğilim olarak doğru bir şekilde hesaplandığı ancak hem bu noktada hem de diğer noktalarda gerçek kuvvette bulunmayan bazı tepelerin varlığı farkedilmektedir. Bu tepeleri yapının FTF matrislerinin koşul sayılarının yüksek yani rankının düşük olduğu frekans bölgeleriyle ilişkilendirmek mümkündür. Şekil 5.11'da verilen FTF Matrislerinin Koşul Sayısı-Frekans Değişimi grafiğine bakılırsa kuvvet spektrumlarında görülen beklenmedik tepelerin tam da koşul sayılarının yüksek olduğu bölümlere isabet ettiği görülmektedir. FTF Matrisinin koşul sayısının yüksek olması en küçük tekil değeri ile en büyük tekil değeri arasındaki oranın yüksek olduğu yani matrisin lineer bağımlı olduğu anlamına gelmektedir. Dolayısıyla bu frekans noktalarında FTF matrisinin tersinin alınmasında bazı problemler oluşmakta ve numerik açıdan hatalı sonuçlar bulunabilmektedir.

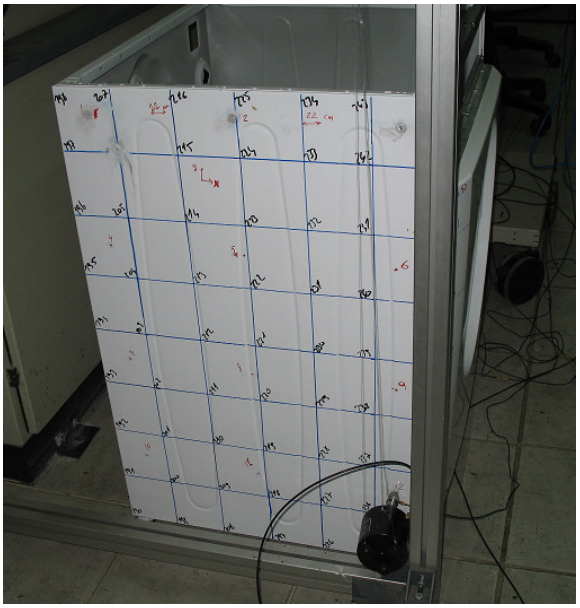


Şekil 5.11: FTF Matrisinin Koşul Sayılarının Frekansa Bağlı Değişimi

Hesaplanan kuvvet spektrumunda koşul sayısının düşük kaldığı bölümler göz önüne alınmazsa L Levha üzerinde darbe kuvvetinin de doğru bir biçimde bulunduğu söylenebilir.

5.3. Çamaşır Makinası Gövdesi Üzerinde Yapılan Çalışmalar

Deneysel çalışmaların ikinci adımı Şekil 5.12'de gösterilen çamaşır makinası gövdesinin paneli üzerinde yapılmıştır.



Şekil 5.12: Çamaşır Makinası Gövdesi

Çamaşır makinası gövdesi üzerinde sinüzoidal ve darbe olmak üzere iki tip kuvvet belirlenmeye çalışılmıştır. Sonraki bölümlerde bu çalışmalara ait ayrıntılı bilgi verilmektedir.

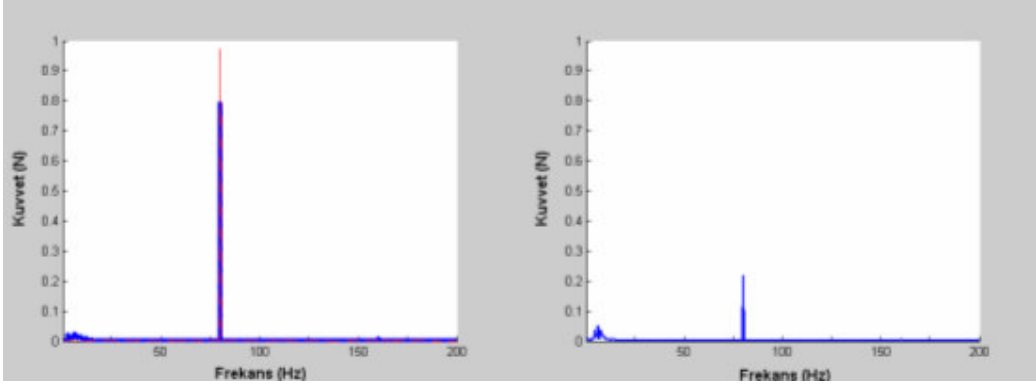
5.3.1. Sinüzoidal Kuvvet

Çalışmanın bu bölümünde çamaşır makinası gövdesinin bir paneli üzerine modal sarsıcı ile sünüzoidal bir kuvvet uygulanmış ve daha sonra bu kuvvet bilinmiyor farzedilerek Kuvvet Belirleme Metodu ile hesaplanmaya çalışılmıştır. Sonuçta hesaplanan kuvvet yapıya uygulanan kuvvet ile karşılaştırılmış ve sonuçlar yorumlanmıştır.

İlk olarak panel üzerinde on iki adet ölçüm noktası belirlenmiştir. Yapı yerde dururken sarsıcı ile iki noktasından sarsılmış ve her bir durumda seçilen on iki noktanın tümünden FTF'ler ölçülmüştür. Tekrar edilen ölçüm adımlarında ivmeölçerlerin yerleri veya sarsıcının tahrik noktası değiştirilirken yapının pozisyonunun değiştirilmemesi için büyük çaba sarfedilmiştir. Toplamda 12x2 boyutunda bir FTF matrisi elde edilmiş ve bu matris ile çalışılmıştır. Frekans Tepki Fonksiyonu Matrislerinin oluşturulmasının ardından, sinyal analizöründe oluşturulan 80 Hz frekanslı bir sinüs sinyali yapı üzerine uygulanarak bu tahrik sonucu yapı üzerinde oluşan titreşimler yine 12 noktadan ölçülmüştür. Yapı üzerinde sadece iki

noktada kuvvet olabileceği kabulü altında yapıya uygulanan kuvvetin yeri ve genliği bulunmaya çalışılmıştır. Bu durum, bilinmeyen iki adet değişkenin on iki tane denklem kullanılarak çözülmesi demektir. Titreşim ölçümü sayısının ölçülen FTF sütunlarından fazla olması kasıtlı olarak gerçekleştirilen bir işlemdir.

Çamaşır makinası panelinin 1 no'lu koordinatına kuvvvet uygulandığında Kuvvet Belirleme Metodunun ölçülen verilerle birlikte kullanılması sonucu bulunan kuvvet dağılımı Şekil 5.13'te gösterilmektedir. Mavi renkli grafikler hesaplanan kuvvetleri, kırmızı renkli grafik ise yapıya etkiyen gerçek kuvveti göstermektedir.



Şekil 5.13: Gövde Paneli Üzerindeki Noktalara Gelen Kuvvetler

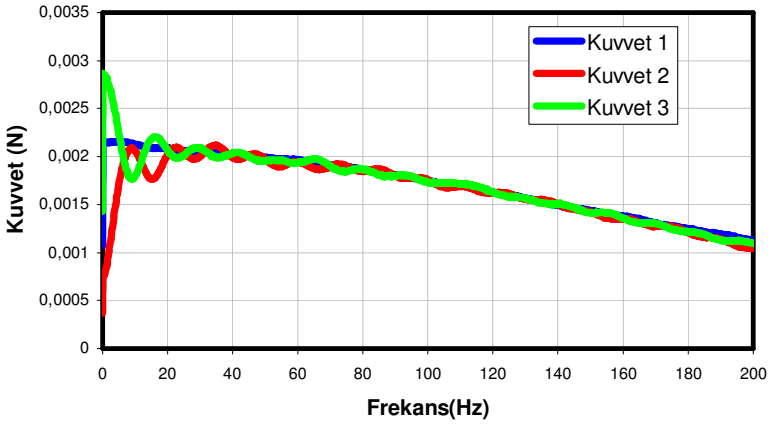
İlk noktada bulunması gereken kuvvet, genlik farkına rağmen doğru bir şekilde hesaplanmıştır. Bununla birlikte diğer noktaya kuvvet uygulanmamış olmasına rağmen bu noktada da küçük bir kuvvet bileşeni hesaplanmıştır. Bu hatanın sebebi muhtemelen yapı üzerinde ölçülen FTF'lerin parazitli olmasıdır. Ayrıca, sarsıcı ile yapı üzerine uygulanan kuvvetin tam bir noktasal yük olmaması ve yayılı yük gibi davranması da aslında kuvvet olmayan ikinci noktada kuvvet bulunmasının sebebi olabilir.

Çamaşır makinası gövdesi üzerine sinüzoidal kuvvet uygulama durumunda elde edilen sonuçların kuvvetin hem genliğini hem de yerini bulma konusunda yeterli olduğu söylenebilir. Bununla birlikte L levhaya göre yapının daha karmaşık olması itibariyle ölçülen FTF'lerin kalitesinin biraz daha düştüğü ve sonuçların da bu yüzden biraz daha fazla hatalı çıktığı öngörülebilir.

5.3.2. Darbe Kuvveti

Bu bölümde çamaşır makinası gövdesi üzerinde darbe kuvveti belirlenmeye çalışılmıştır. Bu nedenle ilk önce çamaşır makinası yerdeyken modal çekiç kullanarak yapı üzerinde belirlenen 9 noktadan FTF ölçümleri alınmış, üç adet tahrik noktası kullanılarak 9x3 boyutundaki FTF matrisi elde edilmiştir.

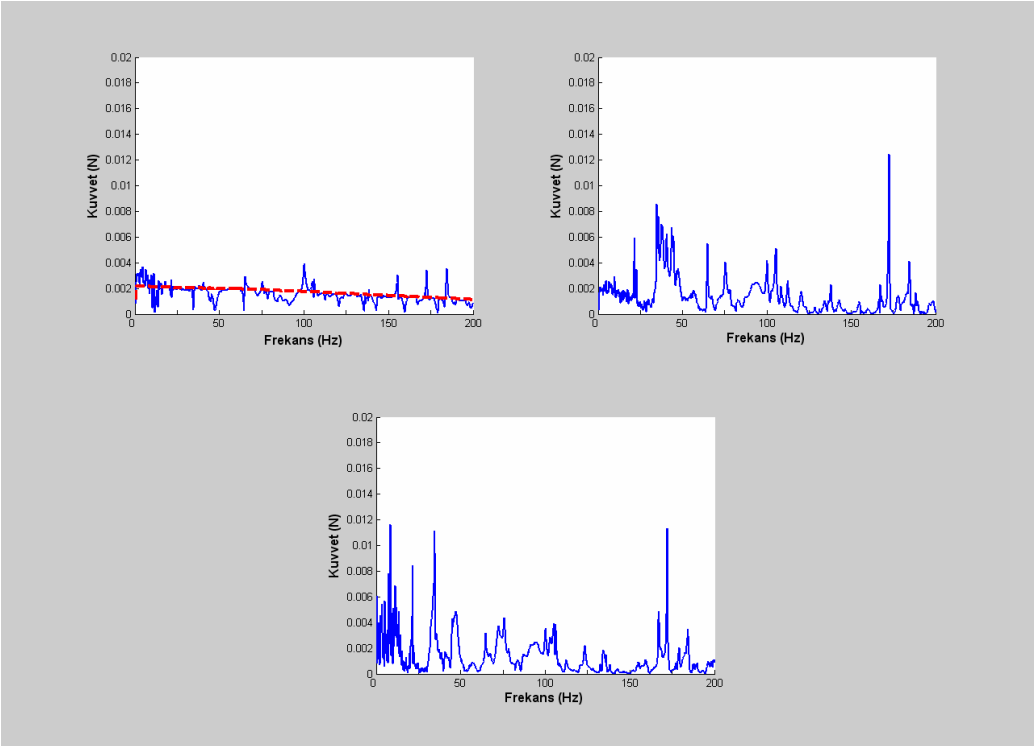
Modal çekiç kullanılarak yapı 1 numaralı noktasından bir darbe kuvvetine maruz bırakılmış ve bu kuvvetin yapı üzerinde oluşturduğu titreşimler ölçülmüştür. Analizörün kanal sayısı nedeniyle her bir seferde üç ölçüm yapılabildiğinden dokuz tane ölçümü toplayabilmek için üç adıma ihtiyaç duyulmuştur. Teorik olarak yapıya etkiyen bir tahrik kuvveti nedeniyle oluşan dokuz tane titreşim ölçümüne ihitiyaç duyulmaktadır, bu yüzden de her üç adımda yapıya aynı tahrik kuvvetlerinin uygulanmış olması gerekmektedir. Bunu sağlayabilmek için ilk adımda oluşturulan darbe kuvveti kaydedilmiş, diğer adımlarda da mümkün olduğunca yakın genlikler elde edilinceye kadar vuruşlar tekrarlanmıştır. Bu kuvvetlerden birisi belirlenmeye çalışılan tahrik kuvveti olarak belirlenmiş ve işlem sonucunda karşılaştırma onun üzerinden yapılmıştır. Her üç adımda uygulanan tahrik kuvvetlerinin karşılaştırılması Şekil 5.14'te gösterilmektedir.



Şekil 5.14: Çamaşır Makinası Gövdesine Uygulanan Darbe Kuvvetlerin Karşılaştırılması

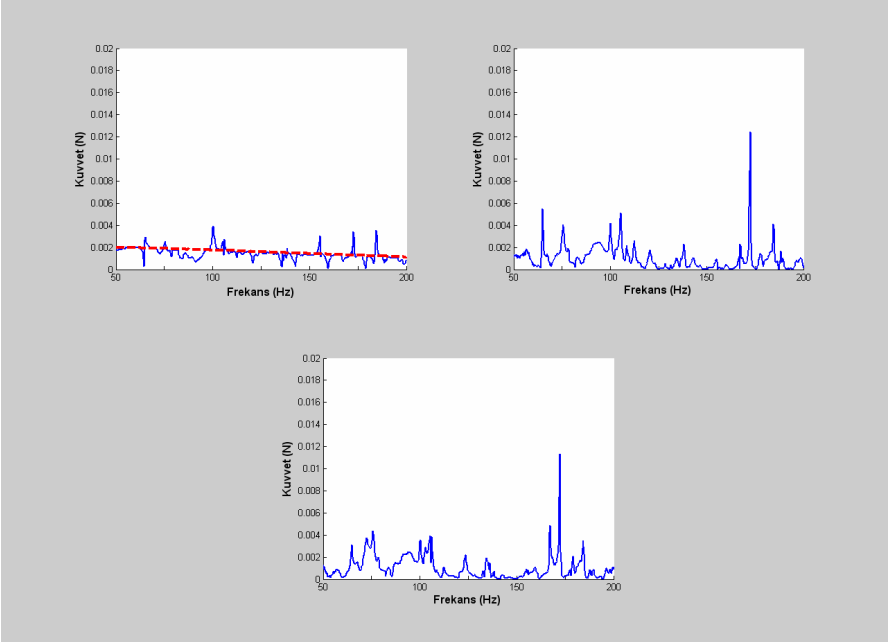
Her üç adımda uygulanan kuvvetlerin genlikleri birbirine yakın olmasına rağmen özellikle düşük frekans bölgelerinde farklılıklar göze çarpmaktadır. Bu farklılıkların sonuca hata olarak etkiyebileceği gözden kaçmamalıdır.

Yapı üzerinden toplanan FTFler ve ivme ölçümleri birlikte kullanılarak hesaplanan tahrik kuvetleri ise Şekil 5.15'te sunulmaktadır.



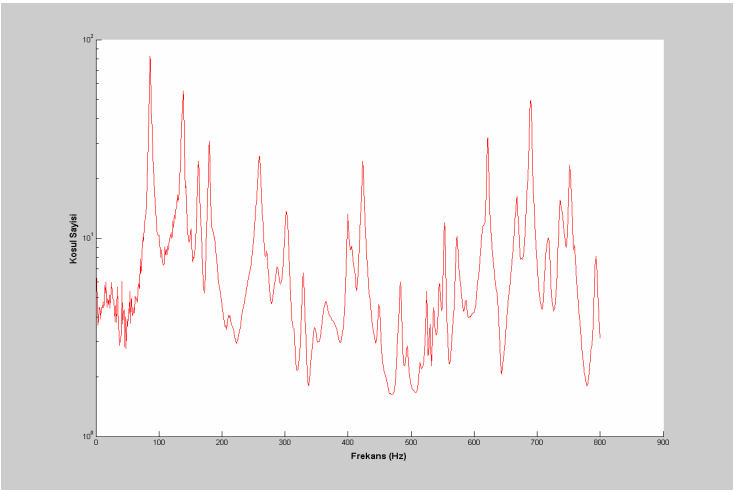
Şekil 5.15: Çamaşır Makinası Gövdesi Üzerinde Hesaplanan Kuvvet Dağılımı

Kuvvetin uygulandığı 1 no'lu koordinatta kuvvet, ortalama genlik bakımından doğru bir şekilde hesaplanmış olmasına rağmen diğer noktalarda da parazit şeklinde anlamsız bazı bileşenler bulunmuştur. Şekil 5.14'e bakılırsa 50 Hz'e kadar olan uyumsuzlukların yapıya uygulanan tahrik kuvvetleri arasındaki farklardan kaynaklı olduğu görülebilir. Bu bölümler çıkarılırsa, incelenen grafikler Şekil 5.16'daki gibi görünecektir.



Şekil 5.16: Çamaşır Makinası Gövdesi Üzerinde Hesaplanan Kuvvet Dağılımı

Düşük frekans bölgelerindeki problemli kısım ortadan kaldırılmış olmasına rağmen ikinci ve üçüncü noktalarda da bulunmaması gerektiği halde kuvvetler hesaplanmaktadır. Bu durum sözkonusu frekans bölgelerindeki koşul sayısının yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 5.17'da verilen Koşul Sayısı-Frekans Grafiği hesaplanan kuvvetler ile karşılaştırılırsa bu durum açıkça görülecektir.



Şekil 5.17: Çamaşır Makinası Gövdesi FTF Matrislerinin Koşul Sayısı-Frekans Grafiği

Bu örnekte bulunan sonuçların, özellikle kuvvetin bulunmaması gereken yerlerde de çıktı vermesi nedeniyle çok isabetli olduğu söylenemez. Bu sonuç üzerinde yapı üzerinden alınan FTF'lerin kalitesi büyük rol oynamaktadır. Bununla beraber, bulunan sonuçların yapı üzerinden ölçülen titreşimlere neden olabilecek kuvvet bileşeni setlerinden bir tanesi olduğu hatırlatılmalıdır. Yani, bulunan sonuç yapı üzerinden ölçülen titreşim seviyelerini oluşturacak seçeneklerden biri olmasına rağmen, aranan tekil çözüm değildir.

1 no'lu noktadaki kuvvet ise yeterli bir hassasiyetle doğru bir şekilde tespit edilebilmiştir.

5.4. Deneysel Çalışmada Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Bu bölümde verilen deneysel sonuçlar genel anlamda tatmin edici olmakla birlikte sonuçlarda bazı problemler de mevcuttur. L levha üzerinde yapılan çalışmaların sonuçları çamaşır makinası gövdesi üzerindekilere göre daha iyi çıkmıştır. Bunun nedeni çamaşır makinası gövdesinin nispeten daha karmaşık bir yapı olmasıdır.

Uygulanan kuvvet tiplerinin çoğu için elde edilen sonuçlar hem genliğin hem de konumun bulunması anlamında yeterlidir.

Öte yandan, belirlenmeye çalışılan kuvvet sayısı kaç olursa olsun, yapı üzerinden ölçülen titreşim verisi arttıkça çözüm için kullanılabilecek o kadar fazla denklem olacak ve bu da sonuçların kalitesini iyileştirecektir. Bu yüzden deneysel çalışmalar boyunca hep hesaplanmaya çalışılan kuvvet sayısından daha fazla titreşim ölçümü ile çalışılmıştır. Dolayısıyla hesaplama sürecinde kare değil dikdörtgen matrisler kullanılmıştır.

Deneysel çalışmalarda karşılaşılan en önemli problemler tekrarlı ölçümlerin varlığı, çapraz kontrol hataları, kalibrasyon hataları veya kuvvetin noktasal olarak uygulanamaması olarak sıralanabilir.

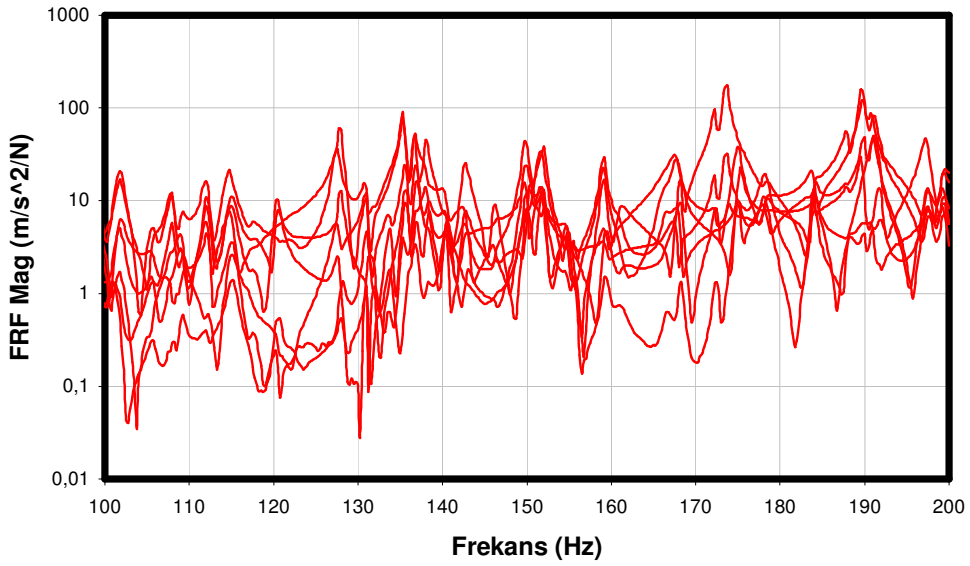
5.4.1. Tekrarlı Ölçümler

Deneysel çalışmaların yapıldığı durumlarda dikkat edilmesi gereken en önemli hususlardan biri tekrarlı ölçümlerin varlığıdır. Yukarıda da belirtildiği gibi bu

çalışmada dört kanallı bir sinyal analizörü kullanılmıştır. Deneylerin her bir adımında kanallardan birine kuvvet transdüseri, diğer üçüne ise ivmeölçerler bağlanmaktadır. Dolayısıyla her bir ölçüm adımında yalnızca üç adet ölçüm yapılabilmekte ve toplam ölçüm sayısının arttırılabilmesi için kuvvet ve ivme transdüserlerinin yerlerinin en az birkaç kez değiştirilmesi gerekmektedir. Bu durum hem FTF ölçümleri için hem de dinamik tahrik kuvvetleri nedeniyle oluşan titreşimlerin ölçülmesi için geçerlidir. Bu durum, sonuçların kalitesini etkileyen önemli faktörlerden biridir.

Teoride titreşim ölümleri için yapılması gereken, belirli bir koordinata kuvvet uygulanırken önceden belirlenmiş koordinatların tümünden titreşim ölçümleri almaktır. Ancak ölçülebilecek koordinat sayısındaki kısıtlama nedeniyle işlem tek adımda değil ancak birkaç adımda yapılabilmektedir. Tekrar edilen ölçümler, her ne kadar aynı koşularda gerçekleştirilmeye çalışılıyor da olsa bazı farklılıklardan kaçılamamaktadır. Dolayısıyla yapı üzerinden alınan titreşim ölçümleri aynı şartlarda değil en iyi ihtimalle "benzer" şartlarda alınmış olmaktadır.

Benzer durum FTF ölçümleri için de geçerlidir. Bir noktaya tahrik uygulanıp diğer noktalardan tepki fonksiyonları ölçülürken de ölçümlerin birkaç kez tekrarlanması gerekmiştir. Bu durum çok önemli bir problem değildir çünkü Frekans Tepki Fonksiyonu zaten giriş ve çıkış arasındaki orandır ve uygulanan kuvvet değişse bile ölçülen titreşim de aynı oranda değişmektedir. Frekans Tepki Fonksiyonlarının ölçümündeki esas tekrar edilebilirlik problemi FTF Matrisinin değişik sütunlarının ölçülmesinde ortaya çıkar. Matrisin bir sütunun ölçülmesi için sarsıcı bir noktaya monte edilir ve bir dizi ölçüm alındıktan sonra yeni bir dizi ölçüm için sarsıcı yeni bir noktaya monte edilir. Sarsıcının ağırlığını yapıya taşıtmamak için ne kadar gayret edilirse edilsin, bu durum yapının sınır koşullarını mutlaka etkileyecektir. Dolayısıyla farklı zamanlarda alınan FTF'lerde farklılıklar olacaktır.



Şekil 5.18: Çamaşır Gövdesinden Alınan FTFlerin Karşılaştırılması

Şekil 5.18, çamaşır makinası üzerinden farklı adımlarda alınmış FTF'lerden bir kısmını karşılaştırmalı olarak göstermektedir. Genliklerin farklı çıkması son derece doğaldır, ancak görülen tepelerin frekans ekseninde kaymalar göstermesi ölçüm şartlarından kaynaklanan bazı problemlerin olduğuna işaret etmektedir.

5.4.2. Çapraz Kontrol

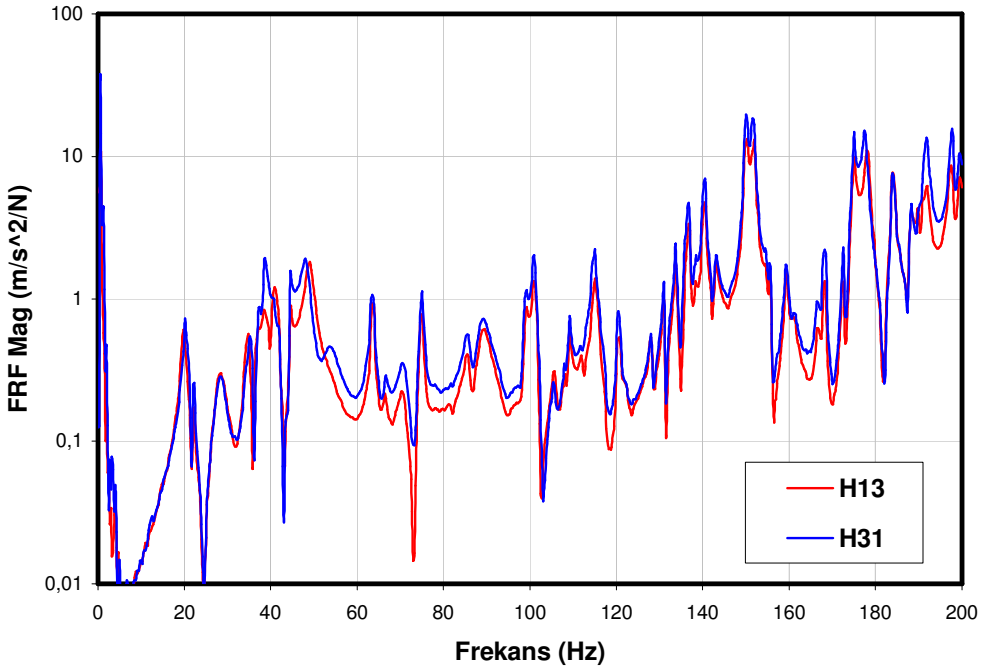
Bir yapının FTF matrisi simetriktir. Daha açık bir ifade ile FTF matrisinin köşegenindeki elemanlara göre simetrik olan elemanlar eşittir.

$$H(\omega)=\begin{bmatrix} H_{11}(\omega) & H_{12}(\omega) & \cdots & H_{1j}(\omega) \\ H_{21}(\omega) & H_{22}(\omega) & \cdots & H_{2j}(\omega) \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ H_{i1}(\omega) & H_{i2}(\omega) & \cdots & H_{ij}(\omega) \end{bmatrix} \tag{5.1}$$

FTF Matrisinin simetrik olması (5.1) ifadesi ile verilen matriste

$$H_{ab}(\omega)=H_{ba}(\omega) \tag{5.2}$$

bağıntısının geçerliliğini öngörür. Fakat FTF Matrisinin simetrik olması durumu pratikte her zaman sağlanamamaktadır. Örnek olarak, çamaşır makinası üzerinden alınan iki adet FTF'nin üst üste çizdirildiği grafik Şekil 5.19'da gösterilmektedir.



Şekil 5.19: Simetrik Olması Gereken İki FTF'nin Karşılaştırılması

Bu iki frekans tepki fonsiyonlarından birinde yapı 1 no'lu koordinattan uyarılmış ve ölçüm 3 no'lu koordinattan alınmıştır. Diğerinde ise yapı 3 no'lu koordinattan uyarılırken ölçüm 1 no'lu koordinattan alınmıştır. Çapraz kontrol ifadesine göre bu iki grafiğin üst üste çakışması gerekirken aralarında bazı farkların olduğu görülmektedir. Bu da deneysel durumda sonuca etkiyen hatalardan biridir.

5.4.3. Kalibrasyon Hataları

Deneysel çalışmalar yapılırken dikkat edilmesi gereken önemli hususlardan biri de kalibrasyondur. Kalibrasyon, belirli koşullar altında doğruluğu bilinen bir referans kullanarak bir cihaz, ölçü aleti ya da standardın doğruluğunun belirlenmesidir. Deneysel ölçümlerden önce ivmeölçerlerin ve modal çekiç veya sarsıcıların kalibre edilmesi gerekmektedir. Bazı durumlarda, transdüserler kalibre edilmelerine rağmen test boyunca ayarlanan duyarlılık değerlerinden sapabilmektedirler. Bunu belirlemek içi test sonrası kalibrasyonlarına başvurulmuş ve gerçekten de kimi durumlarda

deney sonunda transdüserlerin duyarlılıklarında sapma belirlenmiştir. Bu durum da deney sonuçlarının kalitesini etkiyen önemli faktörlendendir.

5.4.4. Uygulanan Tahrik Kuvvetinin Noktasal Olmaması

Tez boyunca hem deneysel hem de sayısal uygulamalarda kuvvet belirleme metodu uygulanırken yapılar bölümlere ayrılmış ve yapıya ait noktalarda kuvvet belirlenmeye çalışılmştır. Sayısal durumda noktasal bir yük uygulamanın herhangi bir zorluğu yoktur. Ancak deneysel durumda hiç bir zaman gerçek anlamda noktasal yük uygulanamaz. Çünkü kuvvet transdüserinin bağlandığı nokta ile beraber onun çevresine de bir miktar yük uygulanmış olacaktır. Başka bir deyişle sarsıcı ile uygulanan kuvvet noktasal değil aslında yayılı yük olmaktadır. Deneysel çalışmalar boyunca aslında kuvvet bulunmaması gereken koordinatlarda da kuvvet hesaplanmasının nedenlerinden birinin bu durum olduğu düşünülmektedir. Bu problemin önüne geçebilmek için deneysel çalışmalarda kuvvet belirlenirken birbirinden mümkün olduğunca uzak noktalar seçilerek bu etkileşimden kaçınmaya çalışılmıştır.

6. GENEL DEĞERLENDİRME VE GELECEKTE YAPILABİLECEK ÇALIŞMALAR

6.1. Genel Değerlendirme

Bu tez kapsamında, bilinmeyen dinamik kuvvetlerin tespit edilmesine yönelik bir metodoloji geliştirilmeye çalışılmıştır. Bir yapı üzerine etkiyen dinamik kuvvetleri ölçmek veya bulmak çoğu zaman mümkün olmamaktadır. Bazı durumlarda ise, bu kuvvetleri ölçmek mümkün olmakla beraber, getirdiği zorluklar veya zahmet nedeniyle ölçülmeleri tercih edilmemektedir. Bu nedenler, tahrik kuvvetlerinin alternatif yollardan belirlenmesini gerektirmektedir.

Literatürde tanımlanmış çok sayıda kuvvet belirleme metodu vardır. Tez kapsamında bu metodlar incelenmiş, gerekli sınıflandırmalar yapılmış ve bu metodlar arasından FTF Tabanlı Kuvvet Belirleme Yöntemi seçilerek uygulanmaya çalışılmıştır.

FTF Tabanlı Kuvvet Belirleme Metodu, yapının üzerinden alınan frekans tepki fonksiyonlarını ve yapının herhangi bir dinamik tahrik kuvveti altındaki titreşimlerini kullanarak bu titreşimlere neden olan dinamik kuvvetleri bulmaya yönelik bir doğrudan kuvvet belirleme metodudur. Kuvvet belirleme metodunun ilk adımı, yapı üzerinden Frekans Tepki Fonksiyonlarının ölçülmesidir. Kuvvet belirleme işlemi yapının hangi hali için gerçekleştirilecekse Frekans Tepki Fonksiyonları da yapının o hali için oluşturulmalıdır. Yapının Frekans Tepki Fonksiyonları sayısal durumda hesaplanabilir veya deneysel durum için ölçülebilir. Frekans Tepki Fonksiyonları bulunduktan sonra kuvvet belirleme sürecinin ikinci adımına yani yapı üzerinde herhangi bir dinamik tahrik kuvveti nedeniyle oluşan titreşimlerin ölçülmesi işlemine geçilmektedir. Daha sonra elde edilen bu iki temel veri kullanılarak yapıya etkiyen dinamik tahrik kuvvetleri bulunmaya çalışılmaktadır. Kuvvet belirleme çalışmaları hem sayısal hem de deneysel durum için gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışmasında Kuvvet Belirleme Metodunun hangi şartlarda doğru sonuç vereceği, uygulama esnasında ne gibi problemlerle karşılaşılabileceği ve bunların üstesinden nasıl gelinebileceği gibi konular açıklanmaya çalışılmıştır.

Yapılan sayısal örnekler, kuvvet belirleme metodunun etkin bir şekilde çalıştığını göstermiştir. Değişik yapılar üzerinde değişik noktalardan uygulanan farklı tipteki kuvvetler oldukça yüksek doğrulukla hesaplanmıştır. Ayrıca, (eğer var ise) hesaplanan kuvvetler ile gerçek kuvvetler arasındaki farklılıkların sebeplerine değinilmiştir. Çalışmalar, Kuvvet Belirleme Metodunun sayısal modeller üzerinde etkin bir şekilde çalıştığını göstermiştir.

Kuvvet Belirleme uygulamalarının ikinci bölümünde deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu bölümde gerçek yapılar üzerinde kuvvet belirleme işleminin uygulanmasına çalışılmıştır. Değişik yapılar üzerine etkiyen dinamik kuvvetler, yapı üzerinden alınan FTFler ve titreşim ölçümleri yardımıyla bulunmaya çalışılmıştır. Deneysel durumdaki sonuçlar, deneysel ölçümlerin parazitli olması, tekrar edilebilirlik, kalibrasyon, çapraz kontrol (reciprocity) gibi problemlerden dolayı sayısal durumlardaki sonuçlar kadar doğru olmasa da tatmin edicidir.

Tez boyunca yapılan çalışmalardan çıkarılan en önemli sonuçlar şunlardır:

- Kuvvet belirleme metodunun bir kara kutu gibi her türlü yapı veya her türlü kuvvet için otomatik olarak kullanılabilmesi mümkün değildir. Bulunmak istenenlere göre değişik yaklaşımlar kullanılması ve çalışmalara başlamadan önce yeterli bir test planlama çalışması yapmak gerekmektedir. Yapı üzerinden alınacak ölçüm sayısını mümkün olduğunca azaltabilmek adına, en başta tahrik kuvvetlerin hangi koordinatlardan uygulanıyor olduğuna dair fikir sahibi olunması işleri kolaylaştıracaktır.

- Yöntemin başarıya ulaşmasında en önemli veri yapının Frekans Tepki Fonksiyonlarıdır. Yeterli sayıda FTF doğru bir şekilde ölçülmeli (ya da hesaplanmalı), ve bu matrislerin daha sonra tersleri alınacağından eksik ranklı olmamalarına özen göserilmelidir.

- Veri kalitesinin yüksek olduğu durumlarda yapıya uygulanan kuvvetin genlik ve konum bilgisi bulunabilmektedir. Ancak veri kalitesinin düştüğü

durumlarda, metod gerçekte var olan kuvveti kabul edilebilir hassasiyette bulmasına rağmen gerçekte kuvvetin uygulanmadığı noktalarda da kuvvet olduğu sonucunu verebilmektedir.

- Kuvvet Belirleme Metodunun verdiği sonuçlar her zaman yapının FTF Matrislerine ait koşul sayıları ile beraber değerlendirilmelidirler. Bu şekilde hangi frekanslardaki sonuçların matrisin eksik ranklı olmasından kaynaklanan hataları içerdiği ve bu yüzden göz önüne alınmaması gerektiği bulunabilir.

- Kuvvet Belirleme Metodu uygulanarak bulunan sonuçlar tekil çözümü vermese bile bulunan sonuçların yapı üzerinden ölçülen titreşimlere neden olabilecek kombinasyonlardan biri olduğu unutulmamalıdır.

- FTF Matrisinin boyutu ne olursa olsun, kullanılan titreşim ölçümü sayısı arttırıldıkça sonuçların kalitesi iyileşecektir. Ayrıca, sonuçların doğruluğu açısından ölçümler sırasında özenli davranılmalı ve özellikle de transdüserlerin kalibrasyonlarına dikkat edilmelidir.

- Yapı üzerinden birden fazla koordinatta ölçüm alınması gerekmektedir, tüm ölçümlerin aynı duruma ve aynı zaman dilimine ait olması önemlidir. Kullanılan ölçüm sisteminin kapasitesine göre kimi sınırlamalar mevcut olsa da bir seferde mümkün olduğunca fazla ölçüm alabilmek için çaba gösterilmelidir.

6.2. Gelecekte Yapılabilecek Çalışmalar

Bu tez çalışması boyunca yapılan bütün uygulamalarda yapı üzerine uygulanan ve aslında özellikleri bilinen kuvvetler tespit edilmeye çalışılmıştır. Oluşturulan metodun pratikte uygulanabilirlik kazanması açısından herhangi bir mekanizmanın gerçek çalışma koşullarında üzerine etkiyen kuvvetlerin bulunmasına çalışılabilir. Bu şekilde yapı üzerine etkiyen kuvvetler belirlenebildiği takdirde bu çıktıların tasarım optimizasyonu için ne kadar kullanışlı olduğu değerlendirilmelidir.

Kuvvet Belirleme Metodunun doğruluğunu artırmak için daha fazla FTF ve titreşim ölçümü kullanılarak sonuca gidilmeye çalışılabilir. Bu ölçümlerin hem kısa zamanda

hem de aynı anda alınabilmesi için lazer ölçüm cihazı kullanılarak metodun verdiği sonuçların kalitesi yükseltilebilir.

Tez kapsamında sadece doğrudan bir metod olan FTF Tabanlı Kuvvet Belirleme Metodu üzerinde durulmuştur. Optimizasyon Metodları daha detaylı incelenerek bu yönde bir çalışma da yapılabilir. Bu metodların avantajlarından da faydalanılarak elde edilen sonuçların kalitesi biraz daha ileri götürülmeye çalışılabilir.

KAYNAKLAR

[1] **Hillary, B.**, 1983. Indirect Measurement Of Vibration Excitation Forces, *PhD Thesis,* Imperial College London, Dynamics Section, London.

[2] **Stevens, K. K.**, 1987. Force Identification Problems – an overview. *Proceedings of the 1987 SEM Spring Conference on Experimental Mechanics*, Houston, TX, USA.

[3] **Dascotte, E., Desanghere, G**., 1991. Updating Of Force Functions. Dynamics Engineering, Ambachtenlaan, Belgium.

[4] **Carne, T. G., Bateman, V.I., Mayes, R. L.,** 1992. Force Reconstruction Using a Sum Of Weighted Accelerations Technique. *Proceedings of the 10th International Modal Analysis Conference*, San Diego, CA, USA.

[5] **O'Callahan, J., Piergentili, F.**, 1996. Force Estimation Using Operational Data, *International Modal Analysis Conference 1996*, Dearborn, USA.

[6] **Steltzner, A. D., Kammer, D. C.,** 1999. Input Force Estimation Using an Inverse Structural Filter. *IMAC XVII.*

[7] **Tao, J. S., Liu, G. R. Lam, K. Y.,** 2001. Excitation Force Identification Of an engine With Velocity Data At Mounting Points, Journal Of Sound and Vibration, **242**(2), 321-331.

[8] **Guillaume, P., Parloo, E., Verboven, P., De Sitter, G.,** 2002. An Inverse Method For The Identification Of Localized Excitation Forces. Vrije University Brussel Report, Brussel, Belgium.

[9] **MA, C. K., Chang, J. M., Lin, D. C.,** 2003. Input Forces Estimation Of Beam Structures By an Inverse Method, *Journal Of Sound and Vibration*. **259**(2), 387-407.

[10] **Ma, C. K., Ho, C. C.,** 2004. An Inverse Method For The Estimation Of Input Forces Acting On Non-Linear Structural Systems. *Journal Of Sound And Vibration*, 275, 953-971.

[11] **Wang, B. T.,** Prediction Of Impact And Harmonic Forces Acting O Arbitrary Structures: Theoretical Formulation. National PingtungUniversity Of Science and Technology, Taiwan, China**.**

[12] **Çakar, O.,** 2003. Titreşim Testlerinden Elde Edilen Verilerin Kalitesinin İyileştirilmesi, *Doktora Tezi,* İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[13] **Gürbüzer, G.,** 2006. Sayısal Titreşim Modellerinin Deneysel Verilerle Güncellenmesi, *Yüksek Lisans Tezi,* İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[14] **Çakar, O., Şanlıtürk, K. Y.,** 2005. Frekans Tepki Fonksiyonlarından Transdüser Kütle Etkilerinin Kaldırılması. *İTÜ Dergisi,* 4(2), 79-92.

[15] **Ewins, D. J.,** 2000. Modal Testing: Theory, Practice and Application. Research Studies Press Ltd., Hertfordshire, England.

[16] Bruel Kjær web sitesi, 2006, www.bksv.com.

[17] MathWorld web sitesi, 2006, http://mathworld.wolfram.com/.

ÖZGEÇMİŞ

Ahmet Ali Uslu, 1983 yılında Manyas'ta doğdu. 1999 yılında Balıkesir Fen Lisesi'ni bitirdi. 2004'te İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi'nden mezun oldu ve aynı yıl İTÜ Makina Mühendisliği Anabilim Dalı "Katı Cisimlerin Mekaniği" Programı'nda başladığı yüksek lisans öğretimine "Makine Dinamiği, Titreşim ve Akustiği Programı"nda devam etti. Halen Arçelik A.Ş. Araştırma ve Geliştirme Direktörlüğünde çalışmaktadır.