

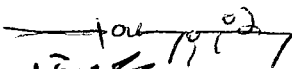
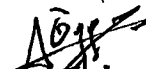
**KÖPRÜ HASARLARININ
DİNAMİK TEST VERİLERİ İLE SAPTANMASI**

DOKTORA TEZİ
Y. Müh. B. Özden ÇAĞLAYAN
501932001

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

112244

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 16 Ocak 2001
Tezin Savunulduğu Tarih : 21 Mayıs 2001

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Erdoğan UZGİDER 
Diğer Jüri Üyeleri Prof. Dr. Alpay ÖZGEN (İTÜ) 
Prof. Dr. Mehmet BAKİOĞLU (İTÜ) 
Prof. Dr. Gülay ALTAY (B.Ü.) 
Prof. Dr. Faruk YÜKSELER (YTÜ) 

MAYIS 2001

ÖNSÖZ

İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Programı çerçevesinde gerçekleştirilen bu doktora çalışmasında, köprü hasarlarının dinamik test datası kullanılarak belirlenmesi için kolay, hızlı ve maliyeti düşük bir yöntem geliştirilmesi amaçlanmıştır. Kolay, etkin ve az ekipman ile çok bilgi sağlanacak bir test ve elde edilen dataların işlenmesi ile hasarın yerinin belirlenebileceği bir hesaplama yöntemi bu doktora çalışması sonucunda geliştirilmiştir.

Bu doktora çalışması boyunca, her konuda sürekli ilgi ve yardımlarını gördüğüm ve değerli fikirlerinden yararlandığım danışman hocam Sayın Prof. Dr. Erdoğan UZGİDER' e teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Ayrıca bu konu üzerindeki görüşmelerimiz ve beraber çalışmalarımız sayesinde, fikirlerinden çok yararlandığım Doç. Dr. Filiz PİROĞLU ve Yar. Doç. Dr. Ahmet K. ŞANLI'ya ve bu çalışmanın başından sonuna kadar her zaman bana maddi, manevi destek olan aileme de teşekkür ederim.

MAYIS 2001

Y. Müh. B. Özden ÇAĞLAYAN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
KISALTMALAR.....	v
TABLolar.....	vi
ŞEKİLLER.....	vii
SEMBOL LİSTESİ.....	x
ÖZET.....	xii
SUMMARY.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. HASAR TESPİDİ İLE İLGİLİ LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	4
2.1 Frekans Değişimleri.....	4
2.1.1 İleri problem.....	4
2.1.2 Tersinir problem.....	8
2.1.3 Mod şekli değişimleri.....	11
2.2 Dinamik Olarak Ölçülen Fleksibiliteye Dayanan Yöntemler.....	13
2.2.1 Fleksibilite değişiminin kıyaslanması.....	14
2.2.2 Teklik kontrolü.....	14
2.2.3 Rijitlik hata matrisi yöntemi.....	15
2.2.4 Residual fleksibilitenin etkileri.....	16
2.2.5 Ölçülmüş rijitlik matrisindeki değişimler.....	16
2.3 Matris Güncelleme Yöntemleri.....	16
2.3.1 Hedef fonksiyon ve sınırlamalar.....	17
2.3.2 Optimum matris güncellemesi yöntemi.....	18
2.3.3 Duyarlılık analizlerine dayalı güncelleme yöntemi.....	20
2.3.4 Özdeğer benzeşim yöntemi.....	21
2.3.5 Hibrid matris güncelleme yöntemleri.....	22
2.4 Lineer Olmayan Yöntemler.....	23
2.5 Sinir Ağına Dayalı Yöntemler.....	24
2.6 Diğer Yöntemler.....	25

3. HASAR TESPİT YÖNTEMLERİNİN KÖPRÜLER ÜZERİNDE	
UYGULAMASI	34
4. KÖPRÜ HASARLARININ DİNAMİK TEST VERİLERİ İLE	
SAPTANMASI	40
4.1 Giriş	40
4.2 Amaç	40
4.3 Teori	41
4.4 İntegrasyon Yöntemi	46
4.5 İntegrasyon Sabitlerinin Deneysel Saptanması	49
4.6 Hasar Belirleme Yöntemi	66
4.7 Laboratuvar Koşullarında Uygulama	68
4.7.1 Deney düzeneği	68
4.7.2 Prototip kiriş üzerinde ön çalışma	70
4.7.3 Yöntemin kiriş üzerine uygulanması	72
5. GELİŞTİRİLEN YÖNTEMİN GERÇEK BİR KÖPRÜ ÜZERİNDE	
UYGULAMASI	78
5.1 Test Yöntemi	78
5.2 Tesin Uygulanması	81
5.2.1 Köprünün tanımı	81
5.2.2 Ön çalışma	82
5.2.3 Serbest titreşim	83
6. SONUÇLAR	101
6.1 Geliştirilen Algoritmanın Köprü Üzerinde Uygulanmasının Sonuçları	101
6.2 İleriye Dönük Öneriler	102
KAYNAKLAR	104
ÖZGEÇMİŞ	134

KISALTMALAR

ARMA	:	Otomatik Geriye Doğru İlerleyen Ortalama (Auto-Regressive Moving Average)
MAC	:	Modal Güvenirlilik Kriteri (Modal Assurance Criteria)
PMAC	:	Kısmi Modal Güvenirlilik Kriteri (Partial Modal Assurance Criteria)
COMAC	:	Modal Güvenirlilik Kriteri Koordinatı (Coordinate Modal Assurance Criteria)
FFT	:	Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform)
GPS	:	Küresel yer belirleme sistemi (Global Positioning System)

TABLÖLAR

Tablo 2.1 Hasar tespit yöntemlerinin sınıflandırılması	28
Tablo 4.1 Nümerik İntegrasyon Teknikleri	50
Tablo 4.2 α değerleri	59
Tablo 4.3 γ ve β değerleri	68
Tablo 4.4 İndirgenmiş rijitlik matrisinin kıyaslanması	70
Tablo 4.5 Duyarlılık analizi sonuçları	75
Tablo 4.6 Sonuçların kıyaslanması.....	80
Tablo 5.1 Sonuçların kıyaslanması.....	98
Tablo 5.2 Mayıs 1992 yılında yayınlanmış rapordan alınan rijitlik değişimlerini gösteren tablo	99

ŞEKİLLER

Şekil 4.1	Yay-kütle sistemi	49
Şekil 4.2	Yay rijitliğinin belirlenmesi için yay sisteminin yüklenmesi	50
Şekil 4.3	Yay ağırlık-yer değiştirme eğrisi	51
Şekil 4.4	Yay-kütle sistemi ile ivme ve deplasman ölçerlerin sistemi.....	52
Şekil 4.5	Yay testi sırasında alınmış ivme kaydı ve bu kayıdın FFT'si.....	53
Şekil 4.6	Yay-kütle sistemi üzerinden alınan ivme kaydı ve bu kayıdın FFT'si	54
Şekil 4.7	Ölçüm ve hesap ile bulunan yer değiştirmeler.....	55
Şekil 4.8a	γ için %95 güvenirlilikli normal dağılım eğrisi	57
Şekil 4.8b	β için %95 güvenirlilikli normal dağılım eğrisi.....	57
Şekil 4.9a	Titreştirme tablası ve ivme ölçerlerin yerleşimi	58
Şekil 4.9b	Titreştirme tablası ve ivme ölçerlerin yerleşimi	59
Şekil 4.10	Titreştirme tablası kontrol ünitesi.....	60
Şekil 4.11a	İvme kaydı ve hesaplanan deplasman.....	60
Şekil 4.11b	FFT grafiği.....	61
Şekil 4.12	Optimizasyon sonucu bulunan γ ve β değerleri	61
Şekil 4.13	Optimizasyon sonucu bulunan γ ve β değerleri	62
Şekil 4.14	Optimizasyon sonucu bulunan γ ve β değerleri	62
Şekil 4.15	7.5 Hz yüklemesi	63
Şekil 4.16	Optimizasyon sonucu bulunan γ ve β değerleri	63
Şekil 4.17	10 Hz yüklemesi	64
Şekil 4.18	Optimizasyon sonucu bulunan γ ve β değerleri	64
Şekil 4.19	Köprü modeli ve seçilmiş ölçüm yönleri	66
Şekil 4.20	Hasar ve rijitlikteki değişim.....	68
Şekil 4.21	Şematik test düzeneği	69
Şekil 4.22	Test düzeneği	69
Şekil 4.23a	Prototip mesnetlenme şekilleri.....	69
Şekil 4.23b	Prototip kirişin kaynaklanan çelik levha ile güçlendiriliş şekli	70
Şekil 4.24	Bilgisayar modeli	70

Şekil 4.25 Prototip üzerinden alınmış bir ivme kaydı.....	71
Şekil 4.26 Prototipe ait ivme kaydının FFT sonucu	71
Şekil 4.27 Titreştirme mekanizması.....	74
Şekil 4.28 2-4 düğüm noktalarına indirgenmiş hesaplanan K^i rijitlik matrisinin %95 güvenirlikli normal dağılımı	74
Şekil 4.29 4-5 düğüm noktalarına indirgenmiş hesaplanan K^i rijitlik matrisinin %95 güvenirlikli normal dağılımı	75
Şekil 4.30 7-9 düğüm noktalarına indirgenmiş hesaplanan K^i rijitlik matrisinin %95 güvenirlikli normal dağılımı	75
Şekil 4.31 9-12 düğüm noktalarına indirgenmiş hesaplanan K^i rijitlik matrisinin %95 güvenirlikli normal dağılımı	76
Şekil 5.1 3 eksenli ivme ölçer	79
Şekil 5.2 Data toplama sistemi.....	79
Şekil 5.3 Ölçüm sırası	81
Şekil 5.4 Çerkezköy köprüsü	82
Şekil 5.5 Çerkezköy köprüsü bilgisayar modeli	82
Şekil 5.6 Titreştirme mekanizması.....	83
Şekil 5.7 Ölçüm sırası	84
Şekil 5.8 Ölçüm noktaları	85
Şekil 5.9 Çerkezköy data toplama merkezi.....	85
Şekil 5.10 Tek eksenli ivme ölçer.....	85
Şekil 5.11 İki eksenli ivme ölçer.....	86
Şekil 5.12 ivme kaydı sırasında bir görünüş	86
Şekil 5.13 2-4 düğüm noktalarına indirgenmiş hesaplanan K^c rijitlik matrisinin %95 güvenirlikli normal dağılımı	87
Şekil 5.14 4-6 düğüm noktalarına indirgenmiş hesaplanan K^c rijitlik matrisinin %95 güvenirlikli normal dağılımı	88
Şekil 5.15 6-8 düğüm noktalarına indirgenmiş hesaplanan K^c rijitlik matrisinin %95 güvenirlikli normal dağılımı	89
Şekil 5.16 8-10 düğüm noktalarına indirgenmiş hesaplanan K^c rijitlik matrisinin %95 güvenirlikli normal dağılımı	90
Şekil 5.17 13-15 düğüm noktalarına indirgenmiş hesaplanan K^c rijitlik matrisinin %95 güvenirlikli normal dağılımı	91

Şekil 5.18 15-17 düğüm noktalarına indirgenmiş hesaplanan K^c rijitlik matrisinin %95 güvenilirlikli normal dağılımı	92
Şekil 5.19 17-19 düğüm noktalarına indirgenmiş hesaplanan K^c rijitlik matrisinin %95 güvenilirlikli normal dağılımı	93
Şekil 5.20 19-21 düğüm noktalarına indirgenmiş hesaplanan K^c rijitlik matrisinin %95 güvenilirlikli normal dağılımı	94
Şekil 5.21 Rijitlik azalışı gösteren bölgeler	95
Şekil 5.22 Mayıs 1992 yılında yayınlanan rapordan alınmış rijitlik değişimlerini gösteren şekil.....	97
Şekil 5.23 Geliştirilen algoritma ile rijitlik azalmasını gösteren bölge.....	98
Şekil 5.24 Birim deplasman ölçer ile ölçülen elemanlar	98
Şekil 5.25a Gerilme tesir hatları	99
Şekil 5.25b Gerilme tesir hatları	100



SEMBOL LİSTESİ

K, k	: rijitlik
K_{yay}	: yay sabiti
M, m	: Kütle
u, $\dot{u}$, $\ddot{u}$	: yer değiştirme, hız, ivme
P	: dış kuvvet
C	: sönüm
Φ	: Mod şekli
ω_i	: i'nci moda karşı gelen frekans (rad/s)
η	: rezonans piklerindeki değişimi veren oran
α	: skaler katsayı
t	: zaman
Δt	: zaman adımı veya integrasyon adımı
F	: dış kuvvet
f(t)	: zamana bağlı dış kuvvet
G	: fleksibilite matrisi
x	: yer değiştirme
$\dot{x}$	: hız
$\ddot{x}$	: ivme
γ	: Newmark nümerik integrasyon sabitleri
β	: Newmark nümerik integrasyon sabitleri
E	: hata
I	: birim matris
λ	: özdeğer
λ	: Lagrange çarpan
J	: hedef fonksiyonu
R	: sınırlama fonksiyonu
[A]	: statik hassasiyet matrisi
{δp}	: Parametre pertürbasyon

İNDİSLER

m	: ölçülmüş
d	: hasarlı
c	: hesaplanacak
h	: integrasyon sonunda bulunacak
in	: indirgenmiş
u	: hasarsız
n	: bölge no



KÖPRÜ HASARLARININ DİNAMİK TEST VERİLERİ İLE SAPTANMASI

ÖZET

Dinamik data kullanılarak yapılarda hasar tespiti ve hasar tespit yöntemleri konusundaki araştırmaların artışının birden çok nedeni bulunmaktadır. Bu nedenler, büyük ölümlere yol açabilecek yapı göçmeleri, ekonomik bakış, ve yakın zamanda teknolojik açıdan görülen hızlı gelişmeler şeklinde sınıflandırılabilir.

Medya ve ilgili meslek kuruluşlar, halkın ilgisini yapı testlerine, yapıların uzun süreli izlenmesine ve bu yapıların güvenilirliğinin belirlenmesine çekmektedir. Sonuç olarak halkın ilgisi, politikacıların bu konular üzerinde yoğunlaşmalarına, dolayısıyla sanayi ve ilgili kuruluşların bu konular üzerinde çalışmalarına ve gerekli kaynakları yaratmalarına zorlamaktadır.

Diğer taraftan, yapıların yaşlanması, yaşlanan yapıların yıkılıp yenilerinin yapılması yerine sadece yapı üzerinde gereken bölgelerin onarılması ve güçlendirilmesi yoluna gidilmesi, ekonomik açıdan zorlayıcı bir faktör olup bu araştırmaların gelişmesinde ve derinleşmesinde uyarıcı bir etkidir.

Öte yandan teknolojik gelişme, ölçüm ve data toplama sistemlerinin ucuzlamasına, daha detaylı ve hassas ölçümlere olanak sağlamasına, test maliyetlerinin belirgin şekilde düşmesine neden olmuş ve bilgisayar ortamında çok büyük verilerle dahi hafıza sorunu olmaksızın işlem yapılmasına olanak sağlamıştır. Bu gelişmeler yeni ölçüm tekniklerinin ve hesap yöntemlerinin gelişmesine yardımcı olmuş ve olmaya devam etmektedir.

Hasar tespit yöntemlerine değinilmeden önce *hasar*' ın mühendislik dilinde ne anlama geldiğine bir bakmak gerekir.

Hasar, yapının şu anki ve/veya gelecekteki davranış performansını etkileyecek yapı üzerinde oluşmuş değişikliklerdir. Hasar, insan ve yapı güvenliği için, göçme oluşturmada tespit edilmelidir. Hasarlar yapıda istemli veya istem dışı oluşmuş olabilir. İstemli hasarlara örnek vermek gerekirse; savaş sırasında, uçakların uçuş karakteristiklerini değiştirerek düşürmek için uçaksavarlar ile uçaklar üzerinde hasarlar oluşturulur. İstem dışı hasarlara betonarme yapılarda, rutubet nedeniyle beton içerisindeki donatıların korozyona uğrayıp enkesit kaybetmesi dolayısıyla taşıma gücünde azalmaya neden olması örnek olarak verilebilir.

Hasarın anlam kazanabilmesi için sistemin ilk ve son durumlarının birbirleri ile kıyaslanması gerekir ki, bu durumda ilk durum olarak tanımlanan hal, genellikle hasarsız durumdur.

Yapı üzerindeki hasarın tespit edilebilmesi için birçok test ve hasar belirleme yöntemleri geliştirilmiştir. Bu testlere örnek vermek gerekirse;

Yapı davranışı testi

- Güvenirlilik testi
- Maksimum yük taşıma kapasitesini belirleme testi
- Gerilme dağılımı testi
- Diagnostik testler

Hasar belirleme yöntemlerine aşağıdaki örnekler verilebilir :

- Frekans değişimi
 - İleri-tersinir değişim
- Mod şekli yöntemi
- Rijitlik hata matrisi yöntemi
- Rijitlik matrisi
- Matris güncelleme metodları
- Lineer olmayan metotlar
- Sinir ağları yöntemi
- Bulanık mantık

Yukarıda bahsedilen test ve hasar tespit yöntemleri günümüzde yapılarda uygulanmaktadır. Ancak her birinin bir diğerine göre üstün ve/veya üstün olmayan yönleri, uygulama kolaylıkları ya da zorlukları vardır. Bazılarının maliyeti diğerlerine göre yüksek , ya da bazılarının sonuç vermesi için oldukça yoğun işlem hacmi gerektiğinden problemin çözümü uzun zaman dilimine bağlı olabilir. Bazıları ise oldukça karmaşıktır ve uzman olmayan biri tarafından uygulanamıyabilir ve hatta çözülemiyebilir. Yöntemin data toplama süresi uzun, işlem süresi ise kısa olabilir. Bazı yöntemlerde ise tam tersine data toplama süresi kısa, datayı işleme ve sonuç elde etme süresi uzun olabilir.

Bu çalışmada verilen algoritma malzeme açısından lineer davranış gösteren yapılar için geliştirilmiştir. Yöntem, sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmiş sistem ile, dinamik test datası kullanılarak model ve ölçülen sistem arasında yapısal farkların var olup olmadığının araştırılmasına dayanır. Böylece bu farkların değerlendirilmesiyle yapıda hasarın oluşup oluşmadığı, eğer oluşmuşsa yeri kolaylıkla belirlenebilir.

En genel halde hareket denklemi;

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [C]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = \{f(t)\} \quad (1)$$

şeklinde yazılmaktadır. Dış kuvvetin olmaması halinde (serbest titreşim) denklem (1) aşağıdaki şeklini almaktadır.

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [C]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = \{0\} \quad (2)$$

Bu denklemlerde; $[M]$ = kütle matrisi ; $[C]$ = sönüm matrisi; $[K]$ = rijitlik matrisi; f = dış kuvvet vektörü, $\ddot{u}(t), \dot{u}(t), u(t)$ sırasıyla ivme, hız ve yerdeğiştirme vektörleridir.

Sönüm matrisinin elemanlarının değerlerinde oluşabilen değişimin, sistem elemanlarında sözkonusu olabilecek hasar nedeniyle rijitlik matrisi elemanlarında oluşabilene göre oldukça az olacağı düşünülerek, denklem (2) denklem (3) şeklini almaktadır:

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = \{0\} \quad (3)$$

Sistemi bir bütün olarak almak ve dolayısıyla büyük matrislerle uğraşmak yerine, sadece ivme ölçümü yapılan ilgili serbestlik derecelerine karşı gelecek indirgenmiş bir sistem üzerinde hesap yapmak hem kolaylık hem de işlemlere hız kazandıracaktır. İndirgenmiş kütle ve rijitlik matrisleri denklemlerde yerlerine konulursa:

$$[M_{in}]\{\ddot{U}_x(t)\} + [K_{in}]\{U_x(t)\} = \{0\} \quad (4)$$

elde edilir. Denklem (1)'de $\{\ddot{U}_x\}$ ölçülen ivme vektörünü, $\{U_x\}$ ölçülen ivmeden entegrasyon yöntemlerinden birinin kullanılmasıyla elde edilmiş yerdeğiştirme vektörünü, $[M_{in}]$ indirgenmiş kütle matrisini ve $[K_{in}]$ indirgenmiş rijitlik matrisini temsil etmektedir.

Taşıyıcı sistem elemanlarında söz konusu olabilen hasarlardan korozyon nedeniyle oluşan kesit kayıpları dışında, diğer hiçbir hasar sistem kütlelerinde herhangi bir değişikliğe neden olmaz. Çok aşırı olmayan korozyon hasarları bile ihmal edilebilir kütle değişimlerine neden olur.

Öte yandan yorulma çatlakları, eleman birleşimlerinde kaynak kırılması, perçin veya bulon ezilmeleri gibi hasarlar, kütle matrisinde hiçbir değişikliğe neden olmazken, rijitlik matrisinde belirgin değişikliklere neden olur.

Dolayısı ile yapıda oluşacak hasar nedeniyle kütlelerin değişmeyeceği kabulü kullanılarak denklem incelendiğinde, kütle (mevcut projelerden ve/veya çıkarılan rölemlerden) ve ivmenin (ölçümlerden) bilindiği, diğer değişkenlerin (rijitlik hasar ile değişiyor, hız ve yerdeğiştirme ölçülmüyor) bilinmediği görülmektedir. Ancak hız ve deplasman ivmenin fonksiyonları olduğu için bu değerler ivme datasından, uygulanacak uygun bir entegrasyon yöntemi ile elde edilebilecektir. Sonuç olarak hasara bağlı olarak değişim gösteren rijitlik, dinamik data kullanılarak tanımlanabildiği takdirde, yapının bilgisayar modelinden elde edilen rijitlik ile kıyaslanarak hasarın yapı üzerinde mevcut olup olmadığı, eğer mevcut ise yeri saptanabilir.

Bu bilgiler kullanılarak elde edilen denklem (4) tekrar yazılacak olursa;

$$[M_{in}]\{\ddot{U}_{xm}(t)\} + [K_{in}^c]\{U_{xh}\} = \{0\} \quad (5)$$

şeklini alır. Bu denklemdeki indisler, "m" ölçümü, "h" integrasyon sonucu bulunacağını, "c" hesaplar sonucu bulunacağını, "in" matrisin indirgenmiş olduğunu göstermektedir.

Aynı denklem kullanılarak; aşağıda tanımlanan hata fonksiyonu, en küçük kareler optimizasyon yöntemi ile rijitlik matrisinin terimleri değişken alınarak minimize edilmek suretiyle K_{in}^c matrisinin elemanlarının değerleri saptanmaktadır.

$$\begin{aligned} \{H\} &= \{0\} - [M_{in}] \{\ddot{U}_{xm}\} - [K_{in}^c] \{U_{xh}\} \\ E &= \{H\}^T \{H\} \end{aligned} \quad (6)$$

Burada, {H} hatayı içeren kolon matristir.

Sonuç olarak bu çalışmada, köprü hasarlarının dinamik test datası yardımı ile saptanması için uygulaması kolay, kısa zamanda sonuç alınabilen, karmaşık olmayan ve işlem hacmi küçük, dolayısıyla ekonomik bir yöntem geliştirilmiş ve bu yöntem bir prototip üzerinde uygulanarak etkinliği gösterildikten sonra bir köprü üzerine uygulanmış ve sonuçları verilmiştir.

Bu doktora çalışmasında, köprü hasarlarının dinamik test datası yardımı ile saptanması için uygulaması kolay, kısa zamanda sonuç alınabilen, karmaşık olmayan ve işlem hacmi küçük, dolayısıyla ekonomik bir yöntem geliştirilmiş ve bu yöntem bir prototip üzerinde uygulanarak etkinliği gösterildikten sonra bir köprü üzerine uygulanmış ve sonuçları verilmiştir.

IDENTIFICATION OF BRIDGE DAMAGES BY USING VIBRATION BASED TEST DATA

SUMMARY

The increase in research activity regarding vibration based damage detection is the result of coupling between many factors. These factors can be generally categorized as spectacular failures in loss of life, economic concerns, and recent technical advancements.

Also media and engineering related associations coverage focus the public's attention on the need for testing, monitoring and evaluation of structures to ensure the safety of these structures and mechanical systems used by the public. The public's concerns, as a result, focus the attention of politicians on this issue, and hence industry and regulatory agencies are influenced to provide the funding resources necessary for the development and advancement of this technology. The current state of aging infrastructure and the economics associated with its repair have also been motivating factors for the development of methods that can be used to detect the onset of damage or deterioration at the earliest possible state. Finally, technological advancements increase in cost-effective computing memory and speed, advances in sensors, and adaptation and advancements of the finite element method represent technical developments that have contributed to recent improvements in vibration based damage detection.

Also adaptation and advancements in experimental techniques such as modal testing and development of linear and non-linear system identification methods are both reason and results of the above mentioned improvements.

Before beginning to examine the vibration based damage identification methods, it is better to discuss what damage is from engineering point of view.

Damage is defined as changes introduced into system, either intentional or unintentional, that adversely affect the current or future performance of the system. These systems can be either natural or man-made. As examples, an anti-aircraft missile is typically fired to intentionally introduce damage that will immediately alter the flight characteristics of the target aircraft. Moisture, corrosion and deterioration can be given as an example of an unintentional damage that causes loss of the load carrying capacity of a structure.

However, depending on the levels of exposure these systems may not show the adverse effect of this damaging event many years.

Implicit in this definition of damage is that the concept of damage is not meaningful without a comparison between two different states of the system, one of which is assumed to represent the initial, and often undamaged state.

There are lots of testing and damage identification methods:

For structural tests;

- Behavior tests
- Proof tests
- Ultimate load tests
- Stress history tests
- Diagnostic tests

For damage detection methods;

- Frequency Changes
 - The forward problem
 - The inverse problem
- Mode shape changes
- Mod shape and frequency changes
- Stiffness error matrix method
- Changes in measured stiffness matrix
- Matrix update methods
- Non-linear methods
- Neural network based methods
- Fuzzy logic

can be given as examples.

Above mentioned testing and vibration based damage identification methods that are applied to structures have some advantages and disadvantages against each other. While some of them are very easy to apply to structure, some are not. Some of them are very expensive, some are not. Some of them are very complicated while some are not. Some of them need intensive and extra knowledge of testing and identification.

The algorithm, developed in this study, relies on linear-elastic materials. The method bases on the change of characteristic structural parameters between the models one of which is calculated by using computer model (FEM) and the other is obtained by using dynamic test data. By examining these changes, damage and its location can be inspected.

The basic matrix notation of equation of motion is given as;

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [C]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = \{f(t)\} \quad (1)$$

If the external force is zero Eq. 2 is obtained;

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [C]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = \{0\} \quad (2)$$

In this equation; $[M]$ = mass matrix ; $[C]$ = damping matrix; $[K]$ = stiffness matrix; $\{f\}$ = external force vector, $\{\ddot{u}(t)\}$, $\{\dot{u}(t)\}$, $\{u(t)\}$ are acceleration, velocity and displacement vektors respectively as a function of time.

In most structural application it is assumed that the damping and its change due to damage are small enough that its effect is negligible:

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = \{0\} \quad (3)$$

Rather than taking the whole system into account, it is apparent that taking the system which is condensed on to the joints where from the acceleration data recorded, simplifies the solution;

$$[M_m]\{\ddot{U}_x(t)\} + [K_m]\{U_x(t)\} = \{0\} \quad (4)$$

$\{\ddot{U}_x\}$ is the recorded acceleration vector, $\{U_x\}$ is the displacement vector that is calculated by integrating the acceleration data twice, $[M_m]$ is the condensed mass matrix and $[K_m]$ is the condensed stiffness matrix.

Except corrosion, damage causes no change on structural members' mass values. In most cases, if the corrosion is not so heavy, the change of mass values owing to corrosion, is negligible. If the equation 4 is examined in this point of view, the parameters except mass and acceleration are unknown or vary due to damage and its location. But as displacement is the function of acceleration, it is clear that condensed stiffness matrix $[K_m]$ should be calculated by using dynamic data then it is possible to find out damage and its location by comparing it to the condensed stiffness matrix calculated by using computer model (FEM).

$$[M_m]\{\ddot{U}_{xm}(t)\} + [K_{in}^c]\{U_{xh}\} = \{0\} \quad (5)$$

The superscript and subscripts in the equation (5) means that;

m : measured

in : condensed

h : calculated by integration of acceleration

c : will be calculated by minimizing the error fuction.

By using equation (5) the error fuction can be written as;

$$\begin{aligned} \{H\} &= \{0\} - [M_m]\{\ddot{U}_{xm}\} - [K_{in}^c]\{U_{xh}\} \\ E &= \{H\}^T \{H\} \end{aligned} \quad (6)$$

Minimizing the error function E gives the solution for unknown $[K_{in}^c]$ values. The difference between these obtained values with condensed stiffness matrix $[K_m]$ calculated by using computer model (FEM), indicates the damage and its location.

In this study, viable, inexpensive and economical algorithm is developed for identification of bridge damages by using dynamic test data. The efectiveness of the

algorithm was checked for a prototype beam in laboratuvary condition and very promissing results were obtained. Data captured while a dynamic bridge test performed on a real railway bridge was employed to further demonstrate the effectiveness of the proposed algorithm.



1 GİRİŞ

Yapıların sürekli izlenmesi (long-term monitoring) ve hasarın mümkün olduğunca erken bir safhada belirlenmesi özellikle inşaat, mekanik ve uzay mühendislerinin ilgisini çekmiştir. Mevcut hasar tespit yöntemleri gözle muayene (visual inspection) veya akustik veya ultrasonik metodlar, manyetik alan metodları, termal alan metodları gibi bölgesel deneysel metodlardır (localised experimental methods). Bütün bu deneysel teknikler hasarın öneminin, yerinin bilinmesini ve hasarın yerine kolay ulaşılabilir olmasını gerektirmektedir. Bütün bu sınırlamalar çerçevesinde bu deneysel yöntemler, hasarı yapı üzerinde yüzeyde veya yüzeye yakın kesimde belirleyebilmektedirler. Bu yüzden (eğer varsa) yapıdaki hasarın yerini belirlemeyi sağlayacak test ve tespit metodlarının geliştirilmesi gerekmektedir ve bu nedenle günümüzde bu konuda yoğun araştırmalar yapılmakta ve yöntemler geliştirilmektedir.

Yapıların dinamik özelliklerini ve/veya davranışlarını değiştiren, hasar veya kusurun tespidi için yapılan çalışmalarda ana fikir, modal parametreler (frekans, mod şekli, modal sönüm) yapının fiziksel özelliklerinin (kütle, sönüm ve rijitlik) bir fonksiyonudur. Sonuç olarak, fiziksel parametrelerde bir değişim, modal parametrelerde bir değişime neden olacaktır.

İdeal hasar tespit yönteminin adımları; yapıda hasarın olup olmadığının saptanması, yapıda hasar bulunuyorsa yerinin belirlenmesi, hasarlı bölgenin ölçüm aletleriyle donatılıp hasarın miktarının ve ciddiyetinin saptanması, ve son olarak yapının kalan ömrünün tayin edilmesi safhalarından oluşur. Bu akış diyagramı aynı zamanda otomasyona da uygundur. Ancak önemli bir sorun bu noktada karşımıza çıkmaktadır; yapı, yapılır yapılmaz (inşa sonrası), üzerine yerleştirilecek ölçüm aletleri ile ölçülmelidir ki ileride hasar tespidi sırasında bu ölçümler referans teşkil ederek yeni ölçümlerle arasında kıyaslama yapılması mümkün olabilsin. Ayrıca hasar tespit metodlarının rahat uygulanabilir olması ve yapının işlevsellik kısıtlamalarını da

(operational constraints) göz önünde tutması gerektiği açıktır. Örneğin literatürde yer alan birçok hasar tespit yönteminde yapının kütlelerinin yapıda oluşan hasar sonucunda değişmediği kabul edilmekle beraber bazı yapılarda bu kabulün doğru olmadığı bilinmektedir. Örneğin açık deniz platformlarında bu kabul doğru olmamaktadır. Model ile yapı arasındaki davranış farklılıkları bir başka önemli problemdir. Geliştirilen bilgisayar modeli ve gerçek yapı davranışı arasında gözönüne alınmayan etkiler nedeniyle oluşacak farklılıklar, yapıda hasar olmamasına rağmen, yapıda hasar bulunuyormuş gibi yorumlamamıza neden olabilirler.

Yapı üzerindeki hasarın etkisi lineer veya lineer olmayan olarak sınıflandırılabilir. Lineer hasarda, yapı üzerinde hasarın oluşmasından sonra da yapı lineer davranış içerisinde kalır. Modal özelliklerdeki değişiklikler, yapının geometrisinin ve/veya malzemenin değişmesinden kaynaklandığından yapının davranışı halen lineer hareket denklemi kullanılarak modellenenebilir. Lineer olmayan hasarda ise, yapı üzerinde oluşan hasar nedeniyle lineer davranış içerisinde olan yapının lineer olmayan bir davranış içerisine girmesi söz konusudur. Yapının dış yükler altındaki titreşimi sırasında zaman zaman açılıp kapanan yorulma çatlakları lineer olmayan hasara örnek olarak verilebilir. İyi bir hasar tespit yöntemi hem lineer hemde lineer olmayan özellikleri göz önünde tutabilmelidir. Literatürde yer alan çalışmaların büyük bir bölümü sadece lineer olan sistemler üzerinde yapılan çalışmalara yöneliktir.

Modal parametrelerin kullanılmasına dayanan, yapı hasarlarının tespidi konusunda detaylı bir araştırma 1979 yılında Richardson tarafından yapılmıştır (Richardson 1980). Bu araştırma daha çok büyük yapılar, nükleer santraller, açık deniz platformları ve makineler üzerinedir ve yapıların değişik bölümlerinin birlikte çalışmasının kontrolü (structural integrity), yapı üzerindeki titreşimleri sürekli izleme (long-term monitoring) ve modal özelliklerindeki değişikliklerin kontrolü safhalarından oluşmaktadır.

Birçok doktora çalışması sırasında hasar tespit ve bununla ilgili konularda birçok yayın incelenmiş ve birbirleriyle kıyaslanarak iyi ve kötü tarafları yayınlanmıştır (Rytter 1993), (Hemez 1993), Kaouk(1993), (Doebeling 1995). Mottershead ve Friswell hasar tespit konusunda oldukça sık kullanılan Dinamik Sonlu Elemanlar

güncellemesi (dynamic finite element updating) konusunda literatür araştırması yapmışlar ve sonuçlarını yayınlamışlardır (Mottershead ve diğerleri, 1993).

Sinir Ağları Yöntemlerinin (neural network methods) gelişmesiyle birlikte Bishop bu konu üzerinde araştırmalar yapmış ve 1994 yılında yayınlamıştır. Sinir ağları yöntemi'nin kullanılması özellikle tersinir problemlerde (inverse problems) oldukça etkilidir. Bu yüzden hasar tespit yöntemleri arasına girmiştir.

Yukarıda belirtildiği gibi hasar tespit konusu oldukça geniş bir alanı kapsamaktadır. Bunları sınıflandırmamız gerekirse; bölgesel hasar tespit ve global hasar tespit yöntemleri adları altında toplayabiliriz.

Rytter'in çalışmasında hasar tespit yöntemleri aşağıdaki gibi sınıflandırılmaktadır:

- **Sınıf 1** Yapı üzerinde hasarın olup olmadığının tespiti
- **Sınıf 2** Yapı üzerindeki hasarın geometrik yerinin belirlenmesi
- **Sınıf 3** Hasarın sınıfının belirlenmesi (severity of damage)
- **Sınıf 4** Yapının geri kalan servis ömrünün belirlenmesi

Sınıf 1 ve Sınıf 2 global hasar tespit ve test konusunun alt başlıklarını oluşturmaktadır. Sınıf 3 bölgesel hasar tespit ve test konusunun alt başlığıdır. Sınıf 4 ise can güvenliği, ekonomi ve işlevsellikle ilgilidir ve hasar tespit konusuyla doğrudan alakalı olmayan bir konudur.

Bu doktora çalışmasının amacı doğrultusunda sadece Sınıf 1 ve Sınıf 2 gözönünde tutulmuş ve mevcut hasar tespit yöntemlerine ek olarak etkin bir hasar tespit yöntemi geliştirilmiştir.

2 HASAR TESPİDİ İLE İLGİLİ LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde sunulan çalışmanın konusu ile ilgili literatürde yer alan ve şimdiye kadar yapılmış olan araştırma ve yayınlar incelenmiş, hasar tespидinde kullanılan ölçüm datasına ve/veya kullanılan tekniğe göre bir sıralama yapılmış ve sonuçlar bir tablo halinde özetlenerek sunulmuştur.

2.1 Frekans Değişimleri (Frequency changes)

Yapının doğal frekanslarındaki kaymaya (shift) dayalı yapı hasar tespitlerine literatürde çok rastlanmaktadır. Frekanstaki bu değişimler özellikle yapının hasar tespiti ve uzun süreli izlenmesinde kullanılmaktadır.

Ancak şu da göz ardı edilmemelidir ki, sadece frekans değişimini kullanarak yapıda hasar tespit etmek oldukça zordur. Bunun yapılabilmesi için çok hassas ölçümler gerekmektedir (Migliori ve diğerleri, 1993).

Ayrıca modal frekanslar yapının global özelliklerini yansıtmakta ve bu frekanslardaki değişim bölgesel hasarları saptamak için her zaman yeterli olamamaktadır. Örneğin, gerçekte hasar olmadığı halde, birkaç frekanstaki değişimin kombinasyonu değişik bölgelerde hasara işaret edebilmektedir. Oysa yüksek modlara ait frekanslardaki değişimler incelendiği zaman hasarla ilgili daha doğru sonuçlar alınmaktadır. Tabii ki bu durumda da yapıyı bu yüksek modlarda titreştirecek mekanizmayı seçmek önem kazanmaktadır.

2.1.1 İleri problem (The forward problem)

Bu tür hasar tespit yöntemi 1. Bölüm'de anlatılan hasar tespit sınıflarından Sınıf 1' e girmektedir. Hasar matematiksel olarak modellenmekte ve ölçülen frekanslar hesap sonucu bulunan frekanslarla kıyaslanarak, yapının üzerinde hasar bulunup bulunmadığı araştırılmaktadır.

Vandiver (1975, 1977), bir hafif açık deniz istasyon kulesindeki hasarı bulabilmek için yapının ilk iki eğilme modunun ve ilk burulma modunun frekanslarındaki değişimi kullanmıştır. Sonuç olarak tanklarına su dolması yüzünden yapının frekansının %1 mertebesinde değiştiğini saptamıştır. Ayrıca model üzerinde elemanları ardaşık olarak tek tek devreden çıkararak göçmeye neden olacak hasarın, frekansta %1 den daha büyük bir değişim meydana getireceğini tespit etmiş ve frekanstaki değişimi kullanarak hasar tespiti için yapılabileceğini göstermiştir.

Begg ve diğerleri (1976), açık deniz yapılarının ölçekli modeli üzerinde yaptığı çalışmalardan baskın frekansların %5' den %30' a kadar değiştiğini göstermiştir. North Sea platformuna eklenen ekstra bir çapraz elemanın, yapının frekansını %10 artırdığını gözlenmiş, ve bu çalışmalar sonucunda sadece frekanslardaki değişimden yola çıkarak yapıda meydana gelmiş hasarın yerinin tespit edilebilmesinin mümkün olmadığı sonucuna varılmıştır.

Loland ve Dodds (1976), açık deniz petrol platformunun öz frekanslarını, mod şekillerini ve mukabele spektrumunu (response spectrum) bu yapı üzerinde hasar tespiti için kullanmıştır. Frekanslardaki değişimlerin izlemesi için mod şekillerin kullanılması gerektiği görülmüştür. Platformun üzerindeki yüklere ve denize batma oranına göre frekanslardaki değişim %3 mertebelerinde olduğu belirlenmiştir. Platformda, göçme oluşturacak hasarlar verilip üzerinde yapılan testlerden elde edilen veriler ışığında frekanslarda %10-%15 mertebesinde değişim olduğu ve mukabele spektrumunun yapının uzun süreli izlenmesinde kullanılabileceği kanaatine varmışlardır.

Cawley ve Adams (1979a), kompozit elemanlarda frekans değişimlerini kullanılarak hasar tespiti için bir formülasyon üretmişlerdir.

Coppolino ve Rubin (1980), açık deniz platformu üzerinde hasar tespiti ile ilgili sayısal çalışmalar yapmışlardır. Yapı üzerindeki hasarın olması muhtemel bölgelerdeki elemanlara, model üzerinden frekanslarda %1-%2 mertebelerinde bir değişim oluşturacak şekilde sanal hasarlar verilmiş ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak bununla ilgili modal parametreler belirlenmiştir. Model üzerinden elde edilen bu sonuçlar yapıda ölçülen veriler ile kıyaslanmış ve buna dayanarak olası

hasarın hangi eleman üzerinde olduğu saptanmıştır. Ancak model üzerinde değişimin incelenmediği elemanlar üzerinde hasar belirlenememiştir.

Dugan ve diğerleri (1980), açık deniz platformlarının su seviyesinin üzerinde kalan kısmında gerçekleştirdikleri serbest titreşim ölçümlerini, yapının genel durumunun izlemek için kullanmışlardır. Bu çalışmanın amacını yapının değişik durumlarda (yükleme, ağırlık, onarım, vb) titreşim davranışının stabilitesinin incelenmesi oluşturmıştır. Yürütülen bu çalışma sonucunda hasarın, yapının mod şekillerindeki sırayı bozduğunu ve değişikliklerin daha iyi incelenebilmesi için mod şekillerinin takip edilmesi gerektiği kanaatine varmışlardır.

Crohas ve Lepert (1982), “vibro detection” adı verilen bir aleti açık deniz platformunun değişik elemanlarına monte etmişler ve bu alet ile eleman üzerinde bir girdi oluşturup elemanın buna karşı tepkisini ölçmüşlerdir. Frekans mukabele fonksiyonu (frequency response function) elemanlar üzerinden ölçülen ivme datalarına uygulanmıştır. Bu yolla elemanlar üzerinde yorulma çatlaklarından oluşan bir hasarın olup olmadığı tespit edilmiştir.

Gudmudson (1982), statik fleksibilite matrisi kullanarak kiriş elemanların üzerinde yorulma çatlağının modellenmesi ile ilgili bir teknik geliştirmiştir. Ayrıca Gudmudson, açılıp kapanan bir yorulma çatlağının, hep açık duran bir yorulma çatlağına göre frekans değerinde daha yavaş düşüşe neden olduğunu göstermiştir.

Nataraja (1983), açık deniz platformlarında yaptığı çalışmalar sonucunda, ölçülen ivme verilerinin yapının global değişimlerini göstermede kullanılabileceği ancak lokal hasarları belirlemede kullanılamıyacağı kanaatine varmıştır. Litaratürde Whitesome (1983) tarafından yapılmış olan benzer bir çalışmaya rastlanmaktadır.

Ismail ve diğerleri (1990), açık bir yorulma çatlağından kaynaklanan frekanstaki düşüşün açılıp kapanan bir çatlaktakinden daha fazla olduğunu göstermiştir. Gudmudson (1982), Ismail ve diğerleri (1990) tarafından yapılan bu çalışmalar sonucu açıklanan bu özellik birçok araştırmacının gözardı ettiği ve hatalı sonuçların üretilmesine neden olabilecek önemli bir bulgudur.

Oseguda ve diğeri (1992), açık deniz platformlarının küçük ölçekli modelleri üzerinde yaptıkları çalışmalardan, meydana gelen hasar nedeniyle yapının rezonans frekanslarının düştüğünü ancak bu düşüş oranının ölçümlerin standart sapmasından daha büyük olduğunu sonucuna varmışlardır. Frekansları izleyebilmek için ilgili modların çok iyi tayin edilmesi gerekliliğini vurgulamışlardır.

Chowdhury ve Ramirez (1992), beton ve betonarme kirişler üzerinde modal testler uygulamışlar ve sonuçlarını yayınlamışlardır. Yürüttükleri araştırmalarda simüle edilen hasar miktarına, taşıma gücünün değişmesine ve etki eden yükün değişimine göre rezonans frekanslarındaki değişimleri incelemişlerdir. Spektadaki değişimler incelenmesine rağmen, bu değişimler arasında hiç bir korelasyon kurulmaya çalışılmamış, sadece sonuçlar yayınlanmıştır.

Fox (1992), sayısal ve deneysel model kullanarak, kirişler üzerinde, testere dişi şeklindeki çentiklerden kaynaklanan hasarın oluşturduğu rezonans frekansların değişiminden hasar tespitinin başarılı bir şekilde yapılabilmesinin pek de mümkün olamayacağını göstermiştir.

Srinivasan ve Kot (1992), üzerinde delik şeklinde küçük bir hasar oluşturulduğu kabuk tipi yapılarda ölçülmüş modal parametrelerinin, bu tür hasarlara karşı olan duyarlılıklarını belirlemek için bir deneysel çalışma yürütmüşler ve elde ettikleri ölçümler sonucunda kabukların, bu tür hasarlardan kaynaklanacak rezonans frekanslarındaki değişimlere duyarsız olduğunu göstermişlerdir.

Pape (1993), hasarlı bölgelerin tayini için istatistiksel metod ve ölçülmüş doğal frekansları kullanan bir teknik önermiştir. Ancak bu teknik daha geliştirilmelidir.

Penny ve diğeri (1993), frekans değerlerindeki değişimlere göre, bütün olabilecek hasar durumlarını göz önünde tutarak hasarlı durumu en iyi şekilde simüle eden bir metod geliştirmiştir. Bu yöntem, ölçülen frekans değerleri, göz önüne alınan hasar durumlarına karşı gelen frekanslarla karşılaştırılarak en küçük kareler yöntemi yardımıyla minimum hatayı verecek şekilde saptanması şeklinde açıklanabilir.

Slater ve Shelly (1993), küçük yapılarda frekanslardaki değişimi kullanarak hasar tespiti konusunda yeni bir metot önermişlerdir. Bu teknikte filtreleme teknikleri geliştirilmiş ve frekansların değişimleri incelenmiştir.

Meneghetti ve Maggiore (1994), frekans kaymasını kullanarak giriş üzerindeki çatlağın durumunu veren hassasiyet formülasyonunu geliştirmişlerdir (sensitivity formulation). Analitik sonuçlar kullanılarak, yerel rijitlik matrisindeki değişimler frekanslardaki değişimlere göre çatlağın pozisyonunun bir fonksiyonu olarak çizilmiş ve bu işlem değişik modlar için yapılmıştır. Bu eğrilerdeki kesişim noktaları, çatlağın bulunduğu yerin bir göstergesi olarak kullanılmıştır.

Silva ve Gomes (1994), hasar tespit problemi için başka bir yöntem sunmuşlardır. Bu teknikte, çatlağın boyu ve yerine bağlı olarak frekanstaki değişim analitik olarak incelenmekte ve çatlak yer ve uzunluklarının kombinasyonları araştırılmaktadır. Bu kombinasyonlardan denklem 2.1 i minimize eden kombinasyon hasarın yerini ve miktarını gösterir.

$$Q_i = \frac{\omega_i^d}{\omega_i^u} \quad ; \quad R = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left[\frac{(Q_i)_x - (Q_i)_A}{(Q_i)_x} \right]} \quad (2.1)$$

Bu yöntemde en az iki mod kullanılmakta ve daha iyi sonuçlar için daha fazla mod kullanılması tavsiye edilmektedir.

Bu konuda çalışan diğer araştırmacılar arasında Whiteome and Dodds (1983), Tracy ve diğerleri (1989), Friswell ve diğerleri (1994), Man ve diğerleri (1994), Brinker ve diğerleri (1995b), Choy ve diğerleri (1995) isimleri sayılabilir.

2.1.2 Tersinir problem (Inverse problem)

Bu tür hasar tespit yöntemi 1. Bölüm'de anlatılan hasar tespit sınıflarından Sınıf 2 veya Sınıf 3' e girer. Frekans kaymalarından çatlağın boyu ve/veya yeri gibi hasar parametreleri saptanabilir.

Lifshitz ve Rotem (1969), titreşim ölçümleri kullanarak hasar tespiti konusunda ilk yayını yapmışlardır.

Adams ve diğerleri (1978) düzlem olarak düşünülen bir yapıdaki hasarın yerini, iki moduna ait rezonans frekanslarındaki değişimden yola çıkarak veren bir metod geliştirmişler ve bu çalışmada sadece ekstenel mod şekillerini dikkate almışlardır.

Heam ve Testa (1991), değişik modlar için doğal frekansların değişimini inceleyen bir hasar tespit yöntemi geliştirmişlerdir. Kütlenin değişmediği ve ikinci mertebe etkilerin ihmal edildiği bu yöntemde i'nci doğal frekanstaki değişim, global rijitlik matrisindeki değişim nedeniyle oluşmakta ve denklem 2.2' de tanımlandığı gibi belirlenmektedir.

$$\Delta\omega_i^2 = \frac{\{\phi_i\}^T [\Delta K] \{\phi_i\}}{\{\phi_i\}^T [M] \{\phi_i\}} \quad (2.2)$$

Global rijitlik matrisi $[K]$, eleman rijitlik matrisi $[k_n]$ ' ne dönüştürüldüğü ve eleman deformasyonları $\{\epsilon_N(\phi)\}$ mod şekillerinden hesaplandığı zaman, i moduna ait frekanstaki değişim aşağıdaki denklemdeki gibi tanımlanmaktadır:

$$\Delta\omega_i^2 = \frac{\sum_N \{\epsilon_N(\phi_i)\}^T [\Delta k_n] \{\epsilon_N(\phi_i)\}}{\{\phi_i\}^T [M] \{\phi_i\}} \quad (2.3)$$

bütün elemanlara ait rijitlik matrisleri hasardan etkilenmeyeceği için eleman rijitlik matrisindeki değişim;

$$[\Delta k_n] = [\alpha_n] [k_n] \quad (2.4)$$

olarak verilebilir. Eğer hasar sadece bir eleman ile sınırlı ise α_N bir skalere dönüşmekte ve 2.4 denklemi aşağıdaki şeklini almaktadır.

$$[\Delta k_n] = \alpha_n [k_n] \quad (2.5)$$

Böylece 2.3 denklemi 2.6 denklemine dönüşür

$$\Delta\omega_i^2 = \frac{\alpha_n \{\epsilon_N(\phi_i)\}^T [k_n] \{\epsilon_N(\phi_i)\}}{\{\phi_i\}^T [M] \{\phi_i\}} \quad (2.6)$$

Eğer iki doğal frekanstaki değişimlerin oranı sırasıyla $\Delta\omega_i$ ve $\Delta\omega_j$ olarak dikkate alınırsa, α_n formülasyondan düşer ve sadece hasarın yerini veren 2.7 denklemi elde edilir;

$$\frac{\Delta\omega_i^2}{\Delta\omega_j^2} = \frac{\left(\frac{\{\epsilon_N(\phi_i)\}^T [k_n] \{\epsilon_N(\phi_i)\}}{\{\phi_i\}^T [M] \{\phi_i\}} \right)}{\left(\frac{\{\epsilon_N(\phi_j)\}^T [k_n] \{\epsilon_N(\phi_j)\}}{\{\phi_j\}^T [M] \{\phi_j\}} \right)} \quad (2.7)$$

Denklem 2.7 her bir yapısal elemanda oluşan değişimin, frekanslar üzerindeki değişimini tanımlamaktadır.

Richardson ve Mannan (1992), hasarın sadece rijitlikteki değişime dayandığını benimseyen bakış açısıyla bir hasar tespit metodu geliştirmişlerdir. Bu metod yapının hasardan önceki mod şekillerine, hasardan önceki frekans ölçümüne ve hasardan sonraki frekans ölçümüne ihtiyaç duymaktadır. Araştırmacılar, hasarlı ve hasarsız yapının ortogonalite özellikleri kullanarak 2.8 denklemini türetmişlerdir.

$$\{\phi_i + \delta\phi_i\}^T [\delta K] \{\phi_i + \delta\phi_i\} + 2\{\delta\phi_i\}^T [\delta K] \{\phi_i\} + \{\delta\phi_i\}^T [\delta K] \{\delta\phi_i\} = (\omega_i^d)^2 - (\omega_i^u)^2 \quad (2.8)$$

Eğer mod şekillerindeki değişimin önemsenmeyecek kadar küçük olduğu düşünülürse, 2.8 deklemini;

$$\{\phi_i\}^T [\delta K] \{\phi_i\} = (\omega_i^d)^2 - (\omega_i^u)^2 \quad (2.9)$$

şeklini alır. Analoji ile rijitlik ve sönüm matrisleri için de benzer denklemler üretilmiştir. Bu yöntemde en büyük rijitlik değişimi, hasarın hemen yanında yerleştirilmiş olan ölçüm noktasında gözlenmektedir. Bu metodun dezavantajı, bilinmeyen sayısının fazla denklem sayısının az olmasıdır.

Narkin (1994), eğilme veya eksenel modlarına karşı gelen frekans ölçümlerini kullanarak, çatlak yerinin (çatlak boyu hariç) tespitinde kullanılmak üzere tersinir problemin kapalı formda çözümünü geliştirmiştir.

ARMA (Auto-Regressive Moving Avarage) modeli, Brincker ve diğerleri (1995a), tarafından geliştirilmiştir. Bu model, yapının modal parametrelerinin (rezonans frekansları, modal sönüm) bulunmasında kullanılmaktadır.

Uzgider ve diğerleri (1995), yapılarda bölgesel rijitlik değişimlerinin frekans ve mod şekilleri üzerindeki etkilerini dikkate alarak hasar yerinin saptanmasında kullanmıştır. Bu yöntemle hasarın bulunduğu yer belirlenebilmektedir ve bunun yanı sıra hasarın miktarı hakkında da bilgi sahibi olunabilmektedir. Yöntem, gözönüne alınan yapının her bir bölgesinde teker teker oluşturulan değişimin mod şekilleri ve frekanslar üzerindeki etkilerini belirledikten sonra yapının test sonuçlarından elde edilmiş bilgileri kullanarak ölçülen frekans ve mod şekilleri arasında minimum fark olacak şekilde optimizasyon tekniklerini kullanılarak çözüme gitmektedir.

Skjaerbaek ve diğerleri (1996), ARMA modelini kullanarak, çok katlı betonarme çerçeve bir yapının en üst katından aldığı ölçümler yardımıyla hasarın yerini ve miktarını belirlemek için bir yöntem geliştirmiştir.

Bu konuda yapılan diğer çalışmalara; Wang ve Zhang (1987), Stubbs ve diğerleri (1990), Stubbs ve Osegueda (1990a, 1990b), Sanders ve diğerleri (1992), Balis ve diğerleri (1995) tarafından yapılan çalışmalar örnek olarak verilebilir.

2.1.3 Mod şekli değişimleri (Mode shape changes)

West (1984), SEY (Sonlu Elemanlar Yöntemi) kullanılmadan yapıdaki hasarın yerinin saptanmasının mod şekilleri kullanarak nasıl mümkün olduğunu göstermiştir. Bunun için Modal Güvenirlilik Kriteri (MAC ~ Modal Assurance Criteria) olarak adlandırılan bir algoritma geliştirmiş (denklem 2.10) ve uzay gemilerinin flaplarının hasarsız duruma ait mod şekilleri ile akustik yüklemeye maruz kalmış flapların mod şekilleri arasındaki korelasyon miktarını bulmak için kullanmıştır. Bu miktar aynı zamanda hasarın yerinin belirlenmesinde de kullanılmaktadır.

$$MAC(\{\phi_i\}, \{\phi_j\}) = \frac{|\{\phi_i\}^T \{\phi_j\}|^2}{(\{\phi_i\}^T \{\phi_i\})(\{\phi_j\}^T \{\phi_j\})} \quad (2.10)$$

Yuen (1985), denklem 2.11'i kullanarak mod şekillerindeki ve mod şekli eğim parametrelerindeki değişimi incelemiştir.

$$\begin{aligned} \{\phi^*\}_i &= \frac{\{\phi^d\}_i}{\omega_i^d} - \frac{\{\phi^u\}_i}{\omega_i^u} \\ \{\phi^*\}_i &= \frac{\{\phi^d\}_i}{\omega_i^d} - \frac{\{\phi^u\}_i}{\omega_i^u} \end{aligned} \quad (2.11)$$

Bu parametrelerdeki değişim yapının her elemanının rijitliğindeki azalma olarak simüle edilmektedir. Hesap sonucu bulunan değerler, ölçülen değerlerle hasarın yerinin belirlenmesi amacıyla kıyaslanmaktadır.

Fox (1992), testere dişi şeklinde kesilerek hasar verilmiş kirişten elde edilen frekans ve mod şekillerinin MAC kullanılarak hasar tespидinin kolay olmadığını göstermiştir. Bunun yerine “Node Line MAC” denilen algoritmanın daha hassas sonuç verdiğini belirlemiştir.

Kam ve Lee (1992), frekans ve mod şekillerindeki değişimden yararlanarak bir çatlağın yerini ve büyüklüğünü tayin etmek üzere kullanılabilecek analitik bir formül önermişlerdir.

Kim ve diğerleri (1992), MAC ve MAC ın varyasyonlarını kullanarak hasarın yerinin bulunmasında önemli adımlar kaydetmişlerdir. PMAC (Partial MAC) ve COMAC'ı (COordinate MAC ~ denklem 2.12) bir arada kullanarak yapı üzerindeki hasarın yerini belirlemişlerdir.

$$\text{COMAC} \left(\{\phi^u\}_L, \{\phi^d\}_L, q \right) = \frac{\left(\sum_{L=1}^{L_{\max}} \left| \left(\phi_q^u \right)_L \left(\phi_q^u \right)_L \right| \right)^2}{\left(\sum_{L=1}^{L_{\max}} \left(\phi_q^u \right)_L^2 \right) \left(\sum_{L=1}^{L_{\max}} \left(\phi_q^d \right)_L^2 \right)} \quad (2.12)$$

Sirinavasan ve Kot (1992), yaptıkları çalışma ile, kabuk yapılarda mod şekillerindeki değişimin frekanslardaki değişimlere göre hasarı belirlemede daha hassas olduğunu göstermişlerdir. Yürüttükleri çalışmada hasarlı ve hasarsız yapı arasındaki korelasyonun belirlenmesinde MAC değerleri kullanılmıştır.

Ko ve diğerleri (1994), MAC, COMAC ve hassasiyet analizi kombinasyonunu algoritmalarını kullanarak çelik çerçeve yapılarda hasar belirleme yöntemi geliştirmişlerdir. Hasarsız yapıdan elde ettiği mod şekilleri ile hasarlı yapıdan elde ettiği mod şekillerinden, MAC algoritmasını kullanarak, hangi mod şekillerini analitik hesaplarda çift olarak kullanılacağını belirlemiştir. Çalışmanın sonunda doğru seçilmemiş modlardan elde edilen sonuçların, hasarın yerini belirlemede ne kadar etkisiz kaldığını gösterilmiştir.

Bu konuda çalışan diğer araştırmacılara; Rizos ve diğerleri (1990), Osegueda ve diğerleri (1992), Mayes (1992), Salawu ve Williams (1994), Lam ve diğerleri (1995), Salawu (1995), Pandey ve diğerleri (1991), Stubbs ve diğerleri (1992), Chance ve diğerleri (1994), Dong ve diğerleri (1994), Kondo ve Hamamoto (1994), Salawu ve Williams (1994), Nwosu ve diğerleri (1995) örnek verilebilir.

2.2 Dinamik Olarak Ölçülen Fleksibiliteye Dayanan Yöntemler

Hasar tespit yöntemlerinden bir başkası da, yapının statik davranışındaki değişiklikleri gösteren, dinamik olarak ölçülen, fleksibilite matrisini kullanır. Fleksibilite matrisi yapının rijitlik matrisinin tersidir ve fleksibilite matrisi etki eden kuvvet ve yapı üzerinde oluşan yerdeğiştirmeleri birleştirir.

$$\{u\} = [G]\{F\} \quad (2.13)$$

Sonuç olarak fleksibilite matrisindeki her kolon ilgili serbestlik derecesine karşı gelen birim yüklemeden oluşan deplasmanları içerir. Fleksibilite matrisi, kütlesi normalize edilmiş sistemin mod şekilleri ve frekansları kullanılarak denklem 2.14 yardımı ile hesaplanabilir.

$$[G] = [\phi][\Lambda]^{-1}[\phi]^T \quad (2.14)$$

Denklem 2.14 den elde edilecek olan fleksibilite matrisi tahmin edilebileceği gibi yaklaşıktır. Bunun nedeni az sayıda (büyük ihtimalle ilk birkaç mod) mod şekli ve frekans değerlerinin kullanılmasıdır.

Hasar görmemiş yapıya ait, genellikle sonlu elemanlar programlarından biri kullanılarak elde edilen fleksibilite matrisi ile, hasar görmüş yapıda yapılan ölçümler sonucu elde edilmiş mod şekilleri ve frekanslar kullanılarak elde edilen fleksibilite matrisi birbirleri ile kıyaslanarak hasarın yeri tahmin edilir. Ölçülen frekansların tersi ile olan orantı yüzünden küçük frekanslı modlardaki değişimlere bu yöntem oldukça hassastır.

2.2.1 Fleksibilite değişiminin kıyaslanması

Aktan ve diğerleri (1994), ölçümler sonucu elde edilmiş fleksibilite matrisini, köprülerin hali hazır durumlarının indekslenmesi için kullanmıştır. Bu yöntemi iki köprü üzerine denemişler ve ölçülen fleksibilite ile bir dizi kamyon yüklemesi altında elde edilen deformasyon ve statik veriler kullanılarak elde edilen fleksibilite matrisini kıyaslamışlardır.

Pandey ve Biswas (1994), hasar ve yerinin belirlenmesi için yapının ölçülerden elde edilen verilerin kullanılmasıyla hesaplanan fleksibilite matrisini kullanan bir metod geliştirmişlerdir. Bu metodu, birkaç nümerik örneğe uygulamışlar, nümerik ve deneysel çalışmaların sonucunda, hasarın miktarını ve yerini belirlemek için yapının ilk iki modunun yeterli olduğunu göstermişlerdir.

Mayes (1995), bir köprü üzerinde yapılmış modal test sonuçlarını işleyerek elde ettiği fleksibilite matrisini hasarın yerini belirlemede kullanmıştır.

Jun ve diğerleri(1999), yapıdaki mevcut hasarın tespitinde modal fleksibilitenin frekans ve mod şekillerine oranla daha etkin olduğunu göstermişlerdir.

Bu konuda çalışan diğer yazarlara ve araştırmacılara; Toksoy ve diğerleri (1994), Peterson ve diğerleri (1995), Zhang ve Aktan (1995) örnek verilebilir.

2.2.2 Teklik kontrolü (Unity check method)

Teklik kontrolü metodu, dinamik olarak ölçülmüş değerlerden yararlanarak hesaplanmış fleksibilite matrisi ile yapının rijitlik matrisi arasındaki tersinir (pseudoinverse) ilişkiye dayanır. Bir hata matrisi denklem 2.15 deki gibi tanımlanır.

$$[E] = [G^d] - [K^u] \quad (2.15)$$

Bu hata fleksibilite ve rijitlik matrisi arasındaki ilişkinin ne kadar olduğunu verir ve hata miktarı ne kadar küçük ise sistem o kadar hasarsızdır.

Lin (1990, 1994), teklik kontrol metodunu geliştirip hasar bulma probleminde kullanmıştır. Denklem 2.15'i en küçük kareler yöntemini uygulayabilecek şekilde geliştirmiş ve ardışık çözümler yardımıyla hasarın yerini bulmuştur.

2.2.3 Rijitlik hata matrisi yöntemi (Stiffness error-matrix method)

Rijitlik hata matrisi yöntemi, yapının fleksibilite matrisinin değişimine ve hasarsız yapının rijitlik matrisinin fonksiyonu olan hata matrisinin hesaplanmasına dayalı bir yöntemdir. Rijitlik hata matrisi denklem 2.16 daki gibi düzenlenir:

$$[E] = [K^u] [\Delta G] [K^u] \quad (2.16)$$

$$[\Delta G] = [G^d] - [G^u] \quad (2.17)$$

He ve Ewins (1986), rijitlik hata matrisini, ölçülmüş parametreler, analitik rijitlik ve kütle matrisi arasındaki hatanın bir göstergesi olarak kullanmışlardır. Hasar tespiti için rijitlik matrisinin genellikle kütle matrisinden daha fazla bilgi içermesinden dolayı, birçok araştırma sırasında sadece rijitlik matrisi kullanılmış ve kullanılmaktadır.

Bu konuda çalışan diğer yazarlara ve araştırmacılara; Gysin (1986), Park ve diğerleri (1988) örnek verilebilir.

2.2.4 Residual fleksibilitenin etkileri

Residual fleksibilite matrisi $[G_r]$, ölçülen modların bant genişliği dışında kalan diğer modların etkisini gösterir. Böylece hesaba alınmamış diğer modların etkileri belirler ve gerçek fleksibilite matrisi denklem 2.18' deki gibi oluşturulur.

$$[G] = [\phi][\Lambda]^{-1}[\phi]^T + [G_r] \quad (2.18)$$

Doebeling ve diğerleri (1995, 1996) ve Debling (1995), yürüttükleri araştırmalar sonucunda fleksibilite matrisinin bu şekilde hesaplanması ile, daha hassas ve detaylı sonuçlar alınabileceğini göstermişlerdir.

2.2.5 Ölçülmüş rijitlik matrisindeki değişimler

Dinamik olarak ölçülen değerlerden yararlanılarak hesaplanmış fleksibilite matrisi yöntemlerinden biri de dinamik olarak ölçülen verilerden yararlanılarak hesaplanan rijitlik matrisi yöntemidir. Benzer şekilde dinamik olarak kütle ve sönüm matrisleri de hesaplanabilir. Salawu ve Williams (1993) ölçülen parametre matrislerini hasarın yerinin tespitinde kullanmışlardır.

Wang ve diğerleri (1994), titreştirici kuvveti bilinmeyen bir yapının üzerinde hasar tespiti için rijitlik matrisi değişimi tekniğini kullanmışlardır. Yapının üzerinden yapılan ivme, hız ve yerdeğiştirme ölçümleri kullanılarak rijitlik matrisi saptanmış ve orijinal rijitlik matrisi ile kıyaslanarak hasarın yeri belirlenmiştir

2.3 Matris Güncelleme Yöntemleri (Matrix Update Methods)

Diğer bir hasar tespit yöntemini de, kütle, rijitlik ve sönüm matrislerinin ardışık olarak güncellenmesi (değiştirilmesi) yoluyla ölçülmüş statik ve dinamik tepkilere en yakın cevabı verecek değerlerin bulunması oluşturmaktadır. Yöntemde değişik optimizasyon teknikleri uygulanmaktadır. Bu yöntemde uygulanan adımlar;

1. Minimize edilecek hedef fonksiyonun belirlenmesi (object function),
2. Sınır değerlerinin belirlenmesi (constraints),
3. Başlangıç koşullarının tayin edilmesidir.

Ghee ve diğerleri (1995), bölgeser hasar tespitinde indirgenmiş matrisleri kullanmışlardır. 12 katlı bir model üzerindeki çalışmaları sırasında 12. kata konulan eksantrik kütleli titreştirici ile yapıya kuvvet uygulanmış alınan ölçümler kullanılarak hedef fonksiyonu sağlanana kadar rijitlik matrisi sürekli güncelleştirilmiştir. Sonuç olarak yöntem hasarın varlığını ve yerini verebilmektedir. Ancak bu çalışma sırasında kullanılan kütle matrisi yayılı değildir.

2.3.1 Hedef fonksiyon ve sınırlamalar

Matris güncelleme probleminde kullanılan bir çok fonksiyon ve sınırlamalar vardır. Hareket denklemi bunların en başında gelir ve n-serbestlik dereceli bir sistem için;

$$[M^u] \{\ddot{x}\} + [C^u] \{\dot{x}\} + [K^u] \{x\} = \{f\} \quad (2.19)$$

yazılır. Denklem 2.19 özdeğerler için yazıldığında denklem 2.20 şeklini alır.

$$\left((\lambda_i^u)^2 [M^u] + (\lambda_i^u) [C^u] + [K^u] \right) \{\phi^u\}_i = \{0\} \quad (2.20)$$

Bu denklemde bulunan λ_i^u ve $\{\phi^u\}_i$ hasarsız yapının ölçülmüş i nci özdeğer ve öz vektörüdür. Denklem 2.20'nin bütün ölçülmüş modlar için geçerli olduğu kabul edilir.

Hasarlı yapının özdeğer ve öz vektörleri denklem 2.20' de yerlerine yerleştirilirse;

$$\left((\lambda_i^d)^2 [M^u] + (\lambda_i^d) [C^u] + [K^u] \right) \{\phi^d\}_i = \{E\}_i \quad (2.21)$$

elde edilir. Bu denklemle $\{E_i\}$, hasarlı yapının i' nci moduna ait artık kuvvete (residual force) karşı gelir. Ojalvo ve Pilon (1988) bu vektörü şöyle tariflemişlerdir; $[M^u]$, $[C^u]$, $[K^u]$ ile tariflenen hasar görmemiş yapıya frekansı λ_i^d olan öyle bir kuvvet etki ettirilmelidir ki yapı buna $\{\phi^d\}_i$ mod şeklinde bir tepki gösterebilir.

Hasar görmüş yapıya ait $[M^d]$, $[C^d]$, $[K^d]$, analitik model matrislerinin hesaplanması için birkaç yöntem vardır. Denge durumundan;

$$\left((\lambda_i^d)^2 [M^d] + (\lambda_i^d) [C^d] + [K^d] \right) \{\phi^d\}_i = \{0\} \quad (2.22)$$

yazılabilir. Hasarlı sistemin elemanları denklem 2.23' de tariflendiği gibi alınıp denklem 2.22' de yerine konulduğunda ilk önce denklem 2.24 daha sonra denklem 2.25 elde edilir.

$$\begin{aligned} [M^d] &= [M^u] - [\Delta M] \\ [C^d] &= [C^u] - [\Delta C] \\ [K^d] &= [K^u] - [\Delta K] \end{aligned} \quad (2.23)$$

$$\left((\lambda_i^d)^2 [M^u - \Delta M] + (\lambda_i^d) [C^u - \Delta C] + [K^u - \Delta K] \right) \{\phi^d\}_i = \{0\} \quad (2.24)$$

$$\left((\lambda_i^d)^2 [M^u] + (\lambda_i^d) [C^u] + [K^u] \right) \{\phi^d\}_i = \left((\lambda_i^d)^2 [\Delta M] + (\lambda_i^d) [\Delta C] + [\Delta K] \right) \{\phi^d\}_i \quad (2.25)$$

Denklem 2.25 in sol tarafını daha önceden denklem 2.21 olarak elde etmiştik. Bunu denklem 2.25 de yerine yerleştirirsek denklem 2.26 elde edilir;

$$\left((\lambda_i^d)^2 [\Delta M] + (\lambda_i^d) [\Delta C] + [\Delta K] \right) \{\phi^d\}_i = \{E\}_i \quad (2.26)$$

Değişik optimizasyon teknikleri ile bu denklem çözülebilir. Böylece kütle matrisindeki , sönüm matrisindeki ve/veya rijitlik matrisindeki değişimler, ve bunlara bağlı olarak hasar ve yeri saptanabilir.

2.3.2 Optimum matris güncellemesi yöntemi (Optimal matrix update method)

Bu yöntem hasarlı model matrislerinin kapalı bir formda hesaplanmasıdır ve optimum matris güncelleme yöntemi adını alır. Bu konuda Smith ve Beattie (1991a), Zimmerman ve Smith (1992), Hemez (1993) ve Kaouk (1993) araştırmalar yapmış ve ürettikleri bilgileri yayınlamışlardır. Problem genellikle Langrange çarpanı veya bölgesel optimizasyon olarak formüle edilmiştir;

$$\min_{\Delta M, \Delta C, \Delta K} = \{J(\Delta M, \Delta C, \Delta K) + \lambda R(\Delta M, \Delta C, \Delta K)\} \quad 2.27$$

Burada J hedef fonksiyon (objective function), R sınırlama fonksiyonu (constraint function) ve λ da Langrange çarpanıdır.

Karmer (1988) ve Brock (1968) bu minimizasyon formülasyonunu kullanarak hasarın yerinin tespit edilebileceğini göstermişlerdir. Sınırlama olarak matrislerin simetrisini kullanmışlardır.

McGowan ve diğerleri (1990) rijitlik matrisine iyileştirme algoritması uygulayarak hasarı tespit etmişlerdir. Matris üzerindeki değişiklikler yapı üzerinde bulunan birkaç ölçüm aletinden alınan datanın kullanılması ile elde edilen mod şekillerinin diğer serbestliklere extrapole edilmesiyle yapılmaktadır.

Smith ve Beattie (1991) bu formulasyonu biraz daha geliştirmiş ve matris içinde sıfırdan farklı olan M_{ij} elemanlarının her zaman şekil olarak matris içinde aynı kalma koşulunu yani Sparsity Constraint' i tanımlamışlardır.

Smith (1992), kendi çalışmalarına iteratif bir yaklaşım getirmiş ve optimum matris probleminin çözümünü değiştirmiştir. Rijitlik matrisini güncellerken matrisin sparsity formuna göre matris içindeki elemanları bir veya sıfır ile çarpıp işlemlerde kullanmış veya kullanmamıştır. Böylece denklem içerisindeki bilinmeyenlerin sayısı azalmıştır.

Doebbing (1996), global veya eleman bazında rijitlik matrisini hesaplamak yerine eleman parametre vektörü için minimum rank güncelleme yöntemine dayanan hasar tespit yöntemi geliştirmiştir. Yöntemde sadece koşullar (sınırlamalar) değiştirilmekte ve temel koşul olarak da global rijitlik matris pertürbasyonu $[\Delta K]$, diagonal eleman rijitlik parametrelerinin $[\Delta P]$ pertürbasyonunun bir fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır.

$$[\Delta K] = [A][\Delta P][A]^T \quad (2.28)$$

denklem 2.28' de $[A]$ statik hassasiyet matrisidir (static sensitivity matrix).

Bu konuda çalışan diğer araştırmacılara; Baruch ve Bar Itzhack (1978), Kabe (1985), Berman ve Nagy (1983), Chen ve Garba (1988a, 1988b), Linder ve diğerleri (1993), Liu (1995), Zimmerman ve Kaouk (1994, 1994a, 1994b), Zimmerman ve Simmermacher (1994, 1995), Kaouk ve Zimmerman (1995a), Zimmerman ve diğerleri (1995a, 1995b) örnek verilebilir.

2.3.3 Duyarlılık analizlerine dayalı güncelleme yöntemleri (Sensitivity-based updat methods)

Diğer bir matris güncelleme yöntemi de, matris pertürbasyonunun hata fonksiyonunun birinci derece Taylor serisine açılıp, minimize edilmesine dayanmaktadır. Bu tür teknikler hassasiyete dayalı güncelleme yöntemleri olarak adlandırmaktadır. Hemez (1993) bu tekniklerle ilgili oldukça geniş bilgiler vermiştir. Burada genel amaç, geliştirilmiş (düzeltilmiş) parametre vektörünün elde edilmesidir.

$$\{p\}^{(n+1)} = \{p\}^{(n)} + \{\delta p\}^{(n+1)} \quad (2.29)$$

$\{\delta p\}^{(n+1)}$ parametre pertürbasyon vektörü, $J(\{p\})$ hata fonksiyonudur. Yöntem hata fonksiyonunun minimizasyonuna dayanmakta, sonuçlar Newton Raphson iterasyon probleminin çözümünden elde edilmektedir;

$$J(\{p\}^{(n)} + \{\delta p\}^{(n+1)}) = J(\{p\}^{(n)}) + \left[\frac{\partial J}{\partial p}(\{p\}^{(n)}) \right] \otimes \{\delta p\}^{(n+1)} = 0 \quad (2.30)$$

Benzer bir hata fonksiyonu 2.21 denkleminde de gösterilmiştir.

Duyarlılığa dayalı güncelleme metotları arasındaki en büyük fark, hassasiyet (duyarlılık) matrisinin hesaplanış şeklindedir. Deneysel veya analitik olarak hesaplanabilmektedir. Örneğin deneysel olarak hesaplanacak hassasiyet matrisinde, ortagonallik bağıntıları;

$$\begin{aligned} [\phi]^T [M] [\phi] &= [I] \\ [\phi]^T [K] [\phi] &= [\Lambda] \end{aligned} \quad (2.31)$$

modal parametre türevlerinin $[\partial \omega^2 / \partial p]$ ve $[\partial \phi / \partial p]$ hesaplanmasında kullanılmaktadır. Buna benzer bir yaklaşım Norris ve Meirovitch (1989), Haug ve Choi (1984) ve Chen ve Garba (1908) tarafından kullanılmıştır.

Analitik hassasiyet methodu genellikle $[\partial M / \partial p]$ ve $[\partial K / \partial p]$ türevlerinin hesaplanmasını gerektirmektedir ki, bunlar kayıtların içindeki mevcut gürültüye ve parametrelerin büyük pertürbasyonlarına deneysel hassasiyet matrisinden daha az duyarlıdır. Hemez (1993) bununla ilgili değişik çalışmalar yapmıştır.

Sanayei ve Onipede (1991), statik yük-yerdeğiştirme test sonuçlarını kullanarak sonlu elemanlar yöntemindeki rijitlik karakterlerinin güncelleştirilmesinde bir teknik geliştirmişlerdir. Uygulanan kuvvet ile ölçülen yerdeğiştirmenin yapı üzerine sonradan tekrar uygulanması sonucu ortaya çıkan kuvvet arasındaki hatanın minimize edilmesinde hassasiyete dayalı (sensitivity-based) eleman bazında parametre güncellemesi kullanılmıştır. Bu çalışmada hassasiyet matrisi analitik olarak hesaplanmıştır.

Benzer bir çalışmada Sanayei ve diğerleri (1992), datadaki gürültünün etkisini incelemişlerdir.

Bu konuda çalışan diğer araştırmacılara; Ricles (1991), Hemez (1993) örnek verilebilir.

2.3.4 Özdeğer atama yöntemi (Eigenstructure assignment method)

Bir başka matris güncelleme metodu da, modal kuvvet hata fonksiyonunu sanal (fictitious) bir kontrol mekanizması yardımı ile minimize etmeye dayanmaktadır. Lim (1994, 1995) bu yöntemi basitleştirmiştir.

$$\begin{aligned} [M^u] \{\ddot{x}\} + [C^u] \{\dot{x}\} + [K^u] \{x\} &= [F] \{u\} \\ \{u\} &= -[G][F]^T \{x\} \end{aligned} \quad (2.32)$$

Kontrol katsayıları öyle seçilmelidir ki, hasarlı yapıdan ölçülmüş modal parametreler ile analitik modelden elde edilmiş parametreler arasındaki hata fonksiyonu sıfır veya sıfıra çok yakın olsun.

$$\left((\lambda_i^d)^2 [M^u] + (\lambda_i^d) [C^u] + [K^u + FGF^T] \right) \{\phi^d\}_i = \{0\} \quad (2.33)$$

$$L_{ij} = \left((\lambda_i^d)^2 [M^u] + (\lambda_i^d) [C^u] + [K^u] \right)^{-1} [F]_j [F]^T \quad (2.34)$$

En uygun özvektörler, denklem 2.33 , 2.34 ve 2.35 yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$\{\phi_a^d\}_i = L_{ij} L_{ij}^+ \{\phi^d\}_i \quad (2.35)$$

En uygun özvektörler ile ölçümlerden elde edilen özvektörler arasındaki ilişki hasarın yerinin tespitinde kullanılmaktadır.

Zimmerman ve Kaouk (1992), çalışmalarında hasarın yerinin tespitinde bu tekniği kullanmış ve geliştirmişlerdir.

Lindner ve Goff (1993), her bir eleman için hasar katsayısı tanımlamışlardır. Bu katsayıların bulunmasında özdeğer benzeşim yöntemini kullanmışlardır.

Bu konuda çalışan diğer araştırmacılara; Lim (1994, 1995) ve Schulz ve diğerleri (1996) örnek verilebilir.

2.3.5 Hibrid matris güncelleme yöntemleri

Baruh ve Ratan (1993) residual modal kuvveti hasarın yerini belirleyici (indicator) olarak kullanmışlardır. Çalışmalarında, residual modal kuvvetleri parçalara ayırmışlardır. Bu parçalar ölçüm sırasındaki hataların etkileri, modelleme sırasındaki hataların etkileri ve hasardan kaynaklanan modal kuvvet farklarıdır. Hasarın yerinin saptanması sırasında orjinal modeldeki hata ile modal parametrelerin belirlenmesi sırasında nümerik hesaplardan kaynaklanan hatalar arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir.

Kim ve Bartkowicz (1993, 1994) ve Kim ve diğerleri (1995a) büyük yapılar için iki adımdan oluşan hasar tespit yöntemi geliştirmişlerdir. Birinci adımda optimum matris güncelleme tekniği ile hasarın bulunduğu bölgeyi belirlemişler, ikinci adımda ise hassasiyete dayalı matris metodunu kullanarak o bölgedeki hasarlı elemanı saptamışlardır. Bu yöntemin önemli bir avantajı ilk adımda hasarlı bölgenin bulunması ve ardından az sayıda ölçüm aleti yerleştirerek gerçek hasarlı elemanın bulunmasıdır. Dezavantajı, işlemlerin ve testin uzun zaman almasıdır.

Li ve Smith (1994, 1995) hasarın belirlenmesinde hibrid model güncelleme tekniğini kullanmışlardır. Bu teknikte hassasiyet ve optimum güncelleme metodlarının kombinasyonu kullanılmıştır.

Bu konuda çalışan diğer araştırmacılara; Dos Santos ve Zimmerman (1996a, 1996b), Gafka ve Zimmerman (1996) örnek verilebilir.

2.4 Lineer Olmayan Yöntemler

Actis ve Dimarogonas (1989) üzerinde açılıp kapanan bir çatlak olan kirişi sonlu elemanlar yöntemiyle modellemeyi başarmışlardır. Çatlağın hareketini eğilme momentinin işaretine göre tanımlamışlar ve mod şeklini anlamlı olacak kadar değiştirmedigini belirlemişlerdir.

Lin ve Ewins (1990) yapının lineer davranış göstermeyen bölgesinin belirlenmesinde modal test datasının kullanılarak saptanması için bir yöntem teklif etmişlerdir. Bu yöntemin dayandığı ana fikir, yapının değişik noktalarından kaydedilen modal test datası yardımı ile modelin güncelleştirilmesidir.

İki değişik cevap seviyesi için hata matrisi yazılacak olursa denklem 2.36 elde edilir.

$$\begin{aligned} \left((\lambda_i^a)^2 [M + \Delta M] + [K + \Delta K] \right) \{\phi^a\}_i &= \{0\} \\ \left((\lambda_i^b)^2 [M + \Delta M] + [K + \Delta K + \Delta K_n] \right) \{\phi^b\}_i &= \{0\} \end{aligned} \quad (2.36)$$

$\lambda_i^a, \{\phi^a\}_i, \lambda_i^b, \{\phi^b\}_i$ i moduna ait özdeğer ve özvektörlerdir. Matris pertürbasyonu $[\Delta M]$ ve $[\Delta K]$ SEY modeldeki hatadır. $[\Delta K_n]$ nonlineerliği tanımlamaktadır. Denklem 2.36'yı $\{\phi^a\}_i, \{\phi^b\}_i$ ile çarpıp (2.36' deki 2. ve 1. denklemleri sıra ile) ve gerekli kısaltmaları yaptığımızda denklem 2.37 elde edilir.

$$\begin{aligned} & [\Delta M] \left((\lambda_i^b)^2 \{\phi^b\}_i \{\phi^a\}_i^T - (\lambda_i^a)^2 \{\phi^a\}_i \{\phi^b\}_i^T \right) \dots \\ & \dots + [\Delta K] \left(\{\phi^b\}_i \{\phi^a\}_i^T - \{\phi^a\}_i \{\phi^b\}_i^T \right) + [\Delta K_n] \left(\{\phi^b\}_i \{\phi^a\}_i^T \right) \dots \\ & \dots = \left((\lambda_i^a)^2 [M] + [K] \right) \{\phi^a\}_i \{\phi^b\}_i^T - \left((\lambda_i^b)^2 [M] + [K] \right) \{\phi^b\}_i \{\phi^a\}_i^T \end{aligned} \quad (2.37)$$

Eşitliğin sağ tarafına $[A]$ denir ve sadeleştirme yapılırsa denklem 2.37, denklem 2.38 şekline gelir;

$$\begin{aligned}
\{\phi^b\}_i \{\phi^a\}_i^T - \{\phi^a\}_i \{\phi^b\}_i^T &= 0 \\
(\lambda_i^b)^2 \{\phi^b\}_i \{\phi^a\}_i^T - (\lambda_i^a)^2 \{\phi^a\}_i \{\phi^b\}_i^T &= 0 \\
[\Delta K_n] \{\phi^b\}_i \{\phi^a\}_i^T &= [A]
\end{aligned} \tag{2.38}$$

Sonuç olarak $[\Delta K_n]$, ölçülmüş değerlere dayanarak hesaplanmış $[A]$ matrisi kullanılarak hesaplanabilir.

Bu konuda çalışan diğer araştırmacılara; Shen ve Chu (1992), Chu ve Shen (1992), Krawczuk ve Ostachowicz (1992), Huang ve Gu (1993), Manson ve diğerleri (1993), Klein ve diğerleri (1994), Surace ve Ruotolo (1994), Feldman ve Braun (1995), Crespo ve diğerleri (1996), Prime ve Shevitz (1996) örnek verilebilir.

2.5 Sinir Ağına Dayalı Metodlar

Son yıllarda karmaşık yapılarda hasarın miktarı ve yerinin belirlenmesi konularında sinir ağlarına dayalı metodları kullanmaya yönelik ilgi giderek artmıştır. Kompleks fonksiyonların yaklaşık çözümlerinde sinir ağı uygulamaları oldukça başarılı sonuçlar vermiştir. Bishop (1994) sinir ağları konusunda genel bir yayın yapmıştır. Sinir ağları en fazla, çok katmanlı ve tersinir öğrenmeli sistemlerde kullanılmaktadır.

Maria ve diğerleri (1999), geliştirilmiş kompozit mantolarla güçlendirilmiş betonarme kolonlar üzerinde hasar tespit çalışmaları yapmışlardır. Titreştirici mekanizma olarak sarsma talblosu kullanmışlardır. Ölçülen titreşim karakteristiklerine dayanarak rijitlik değişimlerini sinir ağları metoduyla saptamışlardır.

Bu konuda çalışan diğer araştırmacılara; Kudva ve diğerleri (1991), Wu ve diğerleri (1992), Elkordy ve diğerleri (1993), Leath ve Zimmerman (1993), In Spillman ve diğerleri (1993), Worden ve diğerleri (1993), Yen ve Kwak (1993), Kirkgaard ve Rytter (1994), Manning (1994), Povich ve Lim (1994), Rhim ve Lee (1994), Stephens ve VanLuchene (1994), Szwerczyk ve Hajela (1994), Tsou ve Shen (1994), Barai ve Pandey (1995), In ceravolo ve De Stefano (1995), Kirkegaard ve diğerleri (1995), Klenke ve Paez (1996), Schwarz ve diğerleri (1996) örnek verilebilir.

2.6 Diğer Yöntemler

Bu gruba, diğer gruplara dahil edilemeyen ancak titreşim bazlı data yardımı ile hasar tespitine olanak sağlayan metodlar girmektedir.

Yang ve diğerleri (1980, 1984), hasar tespiti için rastgele artım tekniğini kullanmışlardır. Afolabi (1987) rezonans piklerindeki değişim yerine anti-rezonans piklerindeki değişimin kullanılmasını önermiştir. Lee ve diğerleri (1987) kompozit yapılarda hasar tespiti için sönümdeki kayıp faktörünü kullanmışlardır. Bu faktör dekleme 2.38'de tarif edildiği gibidir;

$$\eta = \frac{\left(\frac{\omega_a}{\omega_b}\right)^2 - 1}{\left(\frac{\omega_a}{\omega_b}\right)^2 + 1} \quad (2.29)$$

ω_a ve ω_b rezonans frekanslarının üzerinde veya altında bulunan frekanslardır. Bu faktördeki değişim hasarı işaret eder.

Bu konuda çalışan diğer araştırmacılara; Law ve diğerleri (1992), Cawley (1990), Ju (1993), In Mioduchowski (1993), Springer ve Reznicek (1993), Casas (1994), Juneja ve diğerleri (1994), Ma ve Zheng (1994), Saravanos ve diğerleri (1994), Schuetze ve diğerleri (1994), Balis Crema ve Mastroddi (1995), Fritzen ve diğerleri (1995), Koh ve diğerleri (1995), Liang ve diğerleri (1995), Sibbald ve diğerleri (1995), Carlin ve Garcia (1996), Chourdury ve He (1996), straser ve Kiremidjian (1996) örnek verilebilir.

Aşağıda verilen tablo, önceki bölümlerde detaylı olarak incelenen ve dinamik data kullanılarak hasar tespit yöntemlerini ve bu konu üzerinde çalışanları ve yayın tarihlerini kronolojik bir sıra izleyerek vermektedir.

Bu tabloda kullanılan kısaltmaların açıklamaları tablo sonunda verilmektedir

Tablo 2.1. Hasar tespit yöntemlerinin sınıflandırılması (1/8)

Yazar(lar)	Data / Korelasyon (a)	İzlenen Yol (b)	Kriterler / Kısıtlamalar (c)	Sonuç / Özellikler (d)
Lifshitz ve Rotem (1969)	F / TA	N / D	E	P / K
Berman ve Flannely (1971) Berman (1979) Berman ve diğerleri, (1980) Berman ve Wei (1981) Berman ve Nagy (1983)	F, M / TA	N / D	P / E, S	GM / K
Vandiver (1975, 1977)	F / TA	F / D		P / M, K
Begg ve diğerleri, (1976)	F, R / TA	F / D		P / K
Loland ve Dodds (1976)	F, M, R / TA	F / D		P / M, K, V
Wojnarowski, ve diğerleri, (1977)	F / TA	F / D		P / M, K, V
Adams ve diğerleri, (1978)	F / TA	N / D	E	P / K
Baruch (1978, 1982, 1984) Baruch ve Bar Itzhack (1978) Berman ve Nagy (1983) Kabe (1985) Baruch ve Zemel (1989)	F, M / TA	N / D	P / E, S	GM / K
Cawley ve Adams (1979a, 1979b)	F / TA	F / D		P / K
Chen ve Garba (1980)	F, M / TA	N / I	P / E	P / M, K
Coppolino ve Rubin (1980)	F / TA	F / D		P / K
Duggan ve diğerleri, (1980)	F / TA	F / D		P / K, V
Kenley ve Dodds (1980)	F / TA	F / D		P / K, M

Tablo 2.1. Hasar tespit yöntemlerinin sınıflandırılması (2/8)

Yazar(lar)	Data / Korelasyon (a)	İzlenen Yol (b)	Kriterler / Kısıtlamalar (c)	Sonuç / Özellikler (d)
Yang ve diğerleri, (1980, 1984)	TD / TA	F / D		P / K
Crohas ve Lepert (1982)	F / TA	F / D		P / M, K
Gudmundson (1982)	F / TA	F / D		P / G
Nataraja (1983)	F / TA	F / D		P / M, K
Whittome ve Dodds (1983)	F / TA	F / D		P / M, K, V
Berger ve diğerleri, (1984, 1989)	F, M / TA	N / I	E / S, D, C	
Haug ve Choi (1984)	F, M, S / TA	N / D	E / S	P / M, K
West (1984)	M / TT	N / D		L
Yuen (1985)	M, MD / TT	F / D		P / K
Gysin (1986)	G / TA	N / D	E	L
He ve Ewins (1986)	G / TA	N / D	E	L
Afolabi (1987)	R	N / D	RF	L
Lee ve diğerleri, (1987)	F / TA	F / D		P / G
Wang ve Zhang (1987)	R, F / TA	N / D	E	P / K
Chen ve Garba (1988a, 1988b)	F, M / TA	N / D	P / E, C, S	P / K
Park ve diğerleri, (1988)	G / TA	N / D	E	L
Actis ve Dimarogonas (1989)	MD / TA	F / D		P / G
Hajela ve Soeiro (1989, 1990)	F, M, S / TA	N / D	P / E, S	GM / K
Ladeveze ve Reynier (1989)	F, M, S / TA	N / I	E / S, D, C	P / M, K
Norris ve Meirovitch (1989)	F, M / TA	N / I	E / S, C	P / M, K
Tracy ve Pardoen (1989)	F / TA	F / D		P / G
Baruh (1990)	F, M / TA	N / D	E / S, C	P / M, K
Chou ve Wu (1990)				
Ismail ve diğerleri, (1990)	F / TA	F / D		P / G
Lim (1990, 1991)	F, M / TA	N / I	E / S, D, C	EM / K
Lin (1990, 1994)	G / TA	N / D	E	P / K

Tablo 2.1. Hasar tespit yöntemlerinin sınıflandırılması (3/8)

Yazar(lar)	Data / Korelasyon (a)	İzlenen Yol (b)	Kriterler / Kısıtlamalar (c)	Sonuç / Özellikler (d)
Lin ve Ewins (1990)	F, M / TA	N / D	P / E, S	GM / K
McGowan ve diğerleri, (1990)	F, M / TA	N / D	P / E, S	GM / K
Rizos ve diğerleri, (1990)	F, M / TA	N / I		P / G
Soeiro ve Hajela (1990)	F, M / TA	N / I	E / S, D, C	P / K
Stubbs ve diğerleri, (1990) Stubbs ve Osegueda (1990a,1990b)	F / TT	N / D	E	P / K
Bernitsas ve Tawekal (1991)	F, M, S / TA	N / I	E / S, D, C	P / M, K
Hearn ve Testa (1991)	F, M / TA	N / I	F / E	EM / K
Kudva ve diğerleri, (1991)	S / TT	T		P / G
Olhoff ve Rasmussen (1991)	S / TA	N / D	E / S, C	P / M, K
Pandey ve diğerleri, (1991)	MD / TA	N / D	E	L
Piranda ve diğerleri, (1991)	F, M, S / TA	N / I	E / S, D, C	P / M, K
Ricles (1991) Ricles ve Kosmatka (1992)	F, M / TA	N / I	E / S, C	P / M, K
Roy ve diğerleri, (1991) Girard ve diğerleri, (1992)	F, M / TA	N / I	E / S, D, C	P / M, K
Sanayei ve Onipede (1991) Sanayei ve diğerleri, (1992)	S / TA	N / I	E / S, D, C	P / K
Smith ve Beattie (1991a, 1991b,1991c) Smith (1992)	F, M / TA	N / D, I	P, E / S, Z	GM / K
Chu ve Shen (1992) Shen ve Chu (1992)	F, R / TA	F / D		P / G
Fox (1992)	F, M / TA	F / D		P / G
Kam ve Lee (1992)	F, M / TA	N / I	E	P / G
Kim ve diğerleri, (1992)	M / TT	N / D	E	L

Tablo 2.1. Hasar tespit yöntemlerinin sınıflandırılması (4/8)

Yazar(lar)	Data / Korelasyon (a)	İzlenen Yol (b)	Kriterler / Kısıtlamalar (c)	Sonuç / Özellikler (d)
Krawczuk ve Ostachowicz (1992)	F / TA	F / D		P / G
Law ve diğerleri, (1992)	R / TA, TT	N / D	E	P / K
Mayes (1992)	F, M / TA, TT	N / D	E	P / K
Ojalvo (1992)	F, M / TA	N / D	E / S	P / M, K
Osegueda ve diğerleri, (1992)	F, M			
Richardson ve Mannan (1992)	F, M / TA	N / D, I	E	GM / K
Srinivasan ve Kot (1992)	F, M / TT	N / D	E	L
Stubbs ve diğerleri, (1992)	MD / TT	N / D	E	P / K
Wu ve diğerleri, (1992)	R	T		P / K
Zimmerman ve Kaouk (1992)	F, M / TA	N / D	E	P / K
Çağlayan (1992)	G, TD / TA, TT	F / I	E, P, D	L, GM, PK
Baruh ve Ratan (1993)	F, M / TA	N / D	E	L
Elkordy ve diğerleri, (1993)	M / TA	T		P / K
Hemez (1993) Doebbing ve diğerleri, (1993a, 1993b) Alvin (1996)	F, M / TA	N / I	E / C, S	P / M, K
Ju (1993)	R, TD / TA	N / D	E	P / G
Kim ve Bartkowicz (1993, 1994) Kim ve diğerleri, (1995a)	F, M / TA	N / D, I	P, E / S, R	P / K
Leath ve Zimmerman (1993)	F / TA	T		P / K
Lindner ve diğerleri, (1993) Lindner ve Kirby (1994)	F, M / TA	N / D	P / C, E	P / K, M
Lindner ve Goff (1993)	F, M / TA	N / D	E	P / K
Pape (1993)	F / TT	F / D		P / G
Penny ve diğerleri, (1993)	F / TA	F / D		P / K

Tablo 2.1. Hasar tespit yöntemlerinin sınıflandırılması (5/8)

Yazar(lar)	Data / Korelasyon (a)	İzlenen Yol (b)	Kriterler / Kısıtlamalar (c)	Sonuç / Özellikler (d)
Peterson ve diğerleri, (1993)	G / TT	N / D	E	P / K
Slater ve Shelley (1993)	F / TA	N / D	E	P / K
Spillman ve diğerleri, (1993)	F, R / TA	T		P / K
Springer ve Reznicek (1993)	R / TA	F / D		P / K
Worden ve diğerleri, (1993)	S	T		P / K
Aktan ve diğerleri, (1994)	G / TT	F / D		P / K
Casas (1994)	F, M / TA	N / I	E	L / G
Chance ve diğerleri, (1994)	MD / TA	T	E	P / G
Chen ve Swamidass (1994)	MD / TA	F / D		P / G
Dong ve diğerleri, (1994)	F, MD / TT	F / D		L
Friswell ve diğerleri, (1994)	F / TA	F / D		L
Juneja ve diğerleri, (1994)	R	F / D		P / K
Kaouk ve Zimmerman (1994a,1994b, 1994c, 1995a) Zimmerman ve Kaouk (1994) Zimmerman ve diğerleri, (1995b)	F, M / TA	N / D		GM, EM / M, C, K
Kirkegaard ve Rytter (1994)	F / TA	T		P / K
Klein ve diğerleri, (1994)	F / TT	F / D		P / G
Ko ve diğerleri, (1994)	M / TT	N / D	E	L
Kondo ve Hamamoto (1994)	MD / TA	N / D	E	P / K
Li ve Smith (1994)	F, M / TA	N / D, I	P, E / S, Z	P / K
Lim (1994, 1995)	F, M / TA	N / D	E	P / K
Ma ve Zheng (1994)	R	N / D		L
Man ve diğerleri, (1994)	F / TA	F / D		P / G
Manning (1994)	R	T		P / K

Tablo 2.1. Hasar tespit yöntemlerinin sınıflandırılması (6/8)

Yazar(lar)	Data / Korelasyon (a)	İzlenen Yol (b)	Kriterler / Kısıtlamalar (c)	Sonuç / Özellikler (d)
Meneghetti ve Maggiore (1994)	F / TA	F / D		P / K, G
Narkis (1994)	F / TA	N / D		P / G
Pandey ve Biswas (1994)	G / TT	N / D		P / K
Povich ve Lim (1994)	R	T		P / K
Rhim ve Lee (1994)	R	T		P / G
Salawu ve Williams (1994, 1995)	M, MD / TT	N / D	E	L
Saravanos ve diğerleri, (1994)	R	F / D		P / G
Silva ve Gomes (1994)	F / TA	F / D		P / G
Stephens ve VanLuchene (1994)	R / TA	T		P / K
Szewczyk ve Hajela (1994)	D	T		P / K
Toksoy ve Aktan (1994)	G / TA, TT	N / D	E	P / K
Tsou ve Shen (1994)	F / TA	T		P / K
Zimmerman ve Simmermacher (1994, 1995)	F, M, S / TA	N / D	R / S, E	GM, EM / K
Balis Crema ve Mastroddi (1995)	R	N / D	E	H
Barai ve Pandey (1995)	TD	T		P / K
Brincker ve diğerleri, (1995a)	F / TA	F / D		P / M, K, V
Brincker ve diğerleri, (1995b)	F / TT	N / D	F	L
Ceravolo ve De Stefano (1995)	F / TA	T		P / K
Choy ve diğerleri, (1995)	F / TA	F / I	F / E	P / K
Fritzen ve diğerleri, (1995)	TT / TA	F / D		P / K
Koh ve diğerleri, (1995)	TD / TA	N / I	E	P / K
Lam ve diğerleri, (1995)	F, M / TA	F / D		P / G
Liang ve diğerleri, (1995)	M, C / TA	N / D	E	I
Liu (1995)	F, M / TA	N / D	E / C, S	P / M, K

Tablo 2.1. Hasar tespit yöntemlerinin sınıflandırılması (7/8)

Yazar(lar)	Data / Korelasyon (a)	İzlenen Yol (b)	Kriterler / Kısıtlamalar (c)	Sonuç / Özellikler (d)
Mayes (1995)	G / TT, TA	N / D	E	P / K
Nwosu ve diğerleri, (1995)	F, MD / TA	F / D		P / G
Peterson ve diğerleri, (1995)	G / TA	N / D	E / C, S	P / K
Salawu (1995)	F, M / TA	N / D	F / E	P / K
Zhang ve Aktan (1995)	GD / TT	N / D	E	P / K
Zimmerman ve diğerleri, (1995a)	R / TA	N / D	R / S, E	GM / H
Choudhury ve He (1996)	R / TA	N / D	E	L
Dos Santos ve Zimmerman (1996b)	F, M / TA	N / D	R, P / E, C, S	P / K
Klenke ve Paez (1996)	G	T		I
Prime ve Shevitz (1996)	M / TT	F / D		I / N
Schulz ve diğerleri, (1996)	R / TA	N / D	E	P / M, K
Schwarz ve diğerleri, (1996)	F	T		P / K
Skjaerbaek ve diğerleri, (1996)	F / TA	N / I	F / E	GM / K
Straser ve Kiremidjian (1996)	TD / TA	N / I	E	N
Uzgider ve diğerleri, (1996)	F, M, TD / TT	I	D, F	L, P

a. F = Frekans, M = Mod Şekli, MD = Mod Şekli Türevleri, C = Sönüm, G = Fleksibilite veya rankı düşürülmüş rijitlik, GD = Fleksibilite türevleri, S = Statik Data, R = Cevap spektrumu veya Frekans Cevap Fonksiyonu, TD = Zamana bağlı Cevap / TA = Modal Test/Analiz ilişkisi (analitik model kullanılır), TT = Hasarsız test / hasarlı test ilişkisi (analitik model kullanılmaz)

b. F = İleri, N = Tersinir, T = Sinir ağı / D = Direk, I = tekrarlı

c. (bu kolon sadece değişik optimizasyon yöntemlerini kullanan tersinir veya tekrarlı modelleme teknikleri ile alakalıdır)

F = Frekans değişimi, E = Hareket Denklemi, P = Parametre Değişimi, R = Parametre Vectörü veya matrisi Rankı, RF = Cevap Spectrumu veya Frekans Cevap Fonksiyonu, C = Bağlılık, S = Simetri, D = Her zaman sıfırdan büyük olma, Z = Sparsity

- d. I = Belirtme (hasarı ve yeri hakkında bilgi vermez, sadece hasarın varlığını işaret eder), L = Sadece Hasarın Yeri (Hasar hakkında bilgi vermez ama yerini gösterir), GM = Global Matis Değişimi, EM = Eleman bazında Matris değişimi, P = Eleman veya bölgesel parametrelerin değişimi / M = Kütle, C = Sönüm, K = Rijitlik, H = Hibrid Özellikler (örneğin dinamik empedans), G = Çatlak geometrisi veya bulunduğu yer, V = yapının çevresel veya hizmet özellikleri, N = Cevap nonlineerlik (Response Nonlinearity)



3 HASAR TESPİT YÖNTEMLERİNİN KÖPRÜLER ÜZERİNDE UYGULAMASI

Bu bölümde, bölüm 2' de özetlenmiş araştırma konularının köprülerin hasar tespiti için yoğunlaştırılmış olanları kısaca özetlenecektir.

Gudmudson (1983), üzerinde çatlak olan kirişin dinamik davranışını incelemiştir. Üzerindeki mevcut çatlak nedeniyle rijitliğinde düşüş gösteren kirişdeki hasarı ve yerini, eşdeğer fleksibilite matrisi ile gösterilebileceğini düşünmüş ve fleksibilite matrisini enerji denge denklemi ile elde etmiştir. Üzerinde bir çentik çatlağı bulunan kirişteki frekans kaymalarının belirlenmesi için bu metod kullanılmıştır. Yürüttüğü çalışmaların sonucunda, analitik ve deneysel çalışmaların üst üste düştüğünü göstermiştir.

Yuen (1985), bilgisayar ortamında, üzerindeki elemanlardan her seferinde sadece bir tanesinin rijitliği azaltılarak hasarın simüle edildiği konsol kiriş modeli üzerinde çalışmalar yapmış ve mod şekline dayanan özdeğer ve özvektörlerin frekans kaymasına göre hasara daha duyarlı olduğunu bulmuştur.

Ismail ve diğerleri (1990), çatlağın frekans kayması üzerindeki etkilerini kiriş üzerinde incelemiştir. Frekanstaki değişimlerin çatlağın miktarını bulmakta yeterli olmadığını ancak kirişte çatlağın (hasarın) bulunup bulunmadığına cevap verebildiğini göstermişlerdir.

Lin ve Ewins (1990), geliştirdikleri bölgesel nonlinearlik tekniklerini özel olarak imal edilmiş bir yapı üzerinde denemişlerdir. Yaylar ile asılı dikdörtgen bir çerçeveyi, oluşan yerdeğiştirmenin kübü ile orantılı olacak şekilde sarsma tablası üzerinde titreştirmişlerdir. İki farklı tepki seviyesinden elde edilen mod şekli ve frekanslar yardımı ile bulunan matris, nonlinearliği tanımlamaktadır. Bu teknikte,

nonlinear davranış gösteren bölgeler görülebilmemesine rağmen bazen yanlış bölgelerde (nonlinear davranış göstermese de) işaret edilebilmektedir.

Rizos ve diğerleri (1990), 200mm x 20mm x 20mm ebatlarındaki çelik bir konsol üzerine testere dişi şeklinde çentikler açmışlardır. Kiriş titreştirilmiş ve değişik noktalarından ölçümler alınmıştır. Bu ölçümlerden çatlakların yerleri ve büyüklükleri hesaplanmıştır. Değerler %8 hata sınırı içinde kaldığı görülmüştür. Kam ve Lee (1992) benzer çatlak tespiti ve yerinin belirlenmesi algoritmalarını kullanmış ve oldukça iyi sonuçlar bulduklarını açıklamışlardır.

Stubbs ve Osegueda (1990a), 10m uzunluğunda 20cm genişliğinde ve 60cm yüksekliğinde basit mesnetli bir kiriş üzerinde hasar tespitinde duyarlılık (hassaslık) metodunu uygulamış ve birçok olası hasar senaryosu düzenlemişlerdir. Rijitlik azaltmaları eğilme modları için sonlu elemanlar programında atalet momentlerinin azaltılması ile simüle edilmiş ve ayrıca eksenel modlar için rijitlik azalması, enkesitin azaltılması ile simüle edilmiştir. Tek noktada oluşmuş hasarı yer ve miktar olarak bu metot doğru bulabilirken, senaryo gereği birden fazla noktada oluşmuş hasarın, yaklaşık olarak yerini (komşu noktalarda da az hasar varmış gibi) bulabilmektedir. Bu çalışmaların sonucunda yazarlar dört adet soru üretmişler ancak bu sorulara cevap verememişlerdir:

1. Hesap ile bulunabilecek en küçük hasar nedir (ne kadardır)?
2. Hasar senaryolarına bağlı olarak küçük frekans değişimlerinden hasar doğru olarak hesaplanabilir mi?
3. Lineer olmayan davranış metodun hassasiyetini nasıl etkiler?
4. Analizci, hangi hassasiyette duyarlılık matrisini mevcut yapı için doğru olarak hesaplayabilir?

Fox (1992) 1m uzunluğunda 12 mm derinliğinde, üzerinde değişik çatlaklar bulunan bir kiriş üzerinde çalışmıştır. Doğru mod şekillerinin bulunmasında MAC kullanılmıştır. Hasarın yeri mod şeklindeki ve frekanstaki kaymalardan tespit

edilmiştir. Frekanstaki kaymaların mod şeklindeki kaymalara göre daha az duyarlı olduğunu gösterilmiştir.

Huang ve Gu (1993), 4m uzunluğunda, 3.5 cm genişliğinde ve 6 mm kalınlığında bir kiriş üzerinde çalışmışlar ve hasarın saptanmasında ARMA modelini kullanmışlardır.

Kim ve Bartkowicz (1993), 40 serbestlik dereceli alüminyum kiriş üzerinde çok sayıda test yapmıştır. Bu çalışmalarda test yönteminin, ölçüm noktalarının ve kullanılan ölçüm aletlerinin sayısının hasarın yerini bulunmasını nasıl etkilediğini göstermişlerdir.

Ko ve diğerleri (1994), MAC ve COMAC' a dayanan hasar belirleme yöntemini 2m² lik bir kapalı çerçeveye uygulamışlardır. Test, rijit ve mafsallı birleşimler üzerinde yapılmış ve hasar bulonların gevşetilmesi ve/veya çıkarılması ile simüle edilmiştir. Yöntemin zayıflatılmış kesiti gösterdiği görülmüştür.

Bu konuda çalışan araştırmacılara; Ju ve Mimovich (1986), Sanders ve diğerleri (1989), Silva ve Gomes (1990), Stubbs ve Osegueda (1990b), Salawu ve Williams (1993), Budipriyanto ve Swamidas (1994), Chance ve diğerleri (1994), Dong ve diğerleri (1994), Kaouk ve Zimmerman (1994a), Klein ve diğerleri (1994), Meneghetti ve Maggiori (1994), Perchard ve Swamidas (1994), Silva ve Gomes (1994), Chen ve diğerleri (1995), Fritzen ve diğerleri (1995), Prime ve Shevitz (1996), Zimmerman (1996) örnek verilebilir.

Holt (1991), Amerika'daki 1950 yılından günümüze kadar geçen zaman içerisinde göçmüş köprülerin bir incelemesini yapmıştır. Bu tür incelemeler yapılan ve gelecekte yapılacak köprülerde, hesap tespit yöntemlerinde gelişmelere neden olmuştur. Buna en güzel örnek yarım yüzyıl önce göçmüş Tacoma Narrows köprüsüdür. Bu ve benzeri çalışmalar, diğer asma köprülerde inceleme ve modifikasyonlar yapılmasını sağlamıştır. Yeni yapılan asma köprülerde de eskiden alınmayan bazı kuvvetlerin hesaba katılmasının gerekli olduğunu gösterilmiştir.

Köprülerin sürekli incelenmesi ve izlenmesi (White ve diğerleri, 1992) 1967 yılındaki Point Pleasant'ta bulunan bir köprünün dramatik bir biçimde yıkılmasından

sonra Shirole ve Holt tarafından başlatılmıştır. 1971 yılındaki San Fernando Depremi'nden sonra (Gates, 1976) deprem hesaplarında yeni düzenleme ve düzeltmeler yapılmıştır.

Günümüzde, köprülerin güvenirliliği incelenmekte ve bazı köprüler sürekli izlenmektedir. Genellikle bu inceleme yılda bir defa yapılmakta ve çoğunlukla gözle muayene şeklinde olmaktadır. Ancak bunun tehlikeleri çok büyüktür, muayene sırasında gözden kaçan bir çatlak veya iki periyodik muayene arasında oluşacak bir çatlak yük taşıyan elemanların işleyişini bozabilmekte veya devreden çıkarabilmekte ve bu da köprünün genel davranışını bozup göçmeye neden olabilmektedir (Gorlov 1984).

Bu nedenle, köprüler, mümkünse sürekli izlemeye alınmalı ve zaman içinde köprü hakkında bilgi toplanmalıdır. Aktif hasar tespit yöntemleri, köprüde o anda hasar olup olmadığı bilgisini verdiği için bu bilgiden yararlanarak, köprünün serviste kalması veya bakıma alınması kararı verilebilecektir. Otomatik tetikleme sistemlerinin (triggerring system) kurulması ile hasar anında köprü otomatik olarak trafiğe kapatılabilmektedir. Böylece hem insan hayatı güvence altında alınabilecek, hem de köprüden en ekonomik şekilde yararlanmak mümkün olacaktır.

1979 yılından beri köprüler için birçok hasar belirleme yöntemleri üzerinde çalışılmış ve geliştirilmiştir. Salane ve diğerleri (1981) üç açıklıklı bir karayolu köprüsü üzerinde köprünün dinamik parametrelerinin değişimlerini inceleyerek köprü kirişlerindeki yorulma çatlaklarının neden olduğu hasarları bulmuşlardır. Araştırmacılar, köprü rijitliğindeki ve titreşim karakterlerindeki değişimi, yorulmadan kaynaklanan zayıflamayı belirleyen önemli bir etken olarak kullanmışlardır. Rijitlik katsayıları deneysel olarak elde edilen mod şekillerinden hesaplanmıştır. Titreştirme mekanizması olarak elektrikli hidrolik verenler kullanılmıştır.

Kato ve Shima (1986), mevcut bir öngerilmeli betonarme köprü üzerinde dinamik ölçümler yaparak göçme testleri uygulamışlar ve göçme yüküne yakın yüklerde köprünün frekansında düşme olduğunu gözlemlemişlerdir. Ancak, sönümün bu testler sırasında etkilenmediğini görmüşlerdir.

Turner ve Pretlove (1988), rasgele trafik yüklerine maruz bir köprüyü bir kiriş ile simüle etmiş ve nümerik bir dinamik analiz yöntemi uygulayarak çözüme gitmişlerdir. Bu testler sırasında bu yöntemle köprünün rezonans frekanslarını bulmuşlar ve bunlardaki değişimi kullanarak yapıda hasar bulunup bulunmadığının gösterilebileceğini görmüşlerdir. Bu yöntemin en iyi yanı, yapıyı titreştirmek için ek bir ekipmana gerek duyulmamasıdır.

Sproyrakos ve diğerleri (1990), gerçek bir köprünün dinamik tepkilerini veren bir grup kiriş üzerinde birçok denemeler yapmışlardır. Her bir kirişe senaryo gereği değişik (tip, miktar, yer) hasar verilmiş ve düşük seviye serbest titreşim testleri uygulanmıştır. Araştırmacılar hasar derecesi ve yapının dinamik parametreleri arasında bir korelasyon bulmuşlar, ancak tek başına frekans değişiminin yapıdaki hasarın ciddiyetini tam olarak veremediği görülmüştür.

Jain (1991), bir demiryolu köprüsü üzerinden sabit hızla geçen bir tren katarını titreştirici mekanizma olarak kullanarak, hasarın köprü performansına etkisini modal yöntemler kullanarak elde etmiştir. Jain, modal parametrelerdeki, özellikle mod şekilleri ve frekanslardaki değişimlerin hasar konusunda genel bilgi verdiğini, buna karşın , yerini ve derecesini vermediği sonucuna varmıştır.

Tang ve Leu (1991), hasarlı bir öngermeli betonarme köprü kirişi üzerinde deneyler yapmışlar ve mod şekillerindeki değişimin frekanstaki değişimlere nazaran hasarın yerinin belirlenmesinde daha etkin rol oynadığı kanısına varmışlardır.

Reghavendracher ve Aktan (1992), üç açıklıklı betonarme bir köprü üzerinde darbe testleri uygulamışlar ve sadece ilk birkaç mod ve frekans kullanılarak güvenilir bir şekilde hasar tespit edilemeyeceği görüşüne varmışlardır. Hasarın tespit edilebilmesi için daha yüksek modlara ihtiyaç duyulduğunu göstermişlerdir.

Uzgider ve diğerleri (1992-1996), tarafından 11 adet çelik demiryolu köprüleri test edilmiştir. Bu çalışmalarda modal parametrelerdeki değişim, optimizasyon teknikleri kullanılarak hesaplanmış, çıkan sonuçlar istatistiksel olarak değerlendirilerek hasar ve modal parametreler arasında bir bağıntı olduğu ve bu bağıntının düşük

frekanslarda küçüldüğü, buna karşın yüksek frekans ve mod şekillerinde büyüdüğü gösterilmiştir.

Aktan ve diğerleri (1994), test sonucu bulunan modal fleksibilite ve statik yükleme sonucu bulunan fleksibilite arasındaki değişimi hasar tespit metodunda hasarın varlığını belirleyici faktör olarak kullanmışlardır. 18 modun hesaba katılmasından sonra modal fleksibilitedeki hatanın %2 mertebesinde olduğu gösterilmiş ve bulunan modlar SEY modellerinin geliştirilmesinde (refinement) kullanılmıştır.

Salawu (1995), Salawu ve Williams (1995), tamir edilmekte olan betonarme bir köprüye global hasar bulma metodunu uygulamışlar ve bu metotta MAC ve COMAC değerlerini hasarın yerini bulmak için kullanmışlardır. Ancak bazen bu değerlerin doğru hasar noktasını işaret etmediğini tespit etmişlerdir.

Bu konuda çalışan araştırmacılara; Biswas (1990), Mazurek ve DeWolf (1990), Law ve diğerleri (1992), Kim ve Stubbs (1993), Biswas ve diğerleri (1994), Farrar ve diğerleri (1994), Samman ve Biswas (1994), Toksoy ve Aktan (1994), Alampalli ve diğerleri (1995), Farrar ve Cone (1995), James ve diğerleri (1995), Liang ve diğerleri (1995), Sibbald ve diğerleri (1995), Simmermacher ve diğerleri (1995), Stubbs ve diğerleri (1995), Zhang ve Aktan (1995), Kong ve diğerleri (1996), Villemure ve diğerleri (1996) örnek olarak verilebilir.

Özet olarak, son yirmi yıldır köprü hasar metodları, test yöntemleri ve köprü izleme (long-term monitoring) konularında oldukça yoğun çalışmalar yürütülmektedir. Pek çok araştırmacının bu konuyla ilgilenmesine neden olan oldukça dramatik yapı göçmeleri olmuştur. Bunun yanı sıra ekonomik kaygılar da konunun araştırılmasını zorunlu kılmaktadır. Daha önceki çalışmalar frekans ve mod şekillerinin değişimleri üzerinde yoğunlaşmış olmasına rağmen bu yöntemlerin uygulama zorlukları ve ekonomik olmamaları yüzünden başka metodlar araştırılmaktadır. Ayrıca yeni yöntemlerin basit, uygulaması kolay ve hatayı en alt seviye indiren yöntemler olması ekonomi ve işlevsellik yönünden şarttır.

4. KÖPRÜ HASARLARININ DİNAMİK TEST VERİLERİ İLE SAPTANMASI

4.1 Giriş

Önceki bölümlerde, sistem tanımlama ve hasar tespit teknikleri ile bu tekniklerin üstünlükleri ve mahsurlu yönleri anlatılmıştır. İzleyen bölümlerde kaydedilen test datası yardımı ile köprü hasarlarının saptanması için bu çalışmada geliştirilen yeni bir yöntem tanıtılmakta ve mevcut metotlardaki zayıflıkların ortadan kaldırılarak etkin, kullanımı kolay, işlem hacmi düşük ve ekonomik bir metot sunulmaktadır.

4.2 Amaç

Önerilen metot lineer davranış gösteren yapılar için üretilmiştir. Bu lineer yaklaşım mevcut servis yükleri altında hizmet vermekte olan yapılara uygulanabilmekte ve titreştirme mekanizması olarak mevcut yük, eksantrik kütleli titreştirici , çekip ani olarak bırakma, roket ve trafik yükü gibi teknikler kullanılmaktadır. Birden fazla titreştirici mekanizmanın kullanılabilir olması testin uygulama alanını genişletmektedir. Yöntem köprüler için geliştirilmiş olsa bile izleyen bölümlerdeki teorisinden de görüleceği gibi inşaat, mekanik ve uzay mühendisliğinde karşılaşılabilecek tüm yapılara (büyük, küçük, karmaşık, kompozit yapılara) uygulanabilir. Sonlu elemanlar programlarındaki gelişmeler bu yöntemin büyük yapıların küçük elemanlara bölünebilmesi ve bu suretle çok detaylı bir şekilde modellenebilmesi nedeniyle tüm yapılara uygulanabilmesini mümkün kılmaktadır.

Sonlu elemanlar yöntemiyle modelleme, dinamik test datası kullanarak model ve ölçülen sistem arasında ilişki kurarak hasar tespiti yaklaşımı birçok üstünlüğü içermektedir. Bu doktora çalışmasında geliştirilen algoritmada çok sayıda ölçüm cihazına ihtiyaç duyulmamakta, örneğin iki adet üç eksenli ivme ölçer ile, yapı üzerinde planlanan test için daha önceden belirlenmiş ölçüm noktalarına bu aletlerin

kaydırılarak konulması suretiyle, yöntem için gerekli veriler kolaylıkla kayıt edilebilmektedir. Az sayıda ekipman kullanılması nedeniyle testi gerçekleştirecek kişilerin sayısının çok olmasına gerek yoktur bu nedenle öngörülen test daha kolay gerçekleştirilebilir, yapılabilecek insan hataları ve test süresi minimize edilmiş olur. Az sayıda ekipman ve kişi ile gerçekleştirilecek bir testin diğerlerine göre daha ekonomik olacağı açıktır. Serbest titreşim dataları incelenmek istendiğinde, titreştirme mekanizması olarak yapı üzerindeki hareketli yükler, rüzgar, çevreden gelen etkiler vb., yapıyı titreştirici etkenler olarak kullanılabilir. Ek bir ekipman kullanılmadığı için test süresi ve maliyet artmayacaktır.

Bu doktora çalışmasında ele alınan problem sistem belirleme (system identification) değil hasar belirleme problemidir. Geliştirilen algoritmanın amacı hasarın varlığının ve yerinin belirlenme probleminin çözülmesidir, hasarın şiddetinin saptanması değildir.

4.3 Teori

En genel halde hareket denklemi;

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

şeklinde yazılmaktadır. Dış kuvvetin olmaması halinde (serbest titreşim) denklem 4.1, denklem 4.2 şeklini almaktadır.

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [C]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = \{0\} \quad (4.2)$$

Bu denklemlerde; $[M]$ = kütle matrisi ; $[C]$ = sönüm matrisi; $[K]$ = rijitlik matrisi; f = dış kuvvet vektörü, $\ddot{u}(t), \dot{u}(t), u(t)$ sırasıyla ivme, hız ve yerdeğiştirme vektörleridir.

Sönüm matrisinin elemanlarının değerlerinde oluşabilen değişimin, sistem elemanlarında sözkonusu olabilecek hasar nedeniyle rijitlik matrisi elemanlarında oluşabilene göre oldukça az olacağı düşünülerek, 4.2 denklemi bu çalışmada 4.3'te verilen formda elde edilmiştir:

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = \{0\} \quad (4.3)$$

Sistemi bir bütün olarak almak ve dolayısıyla büyük matrislerle uğraşmak yerine, sadece ivme ölçümü yapılan ilgili serbestlik derecelerine karşı gelecek indirgenmiş bir sistem üzerinde hesap yapmak hem kolaylık hem de işlemlere hız kazandıracaktır. Zira sadece iki adet ivme ölçer kullanılmasından dolayı hasar tespit yöntemi, ilgili serbestlik derecelerine indirgenmiş yapı parametrelerinin (kütle, rijitlik) hesaplanması ile mümkündür.

Bu düşünceyle kuvvet-deplasman denklemi $\tilde{P}_y = 0$ ve $\tilde{P}_x \neq 0$ eşitliklerini sağlayacak şekilde bölümlendirilmiş rijitlik matrisi (bak denklem 4.4) $\tilde{P}_x$ x adet serbestliğe karşı gelen kuvvet alt vektörü, $\tilde{P}_y$ y adet serbestliğe karşı gelen kuvvet alt vektörü, $\tilde{U}_x$ x adet serbestliğe karşı gelen deplasman alt vektörü, $\tilde{U}_y$ y adet serbestliğe karşı gelen deplasman alt vektörü, $\tilde{K}_{xx}, \tilde{K}_{yy}, \tilde{K}_{xy}, \tilde{K}_{yx}$ de ilgili serbestliklere karşı gelen rijitlik alt matrisleridir ve yazılıp çözüldüğünde denklem 4.5'in elde edileceği açıktır

$$\begin{bmatrix} \tilde{P}_x \\ \tilde{P}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{K}_{xx} & \tilde{K}_{xy} \\ \tilde{K}_{yx} & \tilde{K}_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{U}_x \\ \tilde{U}_y \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$$\tilde{K}_{xx} \tilde{U}_x + \tilde{K}_{xy} \tilde{U}_y = \tilde{P}_x \quad (4.5a)$$

$$\tilde{K}_{yx} \tilde{U}_x + \tilde{K}_{yy} \tilde{U}_y = 0 \quad (4.5b)$$

Denklem 4.5b düzenlendiği takdirde 4.6 denklemi elde edilir.

$$\tilde{U}_y = -\tilde{K}_{yy}^{-1} \tilde{K}_{yx} \tilde{U}_x \quad (4.6)$$

4.6 denklemini denklem 4.5a' nın içine yerleştirilerek denklem 4.7 elde edilmiş olur;

$$\underset{\sim}{P}_x = (\underset{\sim}{K}_{xx} - \underset{\sim}{K}_{xy} \underset{\sim}{K}_{yy}^{-1} \underset{\sim}{K}_{yx}) \underset{\sim}{U}_x \quad (4.7a)$$

$$\underset{\sim}{P}_x = \underset{\sim}{K}_{in} \underset{\sim}{U}_x \quad (4.7b)$$

Denklem 4.7b’de verilen $\underset{\sim}{K}_{in}$ indirgenmiş rijitlik matrisidir ve

$$\underset{\sim}{K}_{in} = \underset{\sim}{K}_{xx} - \underset{\sim}{K}_{xy} \underset{\sim}{K}_{yy}^{-1} \underset{\sim}{K}_{yx} \text{ şeklinde tanımlanmaktadır.}$$

Benzer bir yaklaşım kütle matrisi için de geçerlidir. İndirgenmiş kütle matrisini hesaplayabilmek için rijitlik matrisine ihtiyaç duyulmaktadır;

$$K = \begin{bmatrix} \underset{\sim}{K}_{xx} & \underset{\sim}{K}_{xy} \\ \underset{\sim}{K}_{yx} & \underset{\sim}{K}_{yy} \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

$$U = \begin{bmatrix} \underset{\sim}{U}_x \\ \underset{\sim}{U}_y \end{bmatrix}$$

Ririjitlik matrisi ve deplasman vektörünü öyle alt matris ve vektörlere ayıralım ki, $\underset{\sim}{U}_x$ ivme ölçümü yapılacak serbestlik derecelerine ait deplasman vektörünü göstere. Bu durumda $\underset{\sim}{U}_y$ deplasman vektörü, $\{P\}=[K]\{U\}$ statik dekleminde yararlanarak ve $\underset{\sim}{U}_y$ deplasman vektörüne karşı gelen dış kuvvet matrisi $\underset{\sim}{P}_y$ ’nin elemanlarının hepsinin sıfıra eşit olduğu kabul edilerek deklemin 4.9’da verildiği gibi elde edilir:

$$\underset{\sim}{U}_y = -\underset{\sim}{K}_{yy}^{-1} \underset{\sim}{K}_{yx} \underset{\sim}{U}_x \quad (4.9)$$

$\underset{\sim}{U}_x$ deplasman vektörüne karşı gelen indirgenmiş kütle matrisi $\underset{\sim}{M}_{in}$ olarak gösterilirse ve sisteme $\delta\{U\}$ virtüel deplasmanları uygulanırsa; her iki eşdeğer kütle sisteminin yapmış olduğu virtüel işin eşitliğinden deklemin 4.10 elde edilir.

$$\begin{aligned}\delta U_x^T \left(-M_{in} \ddot{U}_x \right) &= \delta \{U\}^T \left(-[M] \{\ddot{U}\} \right) \\ &= \left[\delta U_x^T \quad \delta U_y^T \right] [M] \begin{bmatrix} \ddot{U}_x \\ \ddot{U}_y \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (4.10)$$

Denklem 4.9, denklem 4.10' nun içene yerleştirilip gerekli kısaltmalar yapıldığı zaman denklem 4.11 elde edilir.

$$\delta U_x^T M_{in} \ddot{U}_x = \delta U_x^T \begin{bmatrix} I & -K_{xy} K_{yy}^{-1} \end{bmatrix} [M] \begin{bmatrix} I \\ -K_{yy}^{-1} K_{yx} \end{bmatrix} \ddot{U}_x \quad (4.11)$$

Sonuç olarak; $[A_{in}] = \begin{bmatrix} I \\ -K_{yy}^{-1} K_{yx} \end{bmatrix}$ kısaltması yapılarak;

$$[M_{in}] = [A]_{in}^T [M] [A]_{in} \quad (4.12)$$

indirgenmiş kütle matrisi hesaplanmış olur.

Denklem 4.12 ve denklem 4.7 denklem 4.3' de yerlerine yerleştirildiğinde ilgili serbestlik derecelerine indirgenmiş sistemin hareket denklemi elde edilmiş olur;

$$[M_{in}] \{\ddot{U}_x(t)\} + [K_{in}] \{U_x(t)\} = \{0\} \quad (4.13)$$

Denklem 4.13'de $\{\ddot{U}_x\}$ ölçülen ivme vektörünü, $\{U_x\}$ ölçülen ivmeden entegrasyon yöntemlerinden birinin kullanılmasıyla elde edilmiş yerdeğiştirme vektörünü, $[M_{in}]$ indirgenmiş kütle matrisini ve $[K_{in}]$ indirgenmiş rijitlik matrisini temsil etmektedir.

Taşıyıcı sistem elemanlarında söz konusu olabilen hasarlardan korozyon nedeniyle oluşan kesit kayıpları dışında, diğer hiçbir hasar sistem kütlelerinde herhangi bir değişikliğe neden olmaz. Çok aşırı olmayan korozyon hasarları bile ihmal edilebilir kütle değişimlerine neden olur.

Öte yandan yorulma çatlakları, eleman birleşimlerinde kaynak kırılması, perçin veya bulon ezilmeleri gibi hasarlar, kütle matrisinde hiçbir değişikliğe neden olmazken, rijitlik matrisinde belirgin değişikliklere neden olur.

Dolayısı ile yapıda oluşacak hasar nedeniyle kütlenin değişmeyeceği kabulü kullanılarak denklem 4.13 incelendiğinde, kütle (mevcut projelerden ve/veya çıkarılan rölevelerden) ve ivmenin (ölçümlerden) bilindiği, diğer değişkenlerin (rijitlik hasar ile değişiyor, hız ve yerdeğiştirme ölçülmüyor) bilinmediği görülmektedir. Ancak hız ve deplasman ivmenin fonksiyonları olduğu için bu değerler ivme datasından, uygulanacak uygun bir integrasyon yöntemi ile elde edilebilecektir. Sonuç olarak hasara bağlı olarak değişim gösteren rijitlik, dinamik data kullanılarak tanımlanabildiği takdirde, yapının bilgisayar modelinden elde edilen rijitlik ile kıyaslanarak hasarın yapı üzerinde mevcut olup olmadığı, eğer mevcut ise yeri saptanabilir.

Bu bilgiler kullanılarak elde edilen denklem 4.13 tekrar yazılacak olursa;

$$[M_{in}]\{\ddot{U}_{xm}(t)\} + [K_{in}^c]\{U_{xh}\} = \{0\} \quad (4.14)$$

şeklini alır. Bu denklemdaki indisler, "m" ölçümü, "h" integrasyon sonucu bulunacağını, "c" hesaplar sonucu bulunacağını, "in" matrisin indirgenmiş olduğunu göstermektedir.

4.14 denklemi kullanılarak; aşağıda denklem 4.15 olarak tanımlanan hata fonksiyonu, en küçük kareler optimizasyon yöntemi ile rijitlik matrisinin terimleri değişken alınarak minimize edilmek suretiyle $[K_{in}^c]$ matrisinin elemanlarının değerleri saptanmaktadır.

$$\{H\} = \{0\} - [M_{in}]\{\ddot{U}_{xm}\} - [K_{in}^c]\{U_{xh}\} \quad (4.15)$$

$$E = \{H\}^T \{H\}$$

4.4 İntegrasyon Yöntemi

Bölüm 4.3' te verilen hasar tespit yönteminin uygulanabilmesi için, ilk olarak ivme datasından integrasyon ile hız ve deplasman vektörlerinin elde edilmesi gerekmektedir. Bu integrasyon için Newmark Nümerik İntegrasyon Yöntemleri'nden biri kullanılacaktır.

Newmark 1959 yılında, patlama ve sismik yükleme problemlerinin çözümü için bir grup tek adım integrasyon yöntemleri geliştirmiştir. Son 40 yıl içerisinde Newmark yöntemleri birçok mühendislik yapısının dinamik analizi çözümlerinde kullanılmıştır. Bu amaçla başka araştırmacılar tarafından daha da geliştirilmiştir.

Denklem 4.1 için, Taylor serisinin direk kullanımı belirli bir zamana karşı gelen x -yer değiştirmesi ve $\dot{x}$ -hızı için denklem 4.16a ve 4.16b'yi verir. Burada Δt integrasyon adımını, $(.)$ zamana göre türevi tanımlamaktadır.

$$x_{n+1} = x_n + \Delta t \dot{x}_n + \frac{\Delta t^2}{2} \ddot{x}_n + \frac{\Delta t^3}{6} \dddot{x}_n + \dots \quad (4.16a)$$

$$\dot{x}_{n+1} = \dot{x}_n + \Delta t \ddot{x}_n + \frac{\Delta t^2}{2} \dddot{x}_n + \dots \quad (4.16b)$$

Newmark 4.16a ve 4.16b'yi düzenleyerek x -yer değiştirmesi ve $\dot{x}$ -hızı için denklem 4.16c ve 4.16d yi elde etmiştir: Burada γ ve β , kullanılan Newmark integrasyon tekniğine karşı gelen katsayılarıdır.

$$x_{n+1} = x_n + \Delta t \dot{x}_n + \frac{\Delta t^2}{2} \ddot{x}_n + \beta \Delta t^3 \dddot{x}_n \quad (4.16c)$$

$$\dot{x}_{n+1} = \dot{x}_n + \Delta t \ddot{x}_n + \gamma \Delta t^2 \dddot{x}_n \quad (4.16d)$$

Eğer ivmenin örnekleme aralığı içinde lineer olduğu kabul edilirse, $\ddot{x}$ için denklem 4.16e yazılabilir:

$$\ddot{x} = \frac{(\ddot{x}_{n+1} - \ddot{x}_n)}{\Delta t} \quad (4.16e)$$

Denklem 4.16e denklem 4.16c ve d' de yerlerine yerleştirilecek olursa Newmark'ın x- yer değıştirmesi ve $\dot{x}$ -hızı için standart denklemleri (denklem 4.16f ve g) elde edilmiş olur:

$$x_{n+1} = x_n + \Delta t \dot{x}_n + \left(\frac{1}{2} - \beta \right) \Delta t^2 \ddot{x}_n + \beta \Delta t^2 \ddot{x}_n \quad (4.16f)$$

$$\dot{x}_{n+1} = \dot{x}_n + (1 - \gamma) \Delta t \ddot{x}_n + \beta \Delta t \ddot{x}_n \quad (4.16g)$$

Değişik entegrasyon sabitleri (γ ve β) tanımlanarak çok sayıda entegrasyon metodu kullanılabilir. Tablo 4.1' de ençok kullanılan birkaç nümerik entegrasyon yöntemi özetlenmiştir. Bu tablodan açıkca görüldüğü gibi Δt aralıklarına bağılı olarak değışik entegrasyon sabitleriyle (γ ve β) farklı sonuç değeri bulunabilir.

Tablo 4.1 Nümerik İntegrasyon Teknikleri

Metot	γ	β	Hassasiyet
Merkezi farklar	1/2	0	Küçük Δt aralıkları için mükemmel Büyük Δt aralıkları için stabilitesi bozuk
Lineer ivme	1/2	1/6	Küçük Δt aralıkları için çok iyi Büyük Δt aralıkları için stabilitesi bozuk
Ortalama ivme	1/2	1/4	Küçük Δt aralıkları için iyi

Bu doktora çalışmasında kullanılan ivme ölçerlerin etkisinin de göz önüne alınabilmesi için kütle-yay sisteminden oluşan bir test düzeneğı kurulmuştur. Şekil 4.1'de görüldüğü gibi sistem bir yay, kütle, iki ivme ölçer ve bir deplasman ölçer ile data toplama sisteminden oluşmaktadır. Bu testin amacı, bilinen bir sistemden deplasman ölçerlerle alınan deplasman değeri ile, ivme datalarını kullanarak entegrasyon yöntemi ile elde edilecek deplasman değeriyle aynı olabilmesi için Newmark nümerik entegrasyon metodu sabitlerinin optimizasyon yöntemi ile belirlenmesidir.

Denklem 4.17' de verilen hata fonksiyonunun minimize edilme probleminin çözümü bize gerçek γ , β değerlerini verecektir. Bu değerler hasar tespit sırasında kullanılması gereken hız ve deplasman bilgilerinin Newmark metodu ile nümerik integrasyonu sırasında integrasyon sabitleri olarak kullanılacaktır.

$$\dot{x}_{n+1} = \dot{x}_n + (1-\gamma)\Delta t \ddot{x}_n + \beta \Delta t \ddot{x}_{n+1} \quad (a)$$

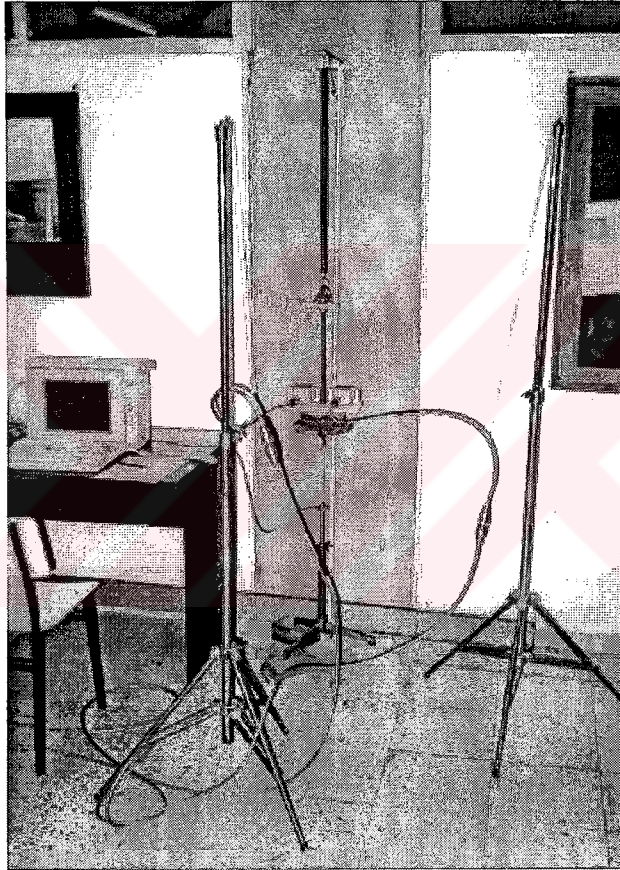
$$x_{n+1} = x_n + \Delta t \dot{x}_n + \left(\frac{1}{2} - \beta\right) \Delta t^2 \ddot{x}_n + \beta \Delta t^2 \ddot{x}_{n+1} \quad (b) \quad (4.17)$$

$$E = \sum_1^n \left(x_{n+1}^c - x_{n+1}^m \right)^2 \quad (c)$$

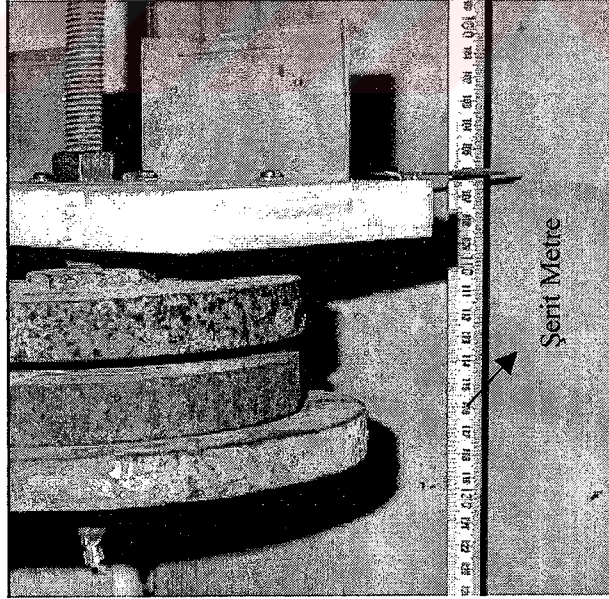
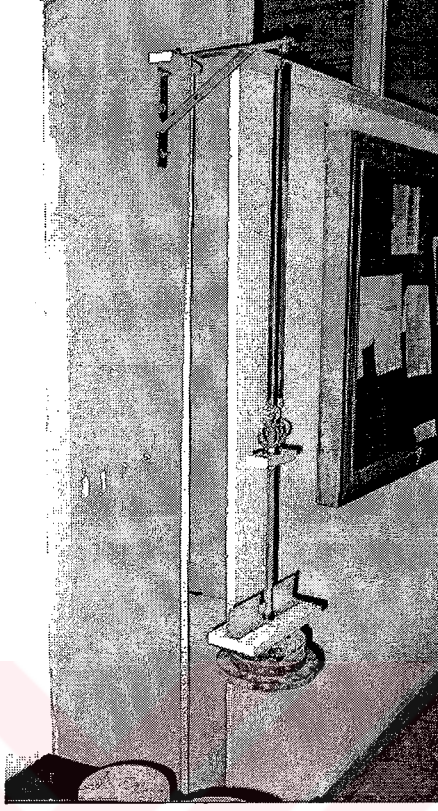
x_{n+1}^c , x_{n+1}^m sırasıyla hesaplanan yerdeğiştirme ve ölçülen yerdeğiştirme.

4.5 İntegrasyon Sabitlerinin Deneysel Olarak Saptanması

Bu çalışma için Şekil 4.1' deki yay-kütle sistemi kullanılmıştır. İlk önce yayın rijitliği hesaplamıştır. Bunun için yayın üzerine asılan değişik ağırlıklar altında yaptığı deplasmanlar ölçülmüştür (bak Şekil 4.2).

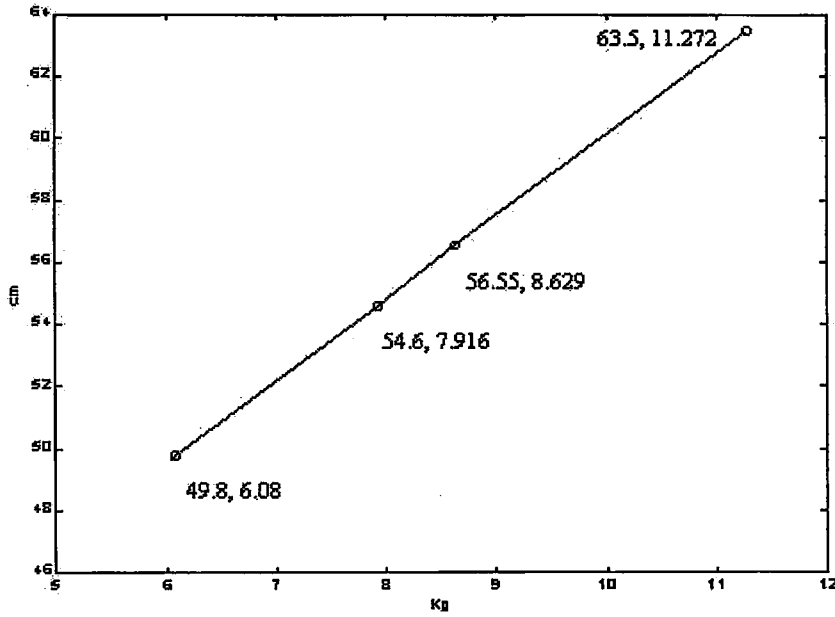


Şekil 4.1 Yay – Kütle sistemi



Şekil 4.2. Yay rijitliğinin belirlenmesi için yay sisteminin yüklenmesi.

Değişik ağırlıklar altında ölçülen yayın uzama miktarları Şekil 4.3'de verilmiştir.



Şekil 4.3 Yay ağırlık-yer değiştirme eğrisi

$$k_{\text{yay}} = \frac{11.272 - 6.08}{63.5 - 49.8} = 0.379 \approx 0.38 \text{ kg/cm}$$

Yukarda görüldüğü gibi Şekil 4.3'de elde edilen doğrudan yay rijitliğinin hesaplanmasından sonra, yay-kütle sisteminin doğru çalışıp çalışmadığının kontrolü için denklem 4.18 kullanılarak irdeleme yapılmıştır.

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4.18)$$

Şekil 4.1' de görülen sistemde yayın ucunda asılı olan kütle 10.708 kg, yay rijitliği $K_{\text{yay}} = 0.38 \text{ kg/cm}$ ' dir. Denklem 4.18 kullanıldığında frekans;

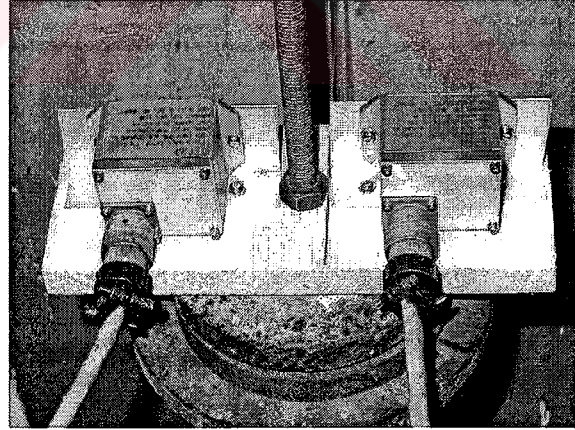
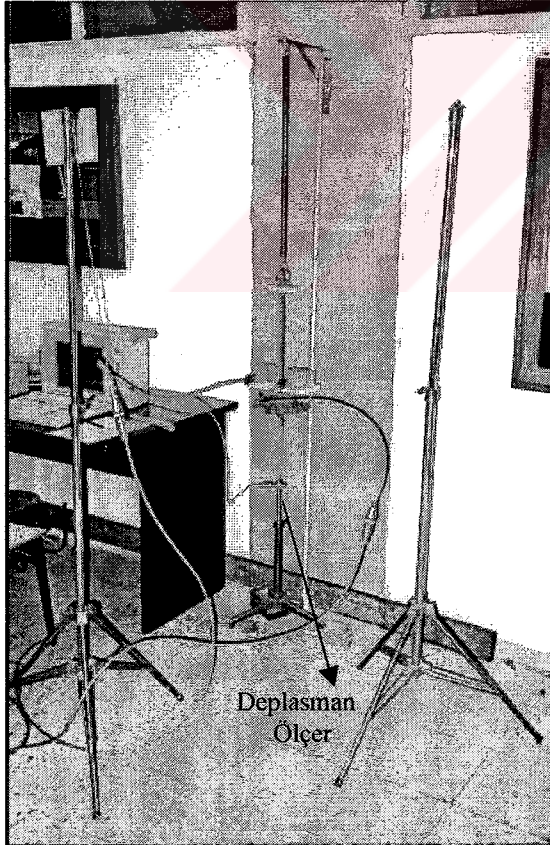
$$\omega = \sqrt{\frac{0.38}{10.708/981}} = 5.9003 \text{ rad/s} \Rightarrow f = \frac{\omega}{2\pi} = 0.93 \text{ Hz}$$

olarak hesaplanmaktadır. Yay-kütle sistemi doğru çalıştığı takdirde, aynı değerin ivme ölçerlerle kaydettiğimiz verilerin FFT' si (Fast Fourier Transform : Hızlı Fourier Dönüşümü) alınarak da bulunması gerekmektedir (bak Şekil 4.4. ve 4.5).

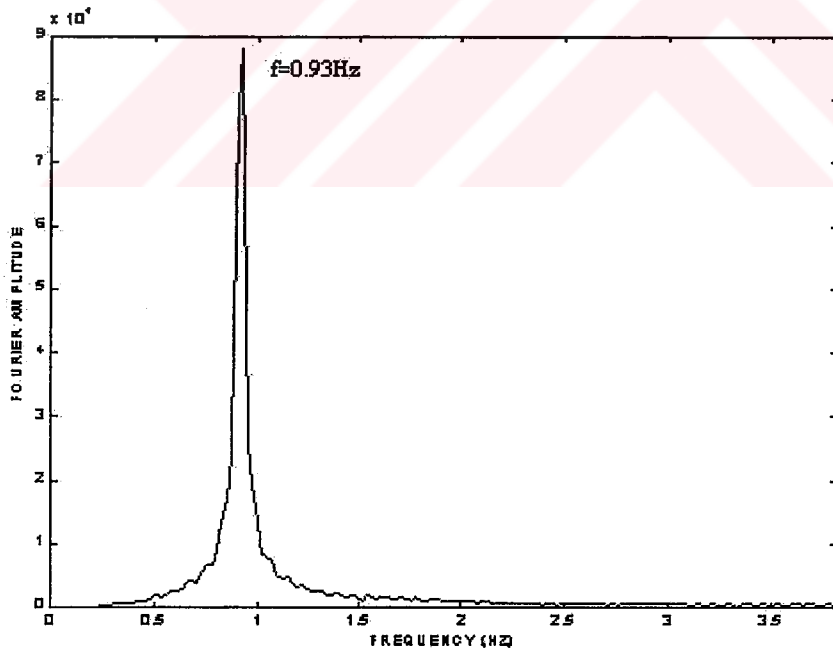
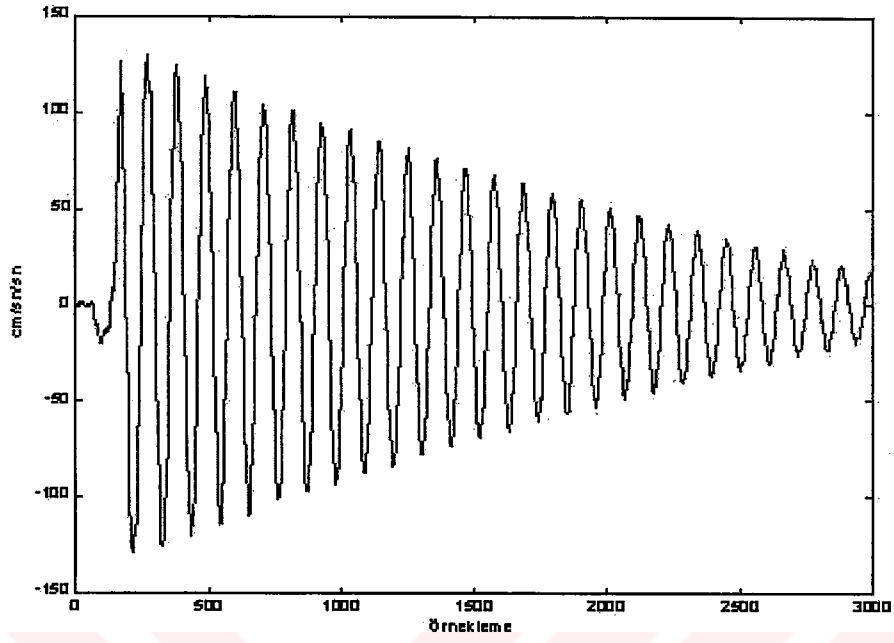
Sistemin tam olarak doğru çalıştığından emin olmak için benzer hesaplamalar sistemde yayın ucunda asılı olan kütle 13.508 kg, yay rijitliği $K_{yay} = 0.38 \text{ kg/cm}$ için tekrarlanmıştır.

$$\omega = \sqrt{\frac{0.38}{13.508/981}} = 5.2533 \text{ rad/s} \Rightarrow f = \frac{\omega}{2\pi} = 0.836 \text{ Hz}$$

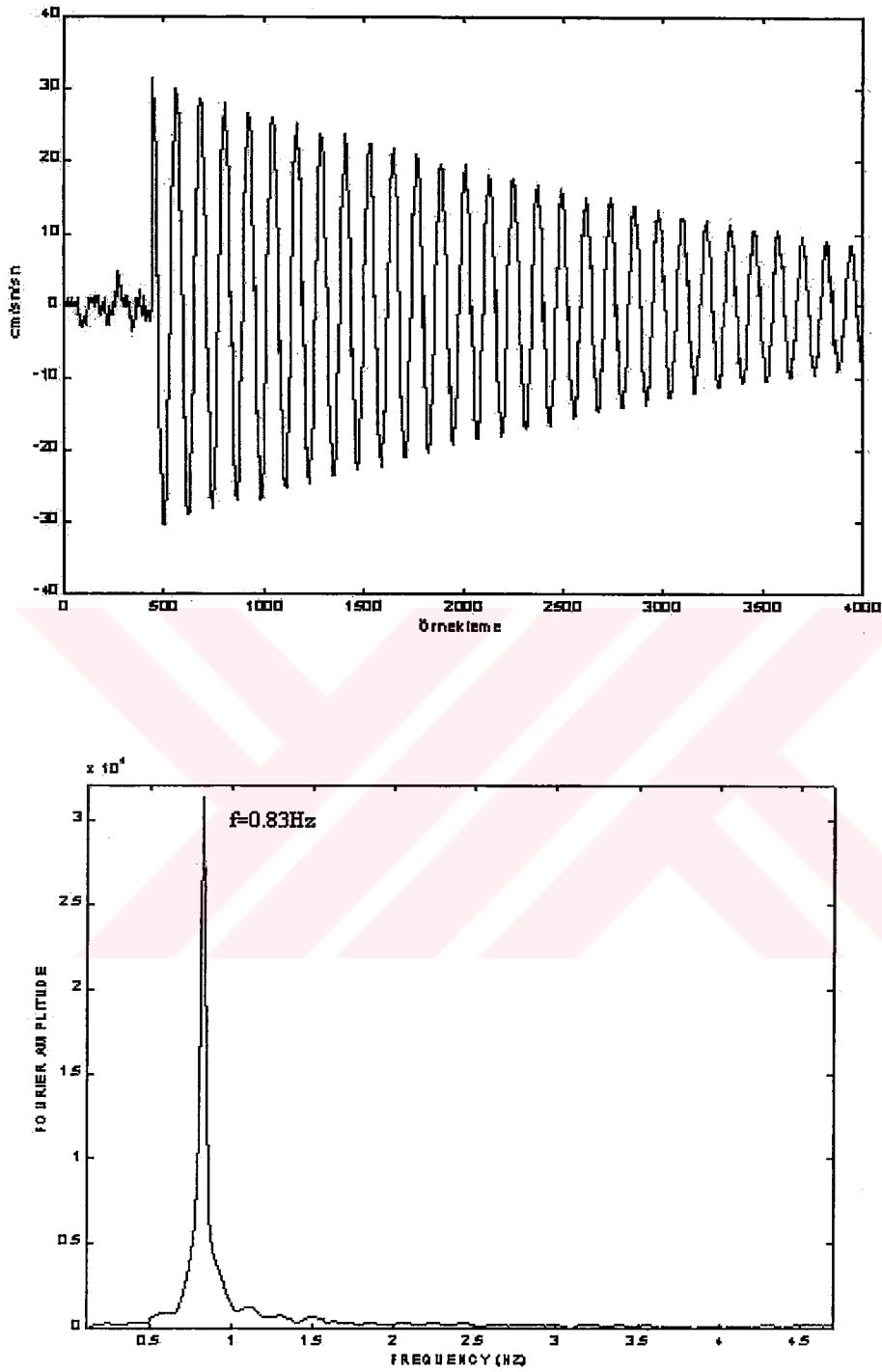
Yukarda görüldüğü gibi hesaplanan frekans değerleri, yay-kütle sisteminden alınan ivme kayıtları kullanılarak bulunan frekans değeri ile karşılaştırılmıştır (bak Şekil 4.6).



Şekil 4.4 Yay-Kütle sistemi ile ivme ve deplasman ölçerlerin yerleşimi



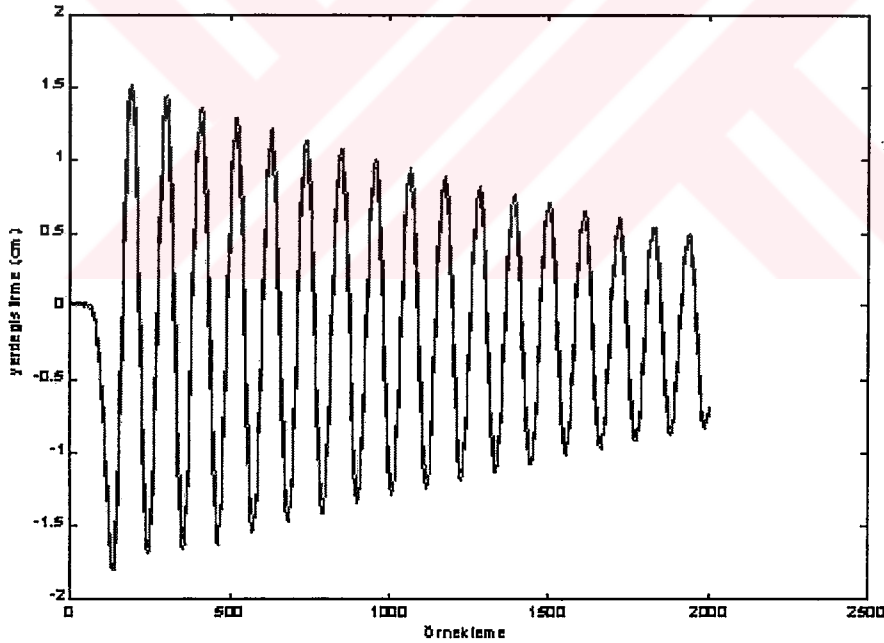
Şekil 4.5 Yay-kütle testi sırasında alınmış ivme kaydı ve bu kaydın FFT' si



Şekil 4.6 Yay-kütle sistemi üzerinden alınan ivme kaydı ve bu kaydın FFT' si

Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'dan da açıkça anlaşılabileceği gibi, analitik model ve gerçek model arasında tam bir uyum olduğu görülmektedir.

Yay rijitliği ve yay üzerindeki kütlelerin doğru olarak hesaplandığı gösterilmişti. Bu sistem kullanılarak Bölüm 4.1'de açıklanan Newmark sayısal integrasyon yöntemine ait γ ve β sabitlerinin hesaplanması için bir grup çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda yay-kütle sistemi üzerine yerleştirilen iki ivme ölçer ile kaydedilmiş datanın nümerik integrasyonu sonucu bulunan yer değiştirme vektörü ile, yine aynı sistemin altına yerleştirilmiş bir deplasman ölçer ile elde edilmiş yer değiştirme vektörünün arasındaki hatayı minimize edecek şekilde (bak Denklem 4.17), γ ve β sabitleri bulunmuştur. Şekil 4.7 deplasman ölçer ile elde edilen yer değiştirmeler ile, denklem 4.17' nin en küçük kareler yöntemi kullanılarak minimizasyonu ile elde edilen değerlerin üstüste düştüğünü göstermektedir. Kırmızı renkli grafik optimizasyon sonucu elde edilmiş yerdeğiştirmeleri, mavi renkli grafik deplasman ölçer ise ölçülmüş yerdeğiştirmeleri göstermektedir.



Şekil 4.7. Ölçüm ve hesap ile bulunan yer değiştirmeler

Hesaplar sonucu bulunan γ ve β değerleri, belirli bir ortalamanın etrafında salınmaktadır. Bazı değerler bu ortalamalara yakınken, bazı değerler de oldukça sapmaktadır. Özellikle ivme ve/veya hızın sıfıra sonsuz yakın olduğu değerler için γ

ve/veya β çok büyük/küçük değerler alabilmektedir. Mühendisçe bir yaklaşımla, ortalamadan oldukça sapan bu değerlerin, ortalamaya katılmaması gerektiği söylenebilir. Ancak, ortalamaya katılmaması gereken bu değerlerin hangi sınır değerlerden büyük veya küçük olacağının belirlenmesi gerekir. Bu sınırı belirlemek için denklem 4.19 kullanılır (Patrick O'Conner 1991) ;

$$P \left[-\alpha \leq \frac{\bar{x} - m}{\sigma \sqrt{\frac{1}{N}}} \leq \alpha \right] = \mu \quad (4.19)$$

μ , görülme olasılığı olmak üzere; bu sınır için %90 , %95, %99 gibi değerler seçilebilir. Bu denklemde σ standart sapmayı, $\bar{x}$ değerlerin ortalamasını, m herhangi bir değeri, N örnekleme (değer) sayısını göstermektedir. Bu doktora çalışması sırasında μ %95 (0.95) olarak seçilmiştir. α , seçilen μ değerine bağlı olarak Tablo 4.2' den alınır.

Tablo 4.2 μ ve α değerleri

μ	α
%90	1.65
%95	2.00
%99	2.50

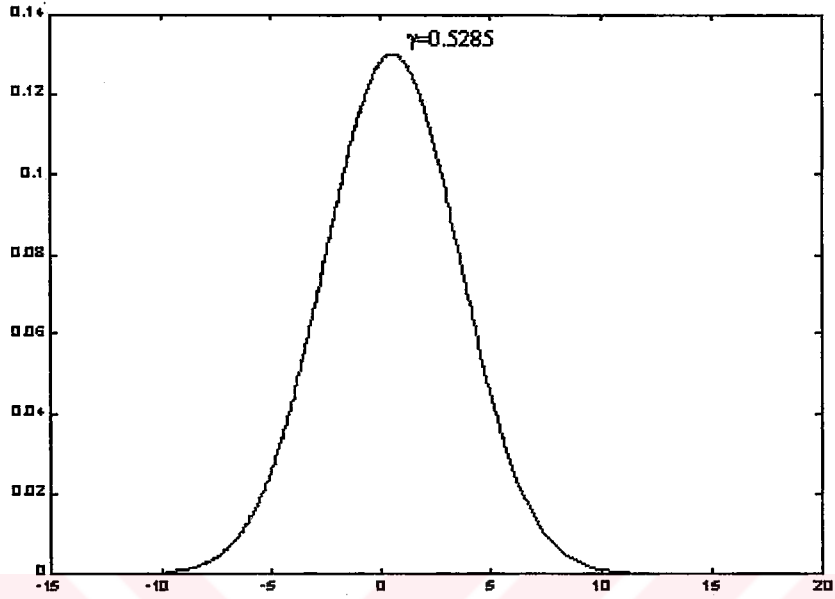
α ve μ değerleri denklem 4.19'da yerlerine konup, denklem düzenlendiği zaman denklem 4.19a elde edilir;

$$P \left[-2 \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \leq \bar{x} - m \leq 2 \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \right] = 0.95 \quad (4.19a)$$

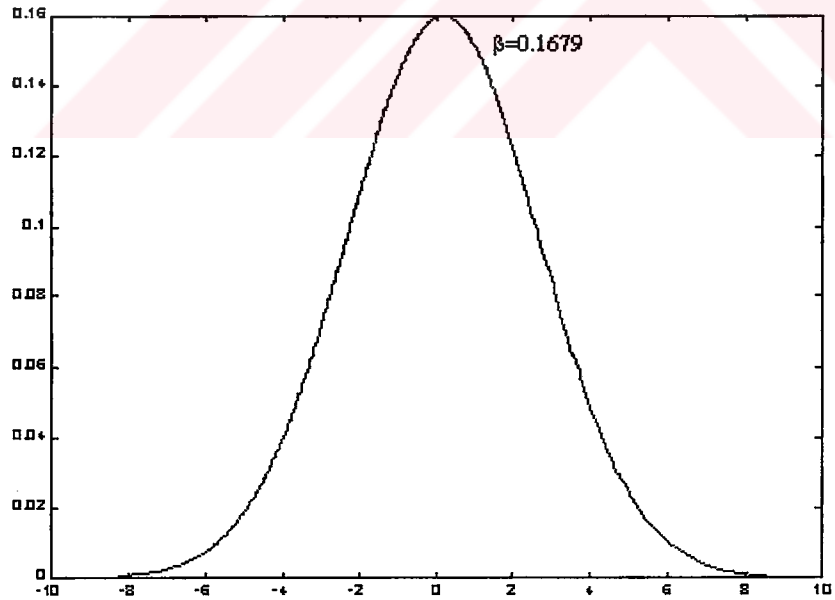
Bu denklem ile, $\bar{x} \pm 2 \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$ ifadesinden de anlaşılacağı gibi; ortalamadan ne kadar uzaklıktaki sınıra kadarki değerler alınırsa %95' lik bir güvenilirlik ile çalışılmış olacağı gözükmemektedir.

Bu doktora çalışması sırasında, hesaplanan sonuçlar %95 güvenilirlik sınırı içinde kalacak şekilde istatistiki olarak irdelenmiş ve bu değerlerin ortalamaları gözönüne alınarak ortalamaları sonuç değerler olarak kullanılmıştır.

Yürütülen bu optimizasyon işlemi sonucu elde edilen γ ve β sabitleri Şekil 4.8a ve 4.8b' de verilmiştir:



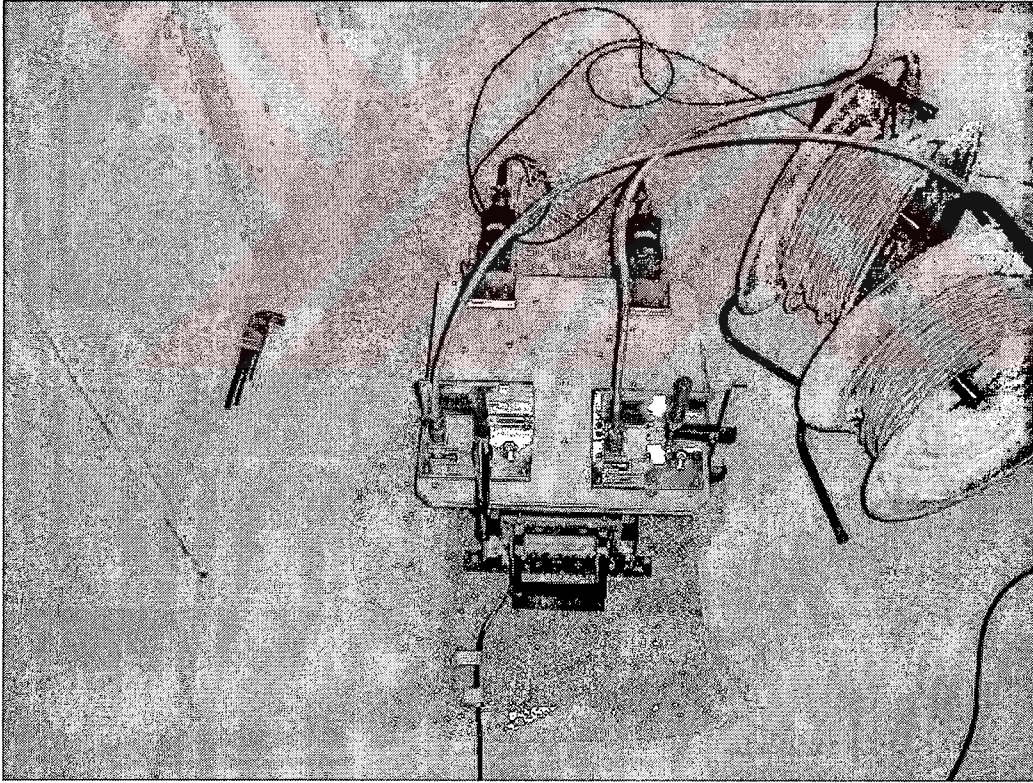
Şekil 4.8a γ için %95 güvenirlikli normal dağılım eğrisi



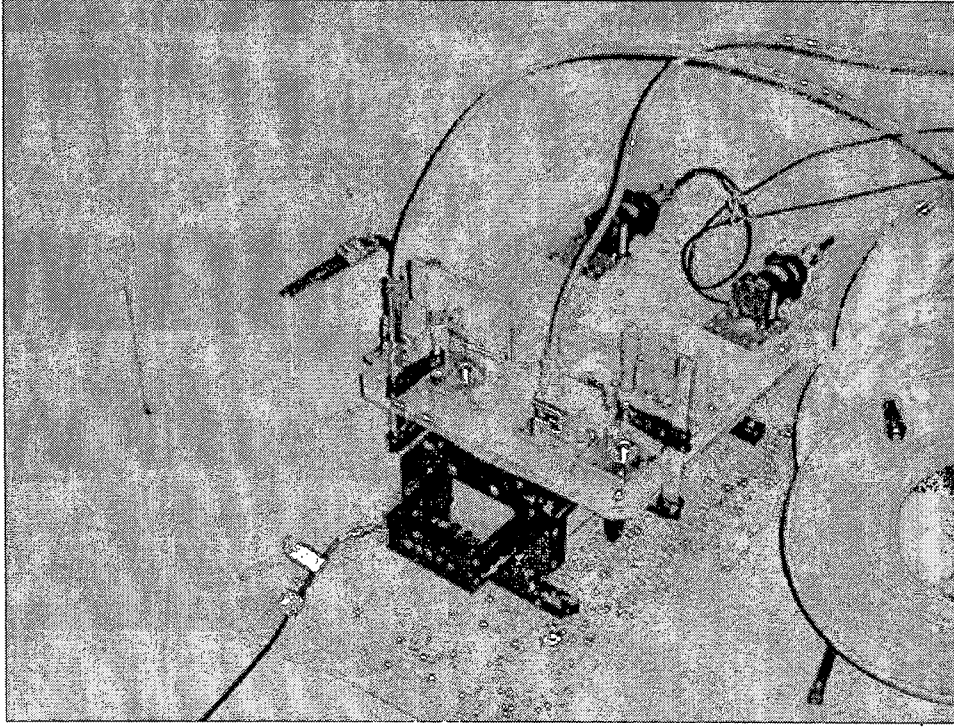
Şekil 4.8b β için %95 güvenirlikli normal dağılım eğrisi

Tablo 4.2' den de anlaşılabacağı gibi, bulunan β ve γ sabitleri Newton sayısal integrasyon metodunda Δt zaman aralığında ivmenin lineer değıştiğı kabulüne dayanan değerlerle üst üste düşmektedir.

Yay-kütle sistemi ile yapılan deneyler sırasında 1Hz civarındaki frekanslara ait ivme ve deplasmanlar kaydedilebilmiş ve bu kayıtlarla çalışma yapılmıştır. Oysa bir yapı üzerinden alınacak ivme kayıtlarında daha yüksek frekanslara ait bilgilerin de bulunacağı açıktır. Bunun için ivme ölçerlerle kaydedilmiş bu yüksek frekansları da içeren ivme verilerinin integrasyonu ile bulunacak deplasman bilgilerinin doğru olması için de hangi γ ve β değerlerinin kullanılması gerektiğı hesaplanmalıdır. Bu amaçla, İTÜ Yapı ve Deprem Laboratuvarı'nda JICA tarafından hibe edilmiş titreşim tablası üzerinde bir seri deney yapılmıştır (bak Şekil 4.9).

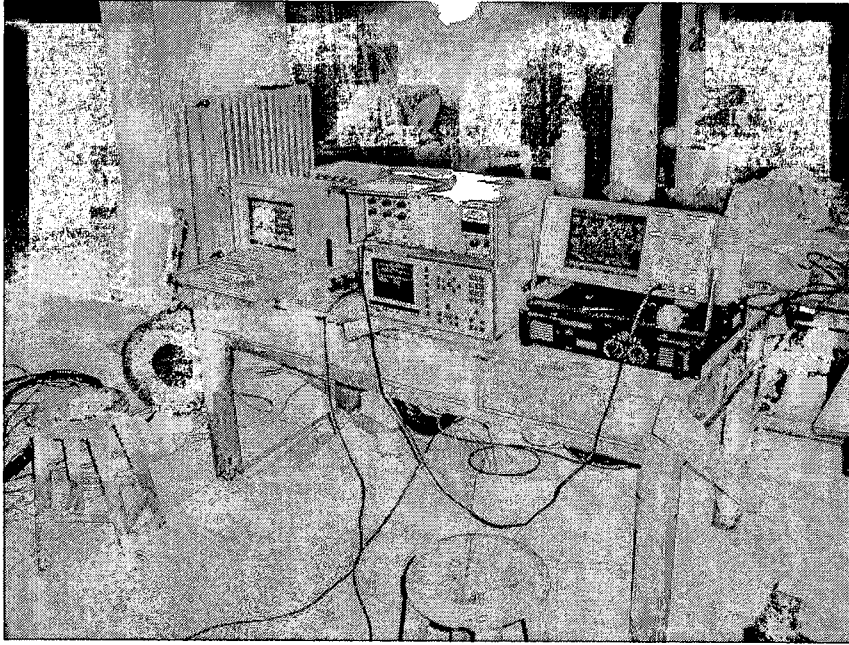


Şekil 4.9a Titreşirme tablası ve ivme ölçerlerin yerleşimi



Şekil 4.9b Titreştirme tablası ve ivme ölçerlerin yerleşimi

Bir sinyal jeneratörü, bir anfi, bağlantı kutusu (connection box) ve sinyal ve FFT işleyicisinden (signal and FFT analyzer) oluşan kontrol sistemi, titreşim tablasına ivme, hız ve deplasman kontrollü olarak istenilen şekilde tek yönlü hareket verdirebilmektedir (bak Şekil 4.10).

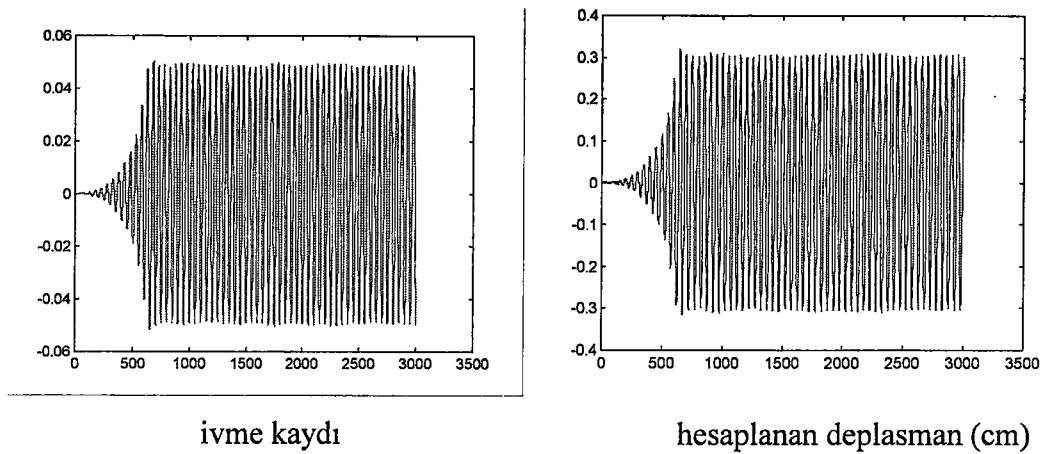


Şekil 4.10 Titreştirme Tablası Kontrol Ünitesi

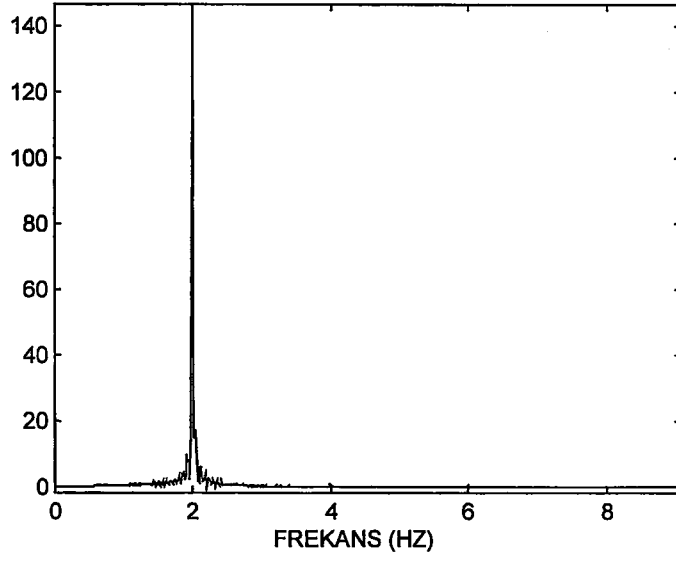
Bu deneyler sırasında ;	2.0Hz	$\pm 3\text{mm}$	(6mm peak to peak)
	2.5Hz	$\pm 3\text{mm}$	(6mm peak to peak)
	5.0Hz	$\pm 3\text{mm}$	(6mm peak to peak)
	7.5Hz	$\pm 3\text{mm}$	(6mm peak to peak)
	10Hz	$\pm 1.5\text{mm}$	(3mm peak to peak)

deplasman uygulanmış ve kayıtları alınmıştır.

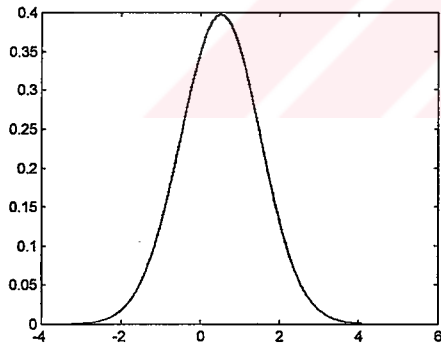
2 Hz $\pm 3\text{mm}$ deplasman kontrollü deney sırasında alınan kayıt kullanılarak saptanan değerler (Şekil 4.11 ve 4.12) yer almaktadır.



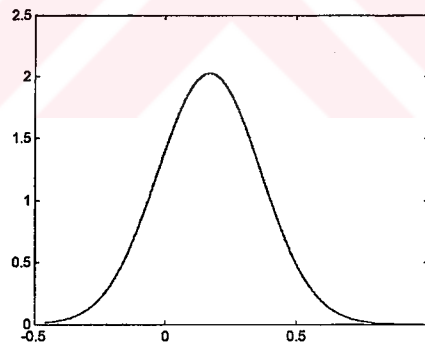
Şekil 4.11a



Sekil 4.11b 2Hz ± 3 mm deplasman kontrollü test sırasında alınan ivme kayıdı ve FFT grafiği ve bu kayıt kullanılarak bulunan deplasman değerleri.



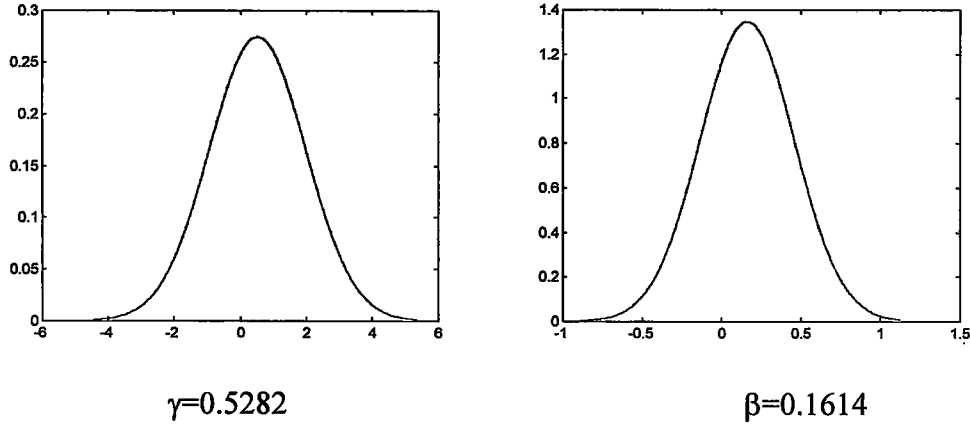
$$\gamma=0.5109$$



$$\beta=0.1678$$

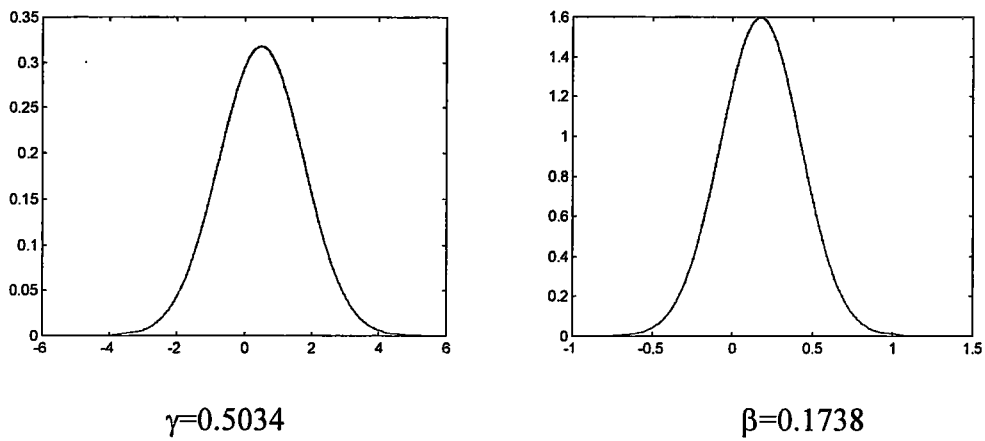
Şekil 4.12 Optimizasyon sonucu bulunan γ ve β değerleri

2.5 Hz ± 3 mm deplasman kontrollü deney sırasında alınan kayıt kullanılarak bulunan değerler Şekil 4.13’ de verilmektedir.



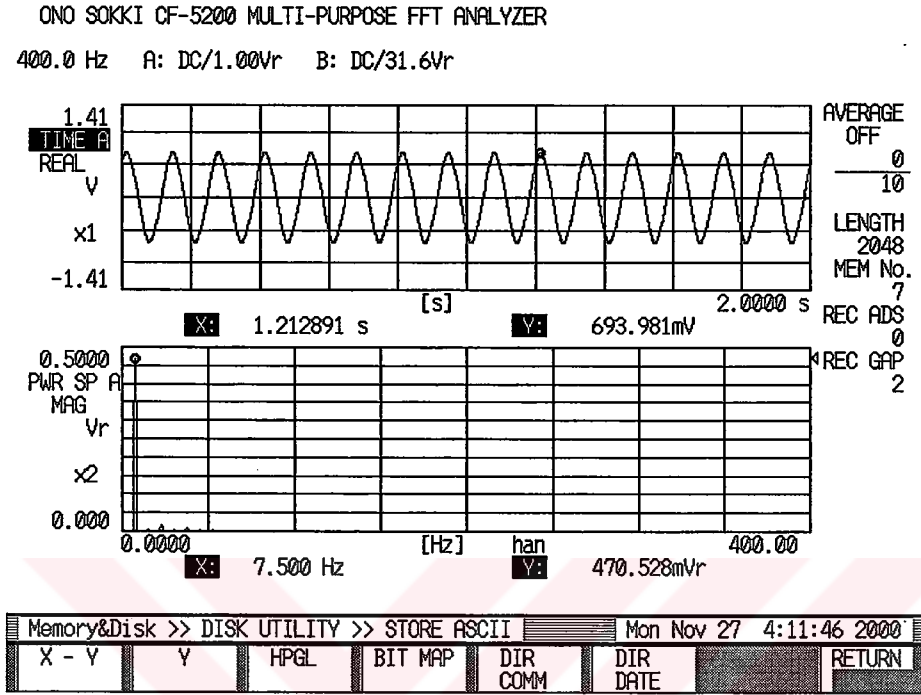
Şekil 4.13 Optimizasyon sonucu bulunan γ ve β değerleri

5Hz ± 3 mm deplasman kontrollü deney sırasında alınan kayıt kullanılarak bulunan değerler Şekil 4.14’ de verilmektedir.

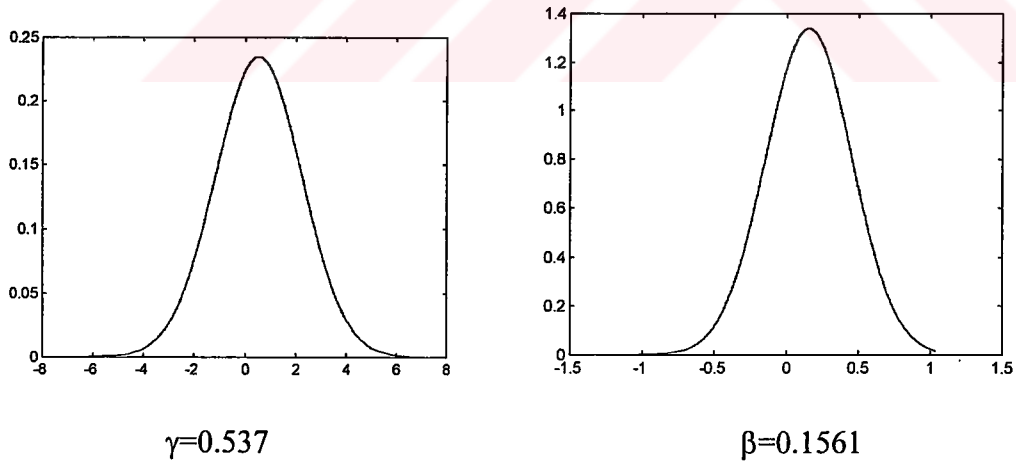


Şekil 4.14 Optimizasyon sonucu bulunan γ ve β değerleri

7.5Hz ± 3 mm deplasman kontrollü deney sırasında alınan kayıt kullanılarak (bak Şekil 4.15) bulunan değerler Şekil 4.16' da verilmektedir.

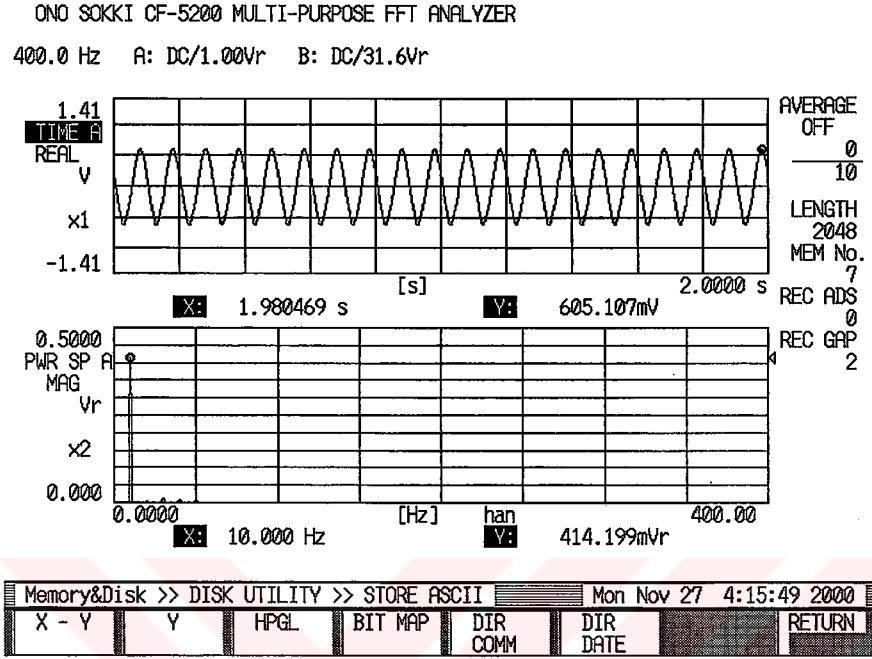


Şekil 4.15 7.5Hz Yüklemesi (Titreşim tablası FFT analizör ünitesi ekran görüntüsü)

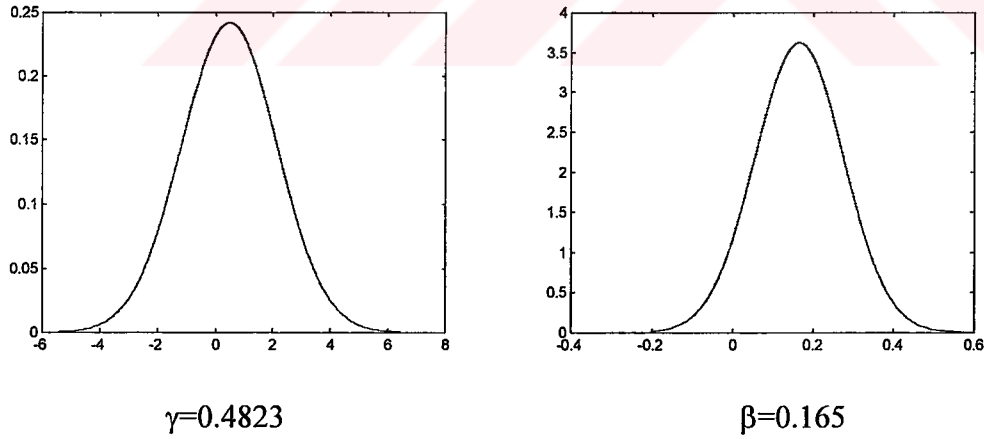


Şekil 4.16 Optimizasyon sonucu bulunan γ ve β değerleri

10 Hz ± 1.5 mm deplasman kontrollü deney sırasında alınan kayıt ve bu kayıt kullanılarak bulunan değerler Şekil 4.17 ve 4.18’ de verilmektedir.



Şekil 4.17 10 Hz Yüklemesi (Titreşim tablası FFT analizör ünitesi ekran görüntüsü)



Şekil 4.18 Optimizasyon sonucu bulunan γ ve β değerleri

Bu değerler kullanılarak $\bar{\gamma}$ ve $\bar{\beta}$ hesaplandığı zaman;

$\bar{\gamma} = 0.51236$, $\bar{\beta} = 0.16482$ olarak bulunur.

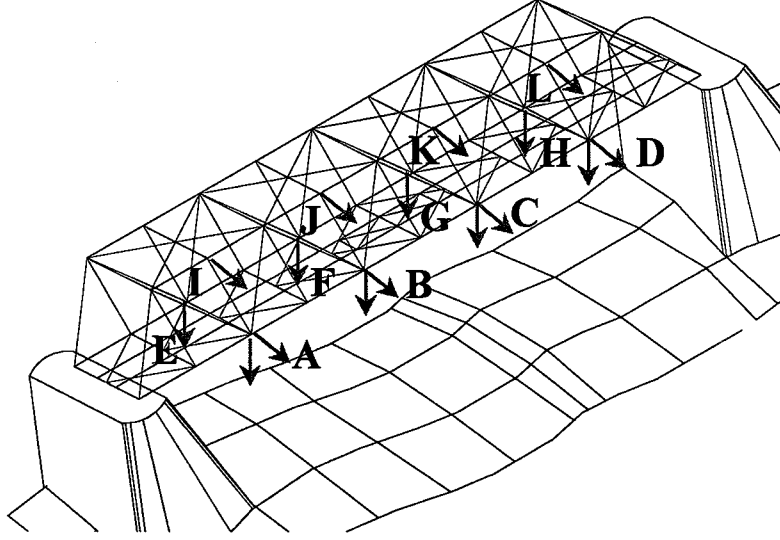
Bulunan bu $\bar{\gamma}$ ve $\bar{\beta}$ değerleri, teorik γ ve β değerleri ile karşılaştırıldığında, değerlerin birbirlerine oldukça yakın olduğu açıkça görülmektedir.

Tablo 4.3 γ ve β değerleri

	Hesaplanan değerler	Teorik değerler
γ	0.51236	$1/2 = 0.5$
β	0.16482	$1/6 = 0.16667$

Tablo 4.1 ve Tablo 4.3 incelendiği zaman hem düşük hem de yüksek frekanslarda lineer ivme yöntemi bu integrasyon için yeterli seviyede hassas sonuç verdiği açıkça anlaşılmaktadır.

4.6 Hasar Belirleme Yöntemi



Şekil 4.19 Köprü Modeli ve Seçilen Ölçüm Doğrultuları

Önceki bölümlerde de belirtildiği gibi bu doktora çalışmasında ele alınan problem, sistem belirleme (system identification) değil hasar belirleme problemidir. Geliştirilen algoritmanın amacı hasarın varlığının ve yerini belirleme probleminin çözülmesidir, hasarın şiddetinin saptanması değildir.

Geliştirilen algorithmada hasarın varlığının ve yerinin saptanmasında, K_{in} indirgenmiş rijitlik matrisindeki değişim kullanılmaktadır. Bu nedenle, daha önceden bir ön çalışma ile sistem üzerinden belirlenmiş ölçüm noktalarından (bak Şekil 4.19) kaydedilmiş ivme datalarını kullanarak aşağıda verilmiş hata fonksiyonu, rijitlik matrisi elemanlarını değişken kabul ederek bir optimizasyon tekniği kullanılarak minimize edilmektedir.

$$\{H\} = \{0\} - [M_{in}]\{\ddot{U}_{xm}\} - [K_{in}^c]\{U_{xh}\}$$

$$E = \{H\}^T \{H\}$$

Hata fonksiyonunun en küçük kareler yöntemiyle minimize edilerek çözülmesinden elde edilen $[K_m^c]$ indirgenmiş gerçek sistemin rijitlik matrisi belirlenir.

Bilgisayar ortamında sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmiş kiriş için ilgili ölçüm serbestlik derecelerine (ölçüm noktası, doğrultusu) sistem kütle ve rijitlik matrisleri indirgenir.

Gerçek sistemin ve sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmiş sistemin indirgenmiş rijitlik matrisleri birbirleri ile mukayese edilir. Değişim hasarın varlığını göstermektedir.

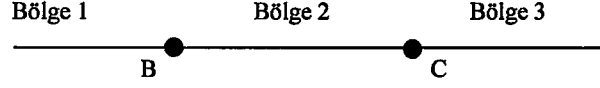
Örneğin B ve C noktalarına konulan düşey yönlü ivme ölçerden alınan kayıtlar kullanılarak K_{BC}^{BC} B-C noktalarında düşey serbestlik derecelerine karşı gelen indirgenmiş rijitlik matrisi denklem 4.15'in çözümü ile elde edilecektir (bak Şekil 4.20). Aynı serbestliklere karşı gelen K_{bc}^{bc} indirgenmiş rijitlik matrisi analitik olarak hesaplanır. Bu matrislerin ikisi de 2x2 boyutundadır (bak denklem 4.20).

$$\begin{aligned} K_{\sim}^{BC} &= \begin{bmatrix} K_{BB} & K_{BC} \\ K_{CB} & K_{CC} \end{bmatrix} \\ K_{\sim}^{bc} &= \begin{bmatrix} K_{bb} & K_{bc} \\ K_{cb} & K_{cc} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.20)$$

Saptanan test değerleri ile teorik değerler (indirgenmiş rijitlik matrisleri) bir tablo hazırlanarak kıyaslanır.

Tablo 4.4 İndirgenmiş rijitlik matrislerinin kıyaslanması

İndirgenmiş Rijitlikler		Değişim %
Test Değeri	Teorik Değer	
$\begin{bmatrix} K_{BB} & K_{BC} \\ K_{CB} & K_{CC} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} K_{bb} & K_{bc} \\ K_{cb} & K_{cc} \end{bmatrix}$	$100 \times \begin{bmatrix} \frac{K_{bb} - K_{BB}}{K_{cb}} & \frac{K_{bc} - K_{BC}}{K_{cc}} \\ \frac{K_{cb} - K_{CB}}{K_{cb}} & \frac{K_{cc} - K_{CC}}{K_{cc}} \end{bmatrix}$



Şekil 4.20 Hasar ve rijitlikteki değişim

Yapılan çalışmalar göstermiştir ki; BC ölçüm noktaları olmak üzere, hasar eğer "Bölge 2" de ise (bak Şekil 4.20) değişim ençok K_{BC} de görülmektedir, hasar "Bölge 1" de ise değişim ençok K_{BB} de görülmektedir, hasar "Bölge 3" de ise değişim ençok K_{CC} de görülmektedir ve hasar yayılı bir hasar ise ve "Bölge 1, Bölge 2, Bölge 3" de ise değişim ençok K_{BB} ve K_{CC} de görülmektedir.

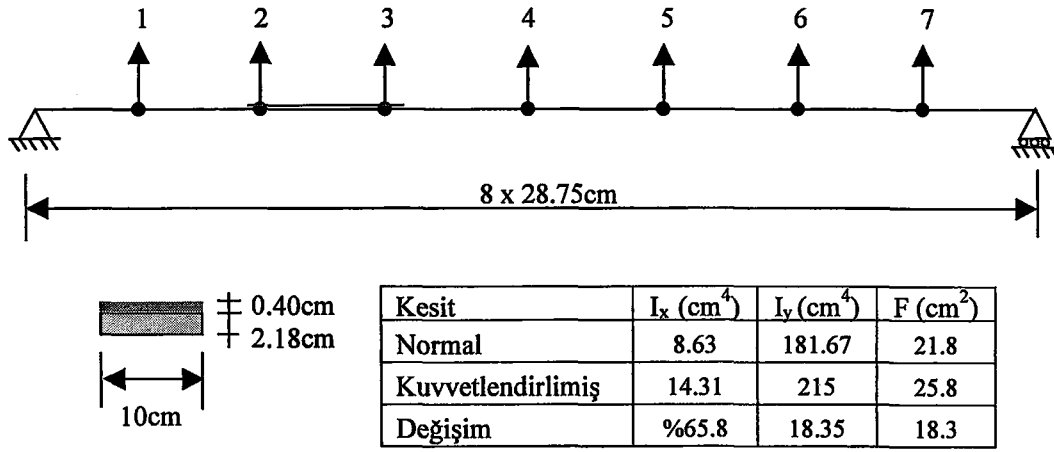
4.7 Laboratuvar Koşullarında Uygulama

Bu doktora çalışmasında geliştirilmiş olan algoritma 230 cm x 10 cm x 2.18 cm boyutlarındaki basit mesnetli bir kiriş üzerinde uygulanmış ve elde edilen sonuçlar izleyen bölümlerde verilmiştir.

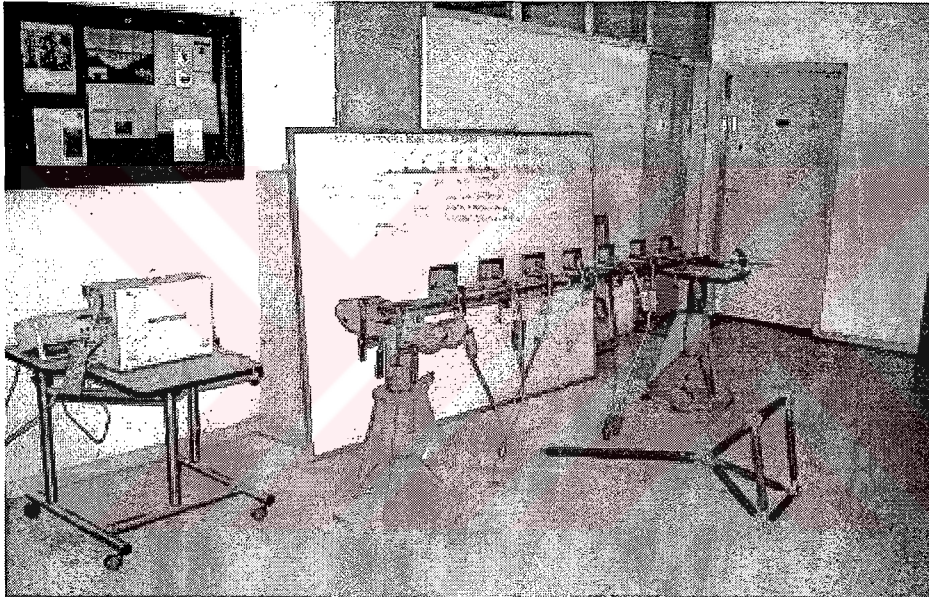
4.7.1 Deney Düzeneği

Uygulamada 230 cm uzunluğunda, 10 cm genişliğinde ve 2.18 cm et kalınlığında basit mesnetli bir çelik kiriş kullanılmış, 46 cm uzunluğunda 10 cm genişliğinde ve 0.40 cm et kalınlığındaki bir levha kaynaklanarak bu kirişe eklenmiş ve kirişin rijitliğinde oluşturulan bu değişimin, sunulan bu çalışma çerçevesinde geliştirilen algoritma ile belirlenip belirlenemeyeceği incelenmiştir (bak şekil 4.21, 4.22, 4.23).

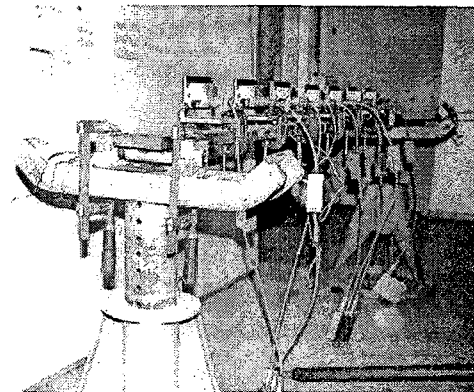
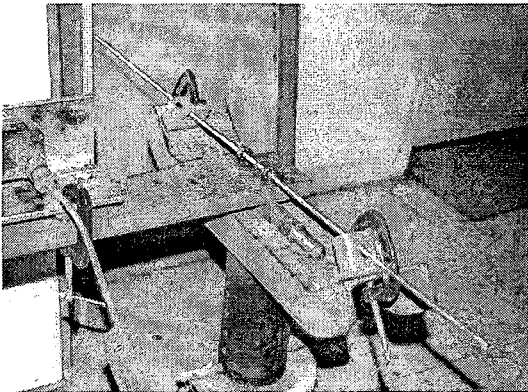
Prototip üzerinden ölçüm alınacak noktalar Şekil 4.21' de görülmektedir. Bu çalışmada geliştirilmiş olan yöntem için gerekli ivme datasını kaydetmek üzere iki adet ivmeölçerin kullanılmasının yeterli olmasına rağmen, uygulama sırasında yedi adet ivmeölçer veriyi bir kerede kaydetmek için kullanılmıştır. Ancak verilerin işlenmesi sırasında bu kayıtlar sanki ikişer ikişer ardışık olarak kaydedilmiş gibi hesaba sokulup sonuçlar elde edilmiştir.



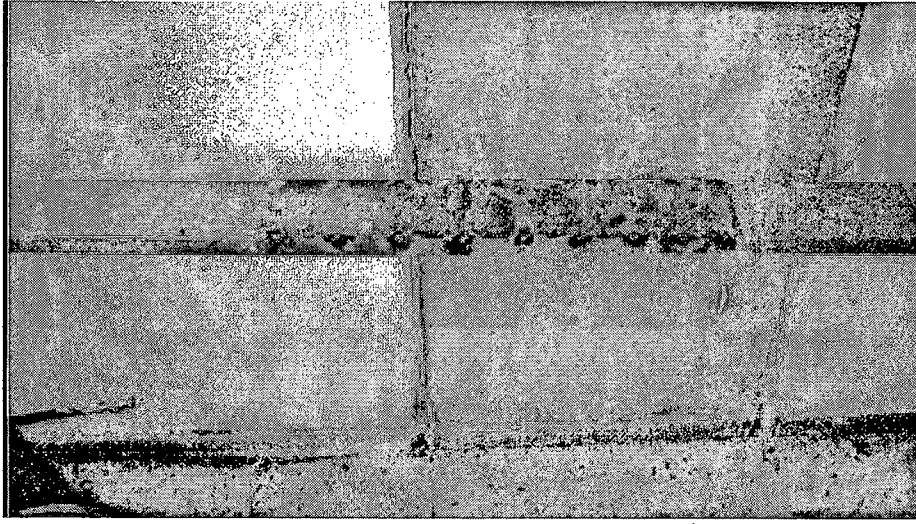
Şekil 4.21 Şematik test düzeneği (F : enkesit alanı; I : atalet momenti)



Şekil 4.22 Test düzeneği



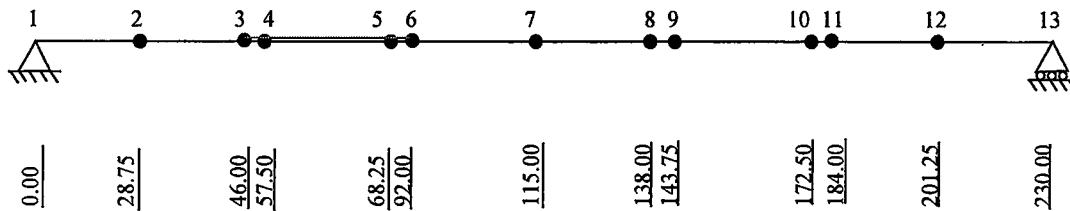
Şekil 4.23a Prototip mesnetlenme şekilleri (sırasıyla soldan sağa kayıcı, sabit)



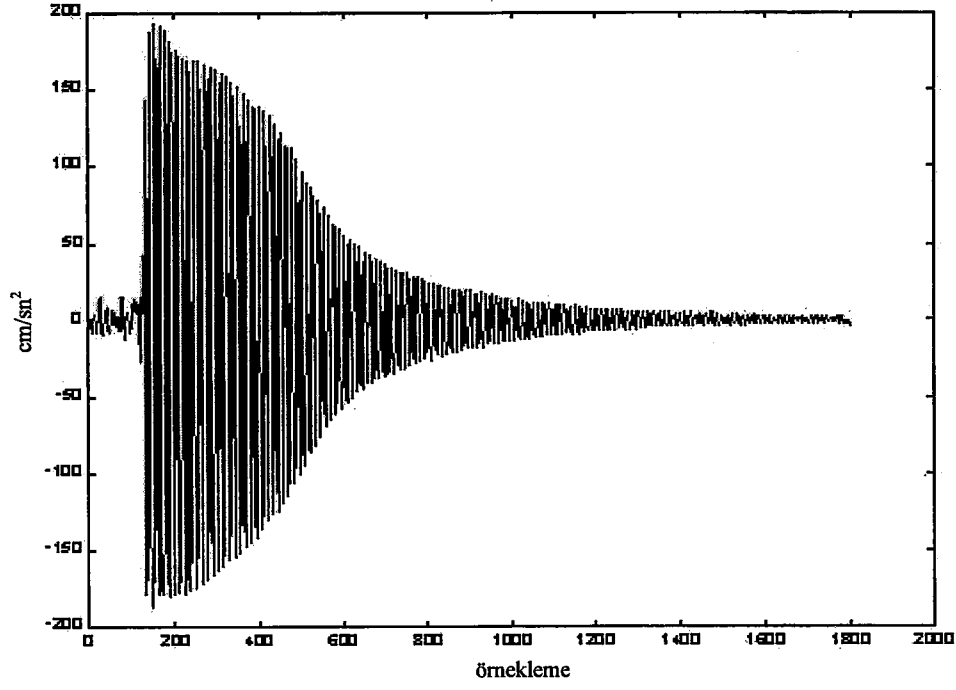
Şekil 4.23b Prototip kirişin kaynaklanan çelik levha ile güçlendiriliş şekli

4.7.2 Prototip Kiriş Üzerinde Ön Çalışma

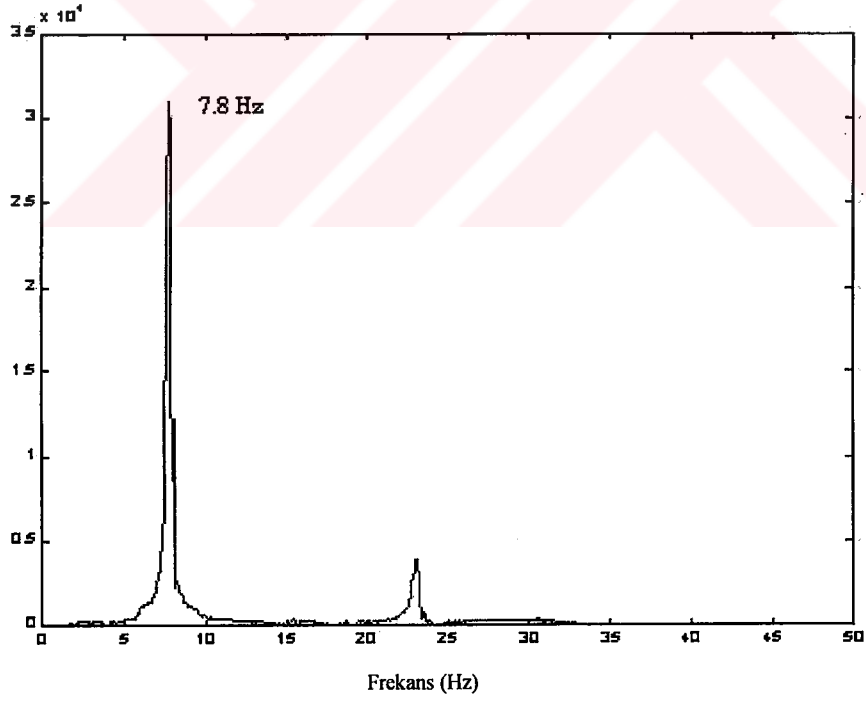
Bilgisayar ortamında modellenen kirişin prototip kirişi temsil edip etmediğini anlamak için kiriş üzerinden alınan bir ivme datası işlenerek modlarına ait frekanslar, bilgisayar modelinden sonlu eleman analizleri sonucu bulunan mod ve frekanslarla karşılaştırılmıştır. Cosmos/M Sonlu Elemanlar Programı ile bilgisayar ortamında modellenen prototip kirişin (bak Şekil 4.24) birinci moduna ait frekans 7.7925 Hz olarak bulunmuştur. Prototip kirişten alınan ivme dataları kullanılarak aynı moda karşı gelen frekans değeri olarak 7.8 Hz tespit edilmiştir. Şekil 4.25' de Şekil 4.26' de verilen ivme kaydının FFT' si (Hızlı Fourier dönüşümü) görülmektedir.



Şekil 4.24. Bilgisayar Modeli (cm)



Şekil 4.25 Prototip üzerinden alınmış bir ivme kaydı



Şekil 4.26 Prototipe ait ivme kaydının FFT (Hızlı Fourier Dönüşümü) sonucu

4.7.3 Yöntemin Kiriş Üzerine Uygulanması

Bilgisayar ortamında modellenen prototipin gerçek prototipi yansıttığı gösterildikten sonra, bilgisayar ortamında kiriş üzerinde Duyarlılık (hassasiyet) Analizi (Sensitivity Analysis) çalışmaları yapılmıştır. Bu ön çalışma, kirişin üzerindeki rijitlik artışının eleman rijitlik matrisine nasıl yansıdığını göstermektedir. Şekil 4.21' de verilen bilgisayar modeli kullanılarak ilgili serbestlik derecelerinde artışın miktarı ve yüzdesi bir tablo halinde Tablo 4.5'de verilmiştir.

Tablo 4.5 Duyarlılık Analizi Sonuçları (1/2)

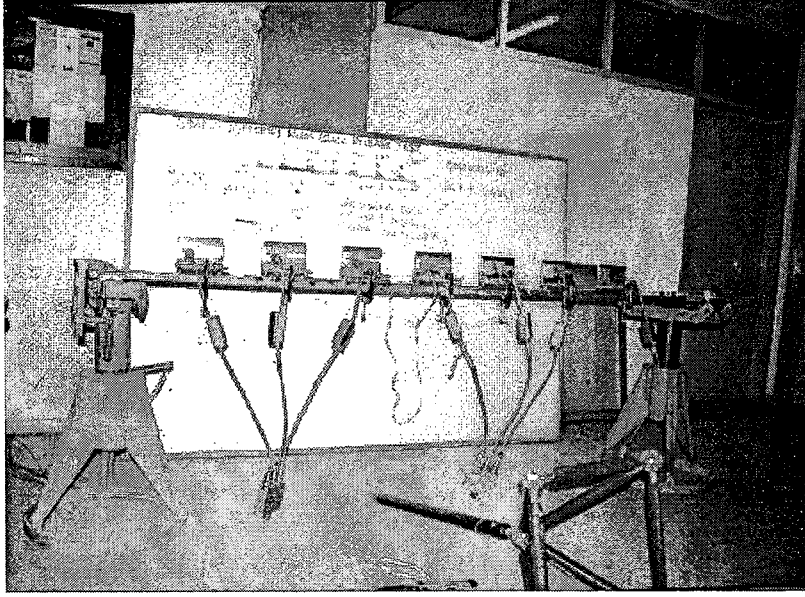
Düğüm No.	Rijitlik		Değişim %
	Normal	Kuvvetlendirilmiş	
2-12	$K_{2-12} = \begin{bmatrix} 0.52 & -0.31 \\ -0.31 & 0.52 \end{bmatrix}$	$K_{2-12} = \begin{bmatrix} 0.60 & -0.33 \\ -0.33 & 0.52 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -14.37 & -6.05 \\ -6.05 & -1.12 \end{bmatrix}$
2-7	$K_{2-7} = \begin{bmatrix} 1.04 & -0.39 \\ -0.39 & 0.22 \end{bmatrix}$	$K_{2-7} = \begin{bmatrix} 1.12 & -0.40 \\ -0.40 & 0.22 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -8.19 & -3.27 \\ -3.27 & -2.14 \end{bmatrix}$
2-5	$K_{2-5} = \begin{bmatrix} 1.61 & -0.70 \\ -0.70 & 0.38 \end{bmatrix}$	$K_{2-5} = \begin{bmatrix} 1.69 & -0.73 \\ -0.73 & 0.41 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -4.75 & -4.06 \\ -4.06 & -6.44 \end{bmatrix}$
2-4	$K_{2-4} = \begin{bmatrix} 3.84 & -2.22 \\ -2.22 & 1.40 \end{bmatrix}$	$K_{2-4} = \begin{bmatrix} 3.97 & -2.35 \\ -2.35 & 1.54 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -3.58 & -6.06 \\ -6.06 & -9.89 \end{bmatrix}$
4-5	$K_{4-5} = \begin{bmatrix} 2.19 & -1.71 \\ -1.71 & 1.42 \end{bmatrix}$	$K_{4-5} = \begin{bmatrix} 2.72 & -2.08 \\ -2.08 & 1.69 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -24.41 & -21.79 \\ -21.79 & -19.15 \end{bmatrix}$
4-6	$K_{4-6} = \begin{bmatrix} 1.63 & -1.24 \\ -1.24 & 1.01 \end{bmatrix}$	$K_{4-6} = \begin{bmatrix} 2.03 & -1.49 \\ -1.49 & 1.18 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -24.47 & -20.16 \\ -20.76 & -17.07 \end{bmatrix}$
4-7	$K_{4-7} = \begin{bmatrix} 0.76 & -0.52 \\ -0.52 & 0.43 \end{bmatrix}$	$K_{4-7} = \begin{bmatrix} 0.96 & -0.63 \\ -0.63 & 0.49 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -27.22 & -20.37 \\ -20.37 & -13.20 \end{bmatrix}$
3-5	$K_{3-5} = \begin{bmatrix} 1.60 & -1.04 \\ -1.04 & 0.76 \end{bmatrix}$	$K_{3-5} = \begin{bmatrix} 1.83 & -1.17 \\ -1.17 & 0.85 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -14.54 & -12.55 \\ -12.55 & -11.36 \end{bmatrix}$

Tablo 4.5 Duyarlılık Analizi Sonuçları (2/2)

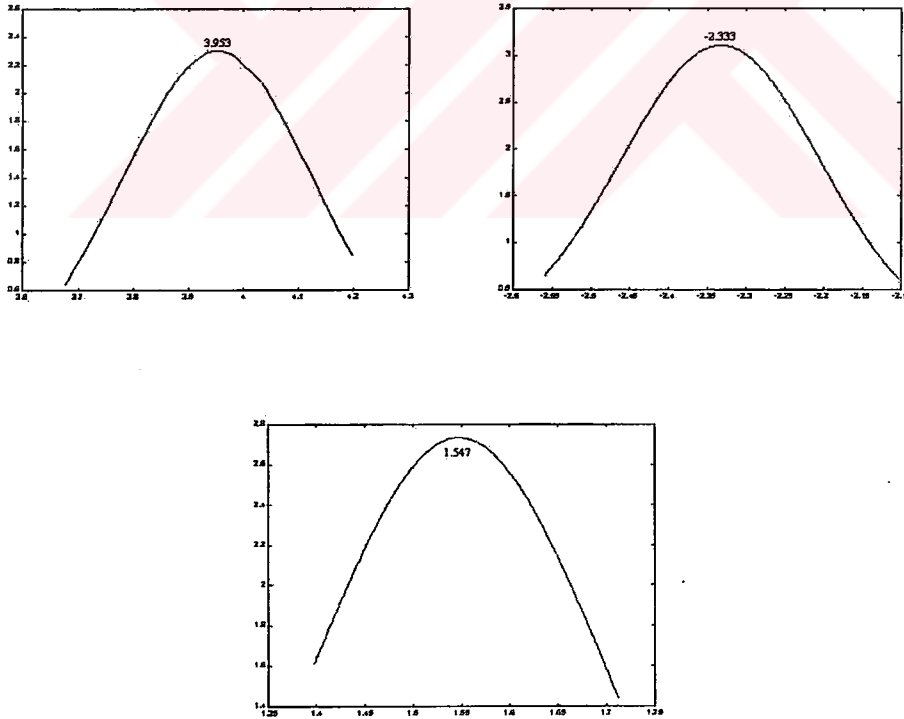
Düğüm No.	Rijitlik		Değişim %
	Normal	Kuvvetlendirilmiş	
3-6	$K_{3-6} = \begin{bmatrix} 1.32 & -0.83 \\ -0.83 & 0.60 \end{bmatrix}$	$K_{3-6} = \begin{bmatrix} 1.51 & -0.93 \\ -0.93 & 0.66 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -15.11 & -12.03 \\ -12.03 & -9.89 \end{bmatrix}$
7-10	$K_{7-10} = \begin{bmatrix} 0.43 & -0.52 \\ -0.52 & 0.75 \end{bmatrix}$	$K_{7-10} = \begin{bmatrix} 0.47 & -0.56 \\ -0.56 & 0.78 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -9.58 & -6.72 \\ -6.72 & -3.94 \end{bmatrix}$
9-12	$K_{9-12} = \begin{bmatrix} 0.37 & -0.68 \\ -0.68 & 1.56 \end{bmatrix}$	$K_{9-12} = \begin{bmatrix} 0.39 & -0.69 \\ -0.69 & 1.57 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -4.43 & -2.60 \\ -2.60 & -1.20 \end{bmatrix}$
5-7	$K_{5-7} = \begin{bmatrix} 1.61 & -1.48 \\ -1.48 & 1.42 \end{bmatrix}$	$K_{5-7} = \begin{bmatrix} 2.09 & -1.85 \\ -1.85 & 1.71 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -29.82 & -25.43 \\ -25.43 & -20.61 \end{bmatrix}$
7-9	$K_{7-9} = \begin{bmatrix} 1.42 & -1.47 \\ -1.47 & 1.61 \end{bmatrix}$	$K_{7-9} = \begin{bmatrix} 1.56 & -1.59 \\ -1.59 & 1.71 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -10.1 & -8.2 \\ -8.2 & -6.4 \end{bmatrix}$
9-10	$K_{9-10} = \begin{bmatrix} 1.41 & -1.70 \\ -1.70 & 2.17 \end{bmatrix}$	$K_{9-10} = \begin{bmatrix} 1.47 & -1.75 \\ -1.75 & 2.22 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -4.13 & -13.12 \\ -3.12 & -2.22 \end{bmatrix}$
10-11	$K_{10-11} = \begin{bmatrix} 1.36 & -2.13 \\ -2.13 & 3.67 \end{bmatrix}$	$K_{10-11} = \begin{bmatrix} 1.39 & -2.16 \\ -2.16 & 3.69 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -2.1 & -1.32 \\ -1.32 & -0.8 \end{bmatrix}$

Titreştirme mekanizması olarak prototip kiriş üzerine, çekip ani olarak bırakma yöntemi uygulanmıştır. Şekil 4.27' de görüldüğü gibi, ucu kirişe bağlı aşağıya kadar sarkıtılmış bir ipe kopuncaya kadar kuvvet uygulanarak kiriş çekilmiş ve ip koptuğu anda kiriş, üzerinde birikmiş potansiyel enerji ile serbest titreşim hareketine başlamıştır. Tam ipin koptuğu anda dış kuvvet vektörü sıfır olduğu için 4.2 denklemi geçerliliğini korumaktadır. Denklem 4.3' den elde edilen 4.5 denkleminin çözümü sistemin ilgili serbestlik derecelerine karşı gelen rijitlik değerlerini verecektir. Bu değerlerin, Tablo 4.5 hesaplanarak yerine konulmuş duyarlılık analizi sonuçlarından elde edilmiş rijitliklerle kıyaslanması sonucunda yapıda hasarın olup olmadığı, varsa hangi bölgede olduğu bulunacaktır.

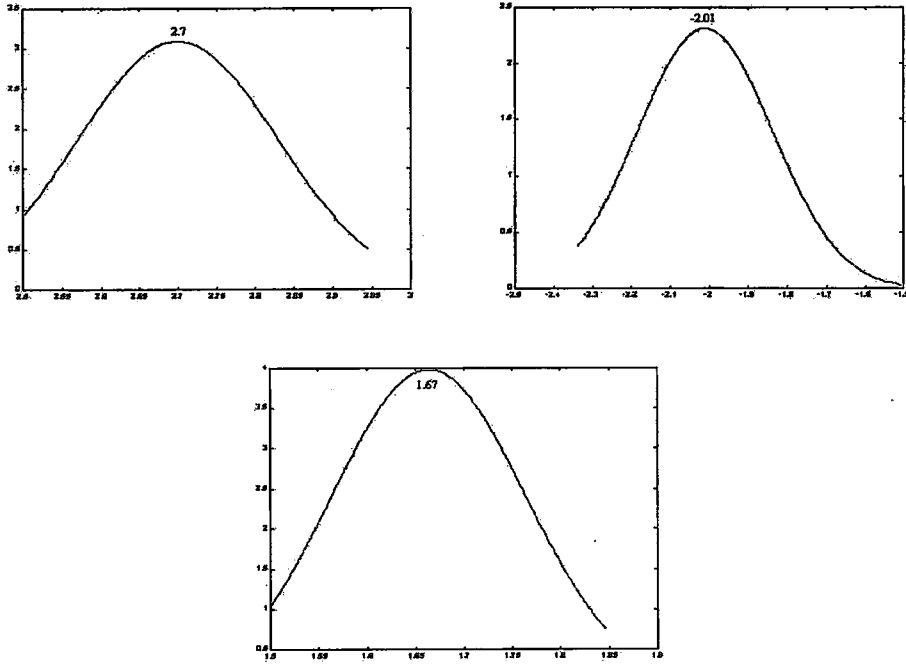
$\{H\} = \{0\} - [M_{in}] \{\ddot{U}_{xm}\} - [K_{in}^c] \{U_{xh}\}$, $E = \{H\}^T \{H\}$ denklemindeki hatay 1
minimum yapacak $[K_{in}^c]$ değerleri test datası kullanılarak bulunmuştur.



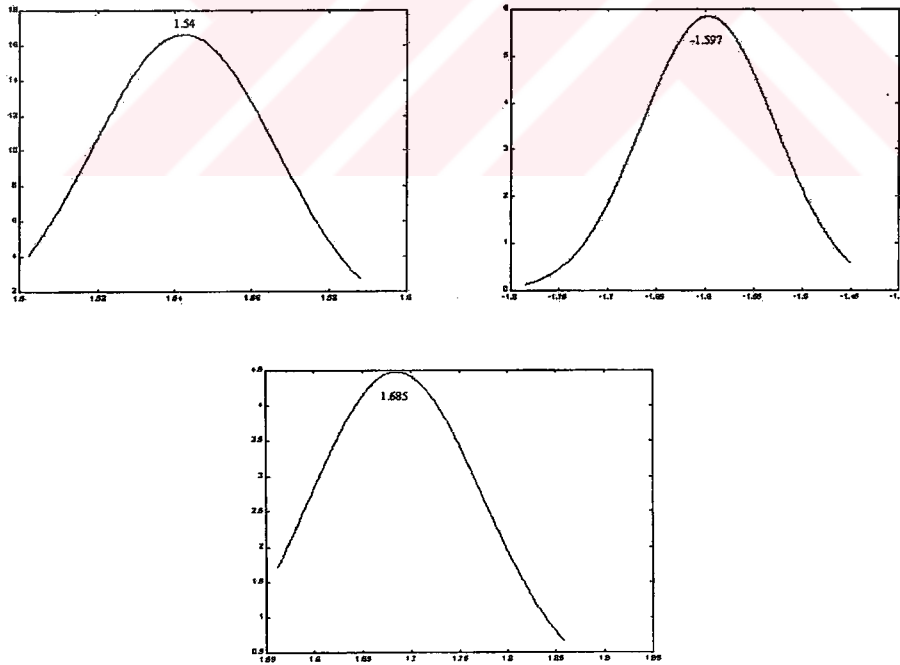
Şekil 4.27. Titreştirme mekanizması



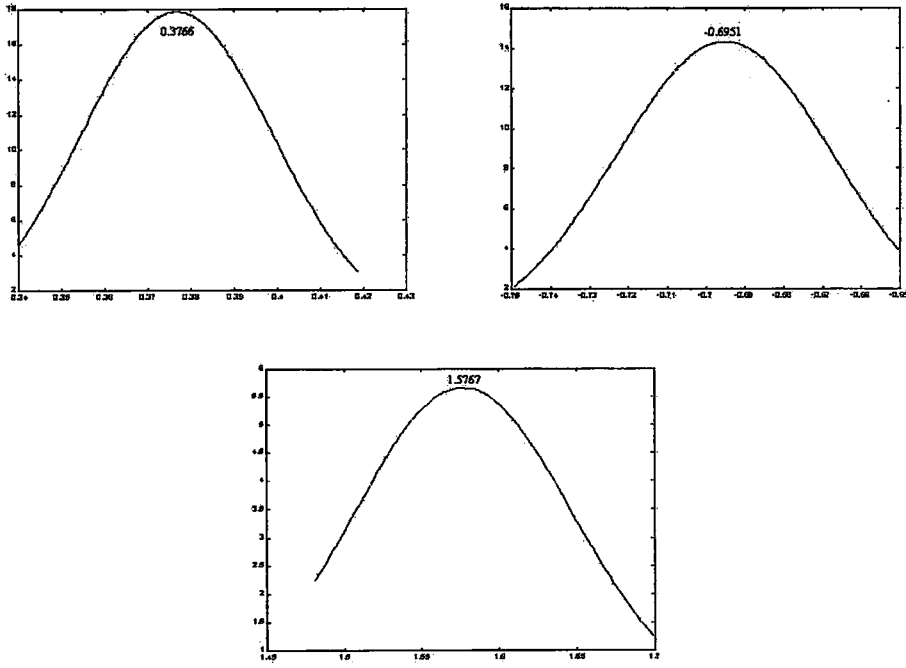
Şekil 4.28. 2-4 düğüm noktalarına indirgenmiş hesaplanan K^i rijitlik matrisinin %95 güvenirlilikli normal dağılımı. ($k_{2-2}, k_{2-4}, k_{4-4}$)



Şekil 4.29. 4-5 düğüm noktalarına indirgenmiş hesaplanan K^i rijitlik matrisinin %95 güvenirlikli normal dağılımı. ($k_{4-4}, k_{4-5}, k_{5-5}$)



Şekil 4.30. 7-9 düğüm noktalarına indirgenmiş hesaplanan K^i rijitlik matrisinin %95 güvenirlikli normal dağılımı. ($k_{7-7}, k_{7-9}, k_{9-9}$)



Şekil 4.31. 9-12 düğüm noktalarına indirgenmiş hesaplanan K^i rijitlik matrisinin %95 güvenirlilikli normal dağılımı. ($k_{9-9}, k_{9-12}, k_{12-12}$)

Şekil 4.28, 4.29, 4.30, 4.31 de verilen K^i rijitlik matrisleri Tablo 4.3 duyarlılık tablosu ile kıyaslandığı takdirde hasarlı bölgenin düğüm noktaları 4 ile 5 arasında olduğu kolaylıkla görülecektir (bak Tablo 4.6). Rijitlik artışına neden olan 3-6 düğüm noktaları arasında kaynaklanan levhanın, 2-4 , 4-5, 7-9, 9-12 ölçüm noktalarından alınan ivme kayıtları kullanılarak yeri tespit edilmiştir.

Tablo 4.6 Sonuçların kıyaslanması

Düğüm No (Şekil 4.14)	İndirgenmiş Rijitlikler		Değişim %
	Test Değeri	Teorik Değer	
2-4	$\begin{bmatrix} 3.95 & -2.33 \\ -2.33 & 1.55 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 3.84 & -2.22 \\ -2.22 & 1.40 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -2.94 & -5.09 \\ -5.09 & -10.5 \end{bmatrix}$
4-5	$\begin{bmatrix} 2.7 & -2.01 \\ -2.01 & 1.67 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 2.19 & -1.71 \\ -1.71 & 1.42 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -23.3 & -17.54 \\ -17.54 & -17.61 \end{bmatrix}$
7-9	$\begin{bmatrix} 1.54 & -1.60 \\ -1.60 & 1.69 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.42 & -1.47 \\ -1.47 & 1.61 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -8.45 & -8.64 \\ -5.09 & -4.66 \end{bmatrix}$
9-12	$\begin{bmatrix} 0.38 & -0.70 \\ -0.70 & 1.58 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.37 & -0.68 \\ -0.68 & 1.56 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1.8 & -2.2 \\ -2.2 & -1.1 \end{bmatrix}$

5. GELİŞTİRİLEN YÖNTEMİN GERÇEK BİR KÖPRÜ İÇİN UYGULAMASI

5.1 Test Yöntemi

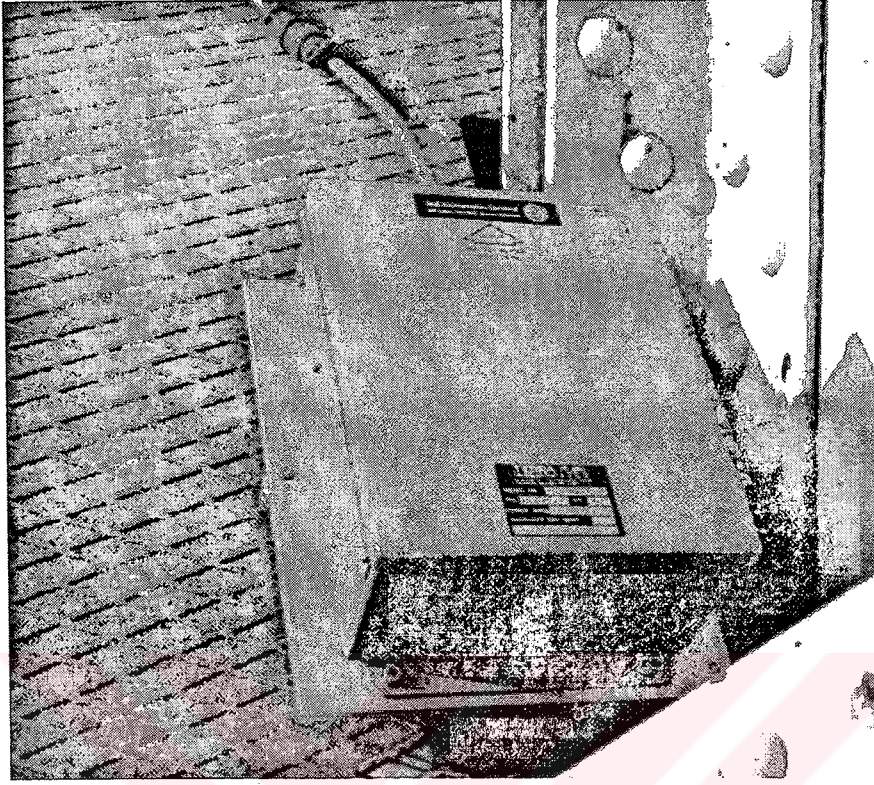
Başarılı bir test için ilk adım planlamadır. Bir köprü üzerinde yapılacak testler sırasında, kaç elemanın çalışacağı, her elemanın görevi, data toplama sisteminin nereye yerleştirileceği kaç testin uygulanacağı ve her testte algılayıcıların hangi köprü elemanlarına veya düğüm noktalarına yerleştirileceği, titreştirme mekanizması olarak ne seçileceği, daha önceden belirlenmelidir. Ancak iyi planlanmış bir test kısa sürede ve fazla bir sorunla karşılaşmadan bitirilebilir.

Testi planlayan kişi, testi en kısa süre ve en az maliyetle bitirmeyi hedeflemelidir. Bu doktora çalışması sırasında bu hususlar ve geliştirilen algoritma bir arada düşünülmüştür;

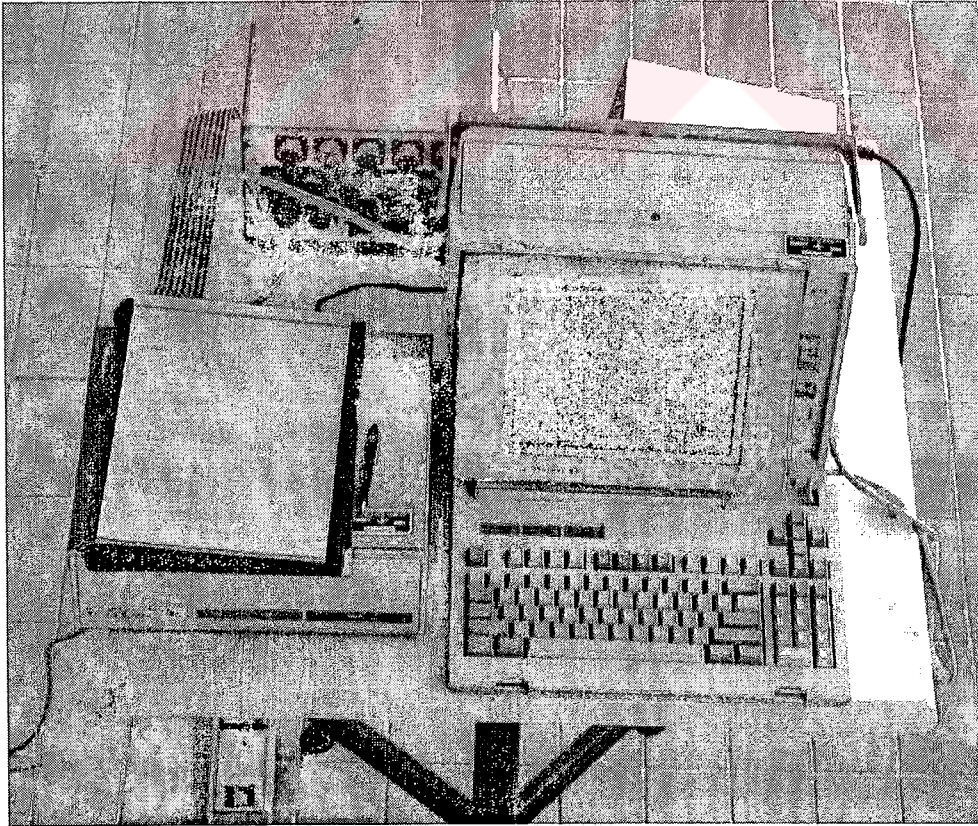
- **Minimum Ekipman** : Bir test sırasında kullanılan ekipmanların azlığı ilk bakışta test sayısını arttırıyormuş gibi gözükse de sağladığı kolaylıklar açısından göz ardı edilebilir. Az sayıda ekipman az işçilik demektir. Ayrıca ekipmanlardan (özellikle kablo bağlantılarından) kaynaklanacak gecikmeler ve hatalar en alt seviyeye indirilmiş olunur.

Bu doktora çalışmasında geliştirilen algoritmaya data üretmek için 2 adet maksimum 3 *eksenli* ivme ölçer (bak şekil 5.1) , sadece 2 adet 3 eksenli ivme ölçerin kullanılmasından dolayı da maksimum 6 *kanallı* bir data toplama sistemi (bak şekil 5.2) ve ivme ölçerlerle data toplama sistemini birbirine bağlamak için 2 adet 3 kanallı kablo yeterli olacaktır. Bu kadar az ekipmanın yerleştirilmesi ve testin gerçekleştirilmesi için test ekibinin iki kişiden oluşması yeterlidir. Test ekipmanının az olması nakliyesini çok

kolaylaştırır; hatta uçak ile test ekibinin yanında test mahalline taşınabilmesine olanak sağlar.



Şekil 5.1 3 eksenli ivme ölçer



Şekil 5.2 Data toplama sistemi

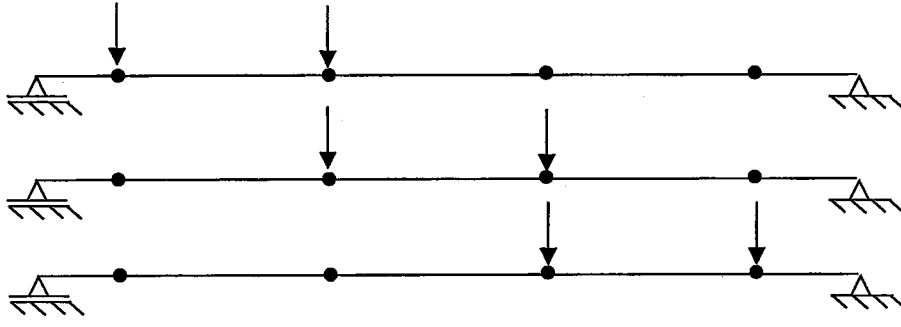
- **Titreştirme Mekanizması :** Demiryolları ile karayolları köprüleri birbirleri ile kıyaslandığı zaman demiryolu köprülerinin işletmesinin karayolu köprülerine göre daha farklı olduğu görülür. Test sırasında trafiğı kesmek oldukça maliyetli ve rötarları arttırıcı olabilir. Bunun için mümkün olduğunca mevcut trafik kesilmeden testlerin yapılması gerekmektedir. Günlük trafik altında testlerin yapılabilmesi test maliyetlerini ve test zamanını büyük ölçüde düşürecektir.

Bu doktora çalışması sırasında geliştirilen algoritmaya data üretmek için sarsma mekanizması olarak normal tren trafiğı kullanılabilir. Her tren geçişi sırasında köprü üzerinden ivme ölçerler ile titreşim datası toplanır. Trenin köprüye giriş ve çıkış anının belirlenebilmesi için köprü üzerine özel yer belirleyici ekipmanlar yerleştirilir. Böylece titreşim datasının hangi bölümünün serbest titreşim olduğu kolaylıkla saptanabilir. Bu suretle normal tren trafiğini kesmek gerekmez. Yoğun hatlarda testin çok kısa bir sürede bitirilmesi mümkündür.

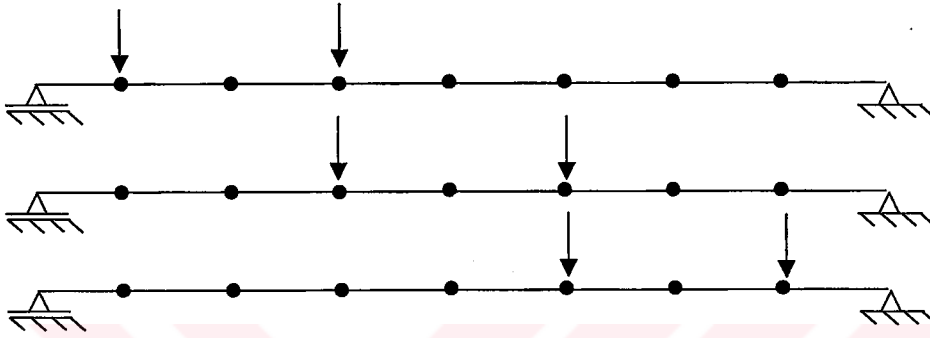
Yapılacak testler sırasında toplanacak verilerle en doğru sonucu elde edebilmek için köprüünün kaç noktadan ölçüleceğine karar verilmelidir. Az noktadan ölçüm, hasarın yerinin doğru olarak bulunamamasına neden olacağı gibi, çok yerden ölçüm de test süresinin uzamasına, veriler arasında boğulmaya ve zaman kaybına neden olacaktır. Bundan dolayı optimum sayıda ölçüm noktası seçilmelidir.

Köprü açıklığı az ise, her bir enleme kirişi bölge sınırı olarak seçilebilir, böylece herbir enleme kirişinin ana (kafes) kirişe bağlandığı noktada ölçüm yapılır, ancak köprü açıklığı fazla ise 2-3 enlemede bir, bir bölge seçilebilir, böylece iki veya üç enleme kirişinde bir enleme kirişinin ana (kafes) kirişe bağlandığı noktada ölçüm yapılır.

Her bölge sınırı üzerinde kaydırma yöntemi ile veri toplanır (bak Şekil 5.3).



Kısa açıklıklı köprüler için ölçüm sırası



Şekil 5.3 Uzun açıklıklı köprüler için ölçüm sırası (herbir nokta enlemenin yerini gösterir)

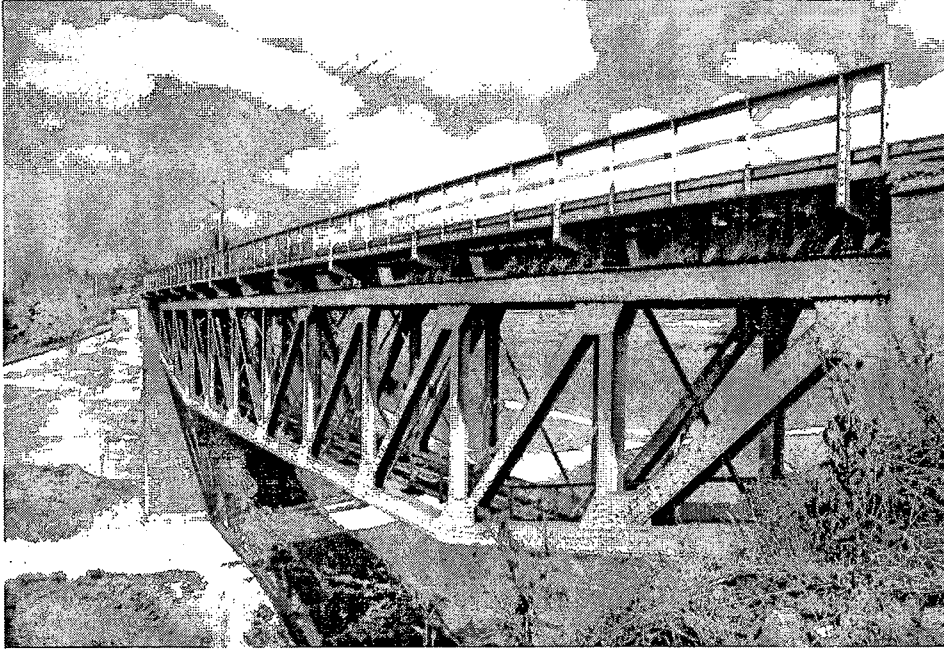
5.2 Testin Uygulanması

5.2.1 Köprünün Tanımı

Çerkezköy köprüsü tek açıklıklı, 50 m uzunluğunda, hattı kurbda bir demiryolu köprüsüdür. Kurb çapı 680mdir. Şekil 5.4’de de görüldüğü gibi tabliyesi üst başlıkta olan bu tek hatlı köprünün ana kirişleri kafes kiriş olarak düzenlenmiştir. İstanbul – Edirne koridorunda yer alan bu köprü Türkiye’yi Avrupa’ya bağlayan ana hat üzerindedir.

Köprü, 1937 yılında Fried-Krupp şirketi tarafından boyutlandırılmış, ve ilk önce Sivas-Erzurum hattı üzerine montajı yapılmıştır. Ancak daha sonra eski yerinden sökülerek İstanbul – Edirne hattına monte edilmiştir.

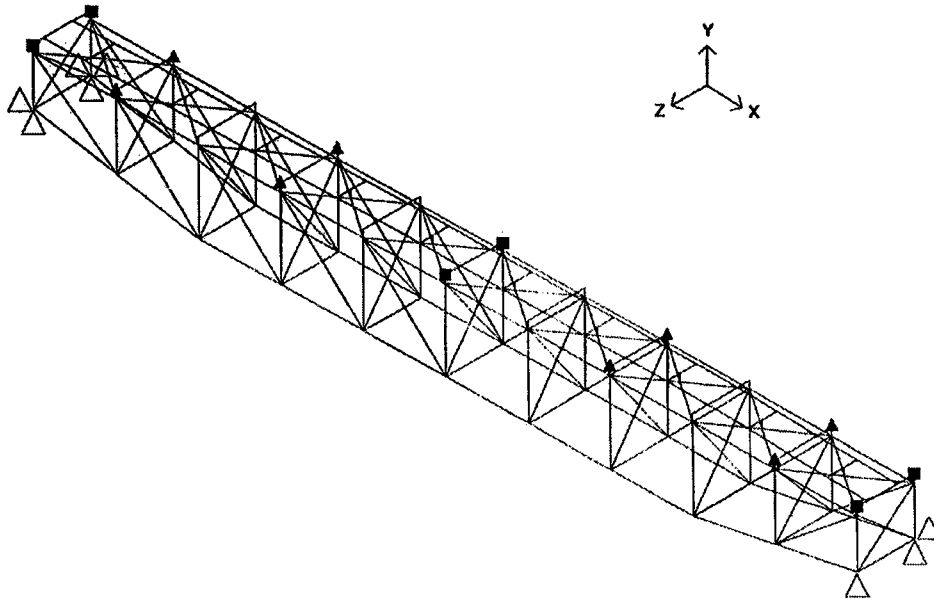
Köprü perçinli olarak imal edilmiştir. Kiriş yüksekliği 5m dir.



Şekil 5.4 Çerkezköy Köprüsü

5.2.2 Ön Çalışma

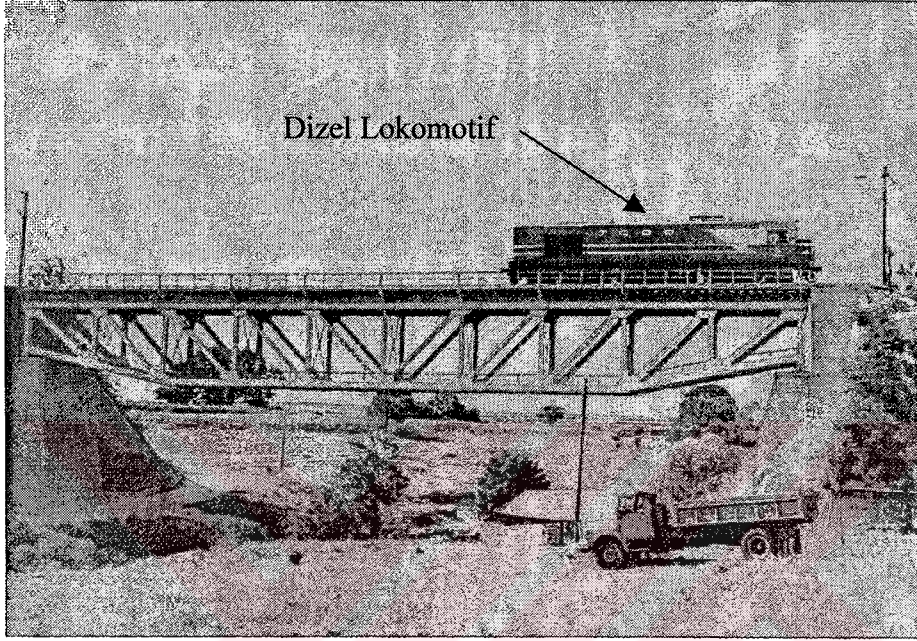
Bu uygulama için seçilen Çerkezköy köprüsü, 21-27 Temmuz 1991 tarihleri arasında TU-Bridges kod adlı NATO destekli “Türkiye’deki Demiryolu Köprülerinin Rehabilitasyonu” adlı araştırma projesi çalışmaları sırasında test edilmiştir. Daha önce yapılmış testler sırasında kaydedilen ivme dataları ve bilgisayar modeli (bak Şekil 5.5), bu doktora çalışmasında geliştirilmiş test yöntemi ve hasar tespit algoritmasının doğruluğunun sınanması için kullanılacaktır.



Şekil 5.5 Çerkezköy Köprüsü Bilgisayar Modeli

5.2.3 Serbest Titreşim

Titreştirme mekanizması olarak köprü üzerinden 70km/saat hızla geçen dizel lokomotif (bak şekil 5.6) in yarattığı, bir önceki bölümde bahsedilen, testler sırasında kaydedilmiş serbest titreşim dataları kullanılmıştır. Tam dizel lokomotifin köprüden çıktığı anda dış kuvvet vektörü sıfır olduğu için 4.3 denklemi geçerliliğini korumaktadır.

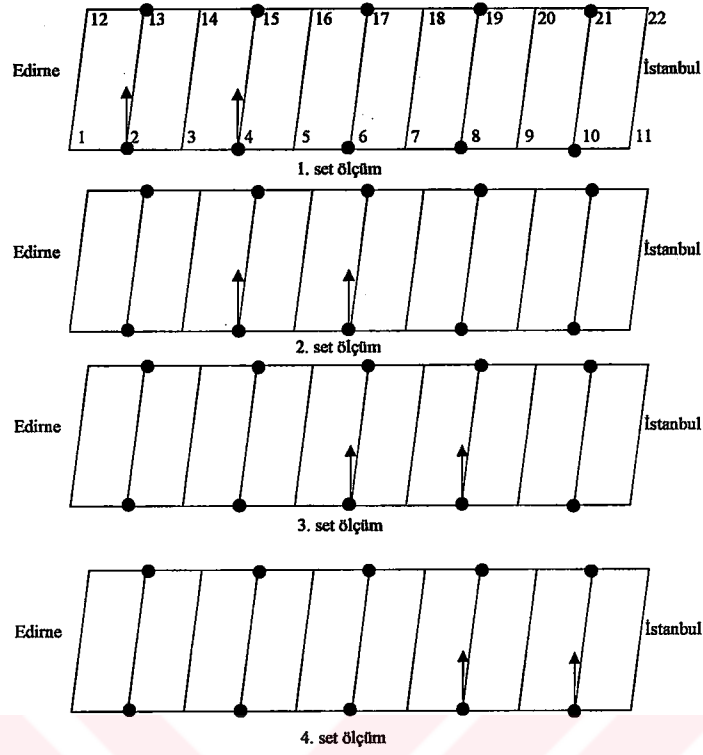


Şekil 5.6 Titreştirme Mekanizması

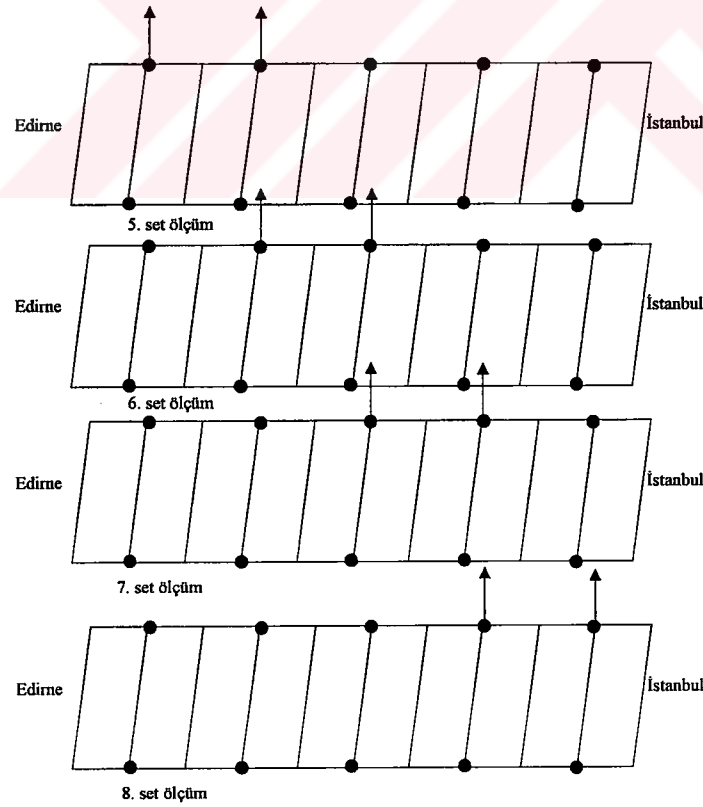
21-27 Temmuz 1991 tarihleri arasında Çerkezköy köprüsü üzerinde yapılmış testler sırasında Şekil 5.7 – 5.8 deki ölçüm noktaları kullanılmıştır. Bu testler sırasında ölçüm noktalarının hepsine (bak Şekil 5.12) aynı anda ivme ölçerler (bak şekil 5.1, 5.10, 5.11) konulmuş, data toplama sisteminin bulunduğu yere (bak şekil 5.9) kabloları çekilip bağlanmış ve her tren geçişinde hepsinden aynı anda veri kaydedilmiştir. Bu test sırasında 8 adet tek eksenli, 6 adet üç eksenli Terra Technology yapımı ivme ölçerler ve şekil 5.2’ de görülen 16 kanallı iki adet data toplama sistemi kullanılmıştır. Ayrıca herbiri 50m lik kablo içeren 25 adet kablo makarası test alanına taşınmıştır.

Bu doktora çalışmasında geliştirilen algoritmada bu veriler, sanki iki ivme ölçer her bir tren geçişinden sonra diğer ölçüm noktalarına kaydırılarak data toplanmış gibi düşünülerek kullanılmıştır. Bu durumda maksimum iki adet 3 eksenli ivme ölçer ile 6 kanallı bir data toplama sistemi ve iki kablo makarası gereklidir.

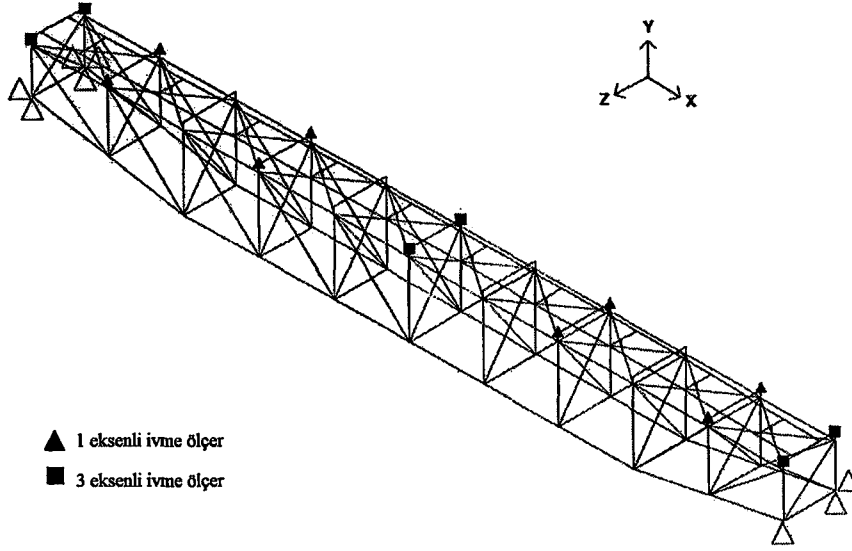
Bu testte, ölçüm noktaları, izleyen şekildeki gibi seçilmiştir.



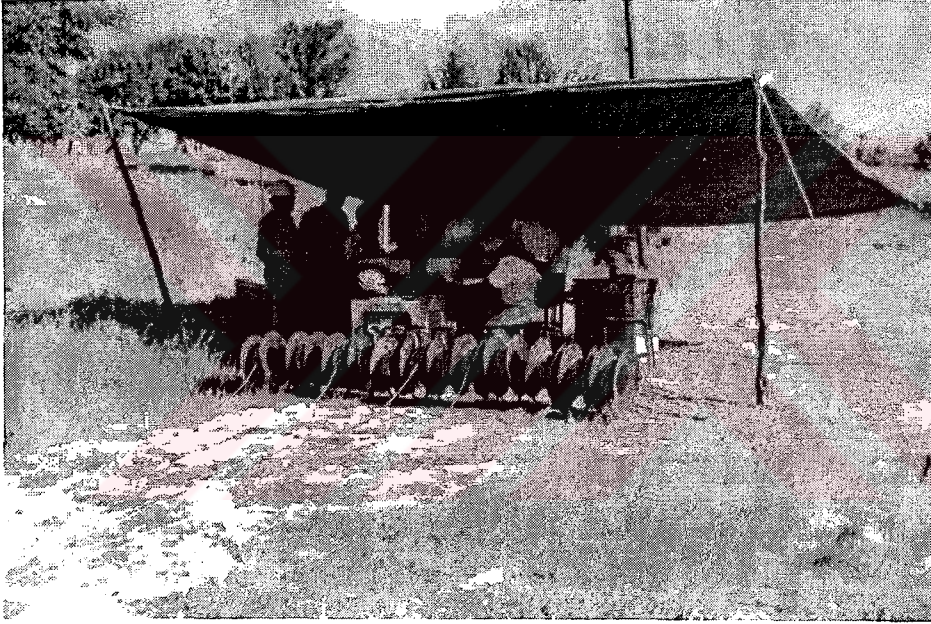
Ölçüm sırası (ön panel)



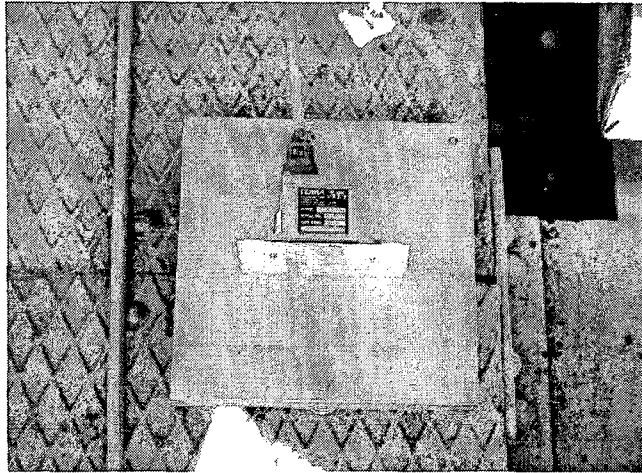
Şekil 5.7 Ölçüm sırası (arka panel)



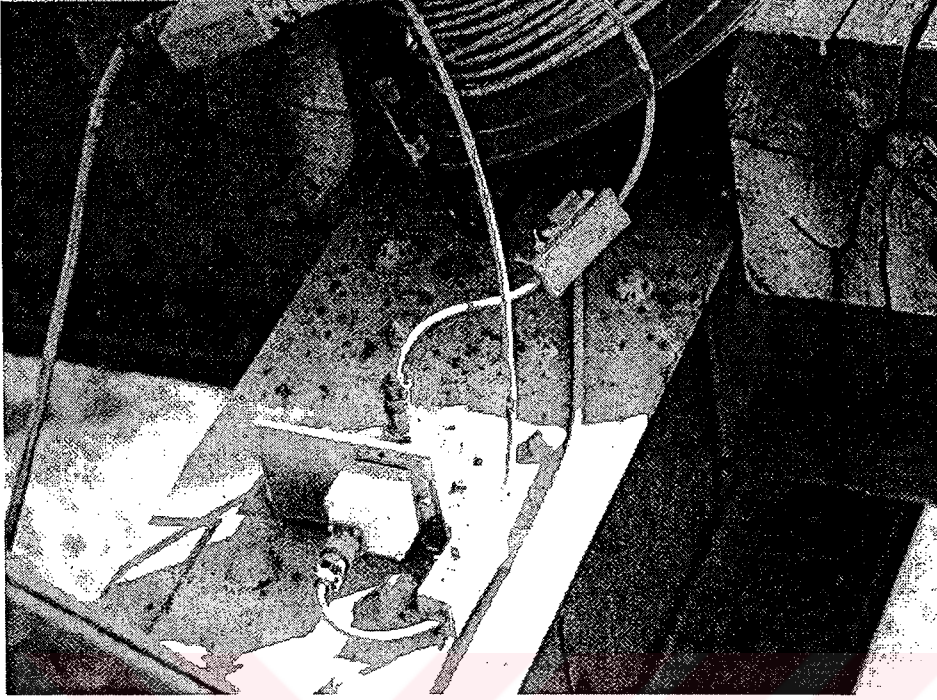
Şekil 5.8 Ölçüm noktaları



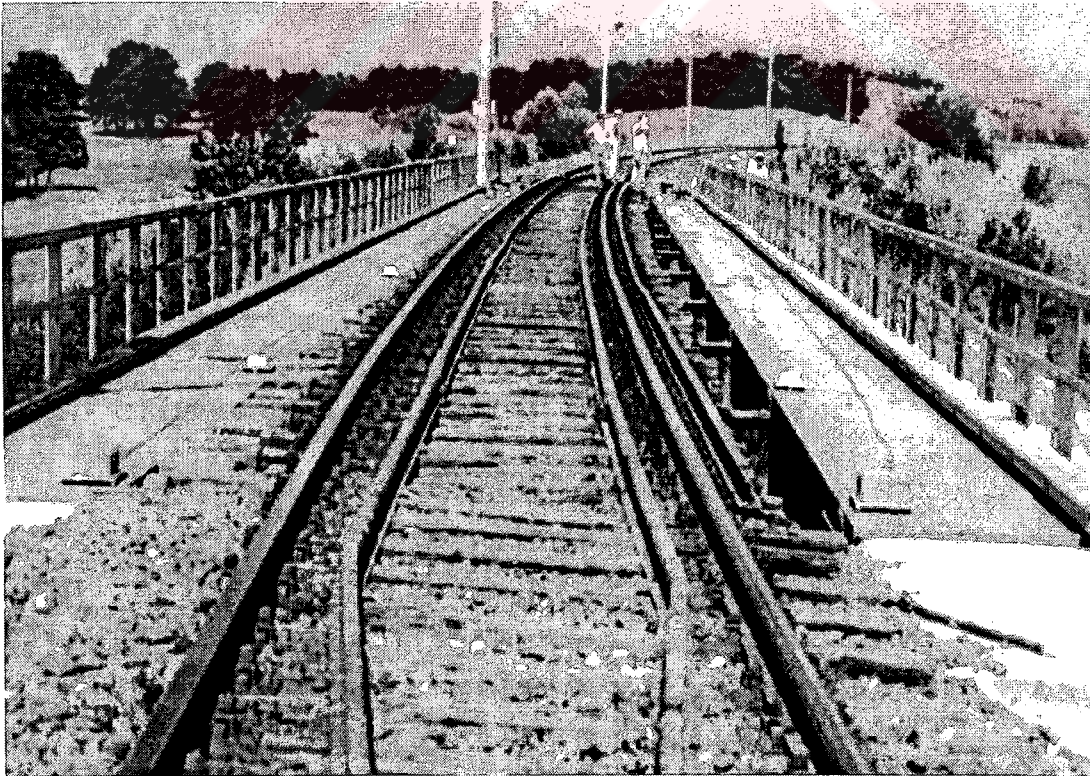
Şekil 5.9 Çerkezköy data toplama merkezi



Şekil 5.10 Tek eksenli ivme ölçer



Şekil 5.11 iki eksenli ivme ölçer



Şekil 5.12 İvme kaydı sırasında bir görünüş

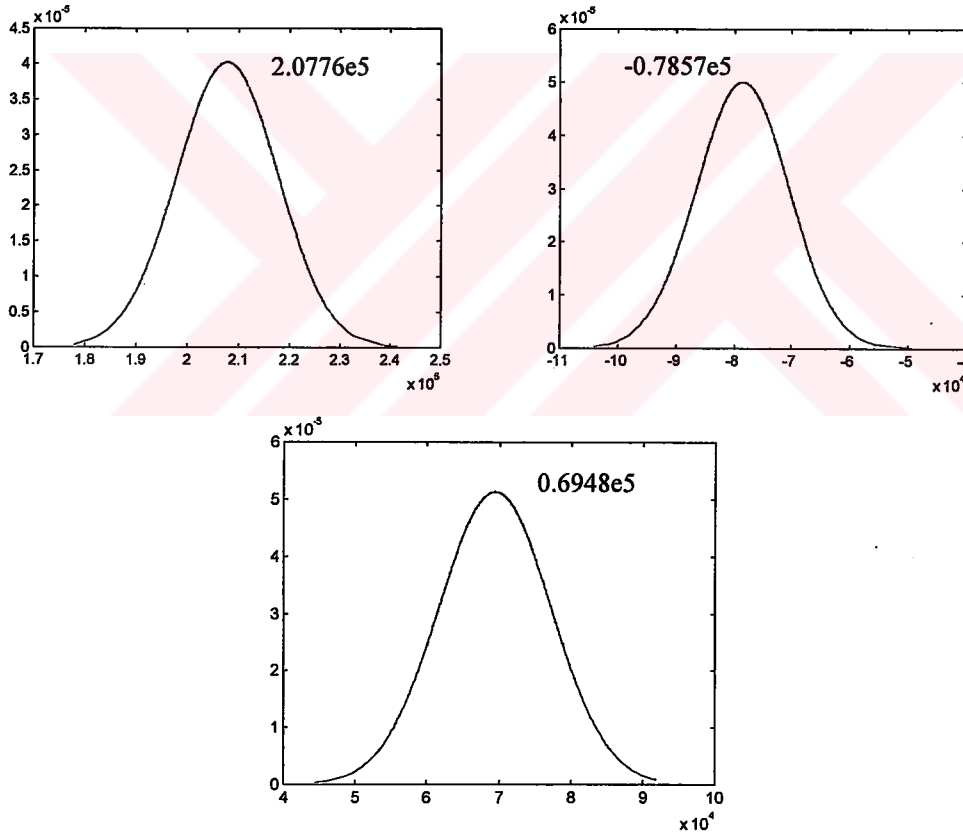
Denklem 4.3' den elde edilen 4.5 denkleminin çözümü, sistemin ilgili serbestlik derecelerine karşı gelen rijitlik değerlerini verecektir. Bu değerler, bilgisayar modelinden elde edilmiş rijitlik matrisileriyle kıyaslanması sonucunda köprüde bir hasarın olup olmadığı, varsa hangi bölgede olduğu bulunacaktır.

Yukarıda tanımlanan işlemler önceki bölümlerde verilmiş;

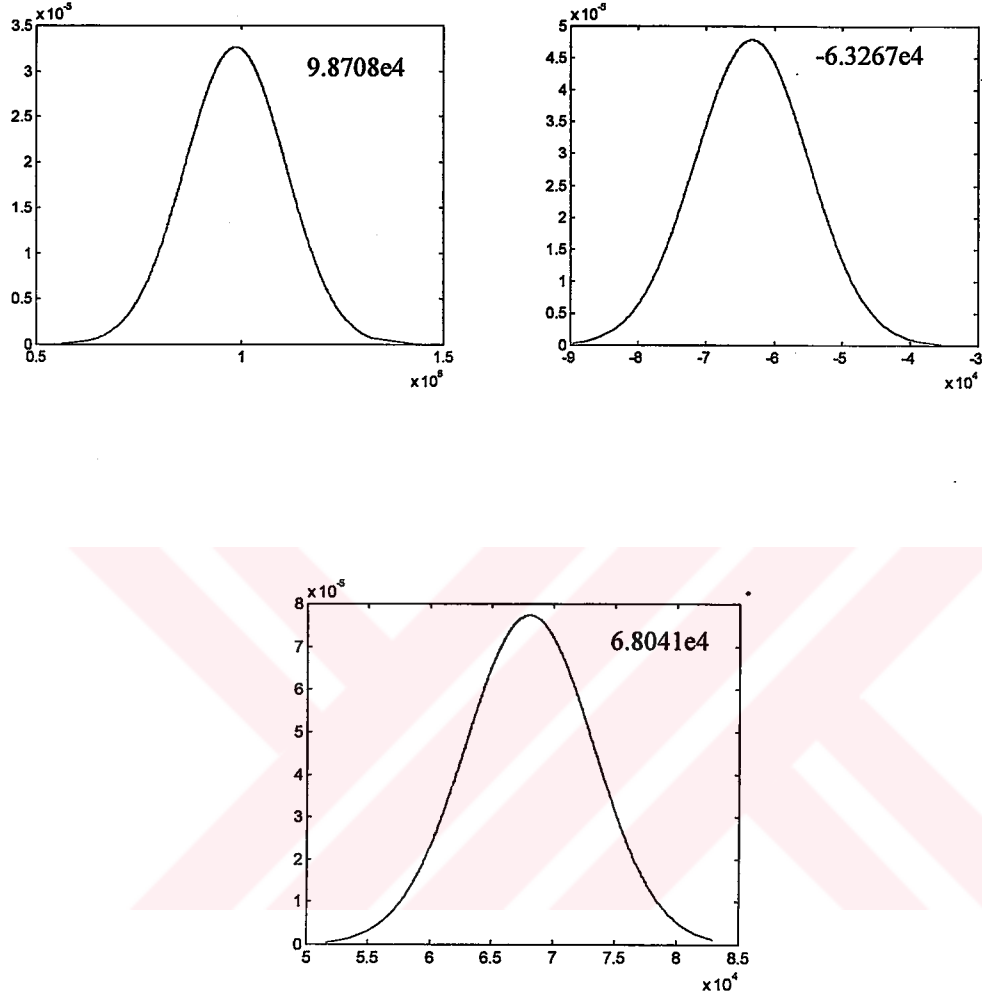
$$\{H\} = \{0\} - [M_{in}] \{\ddot{U}_{xm}\} - [K_{in}] \{U_{xh}\}$$

$$E = \{H\}^T \{H\}$$

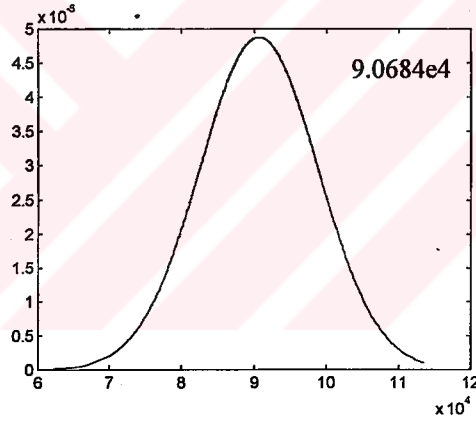
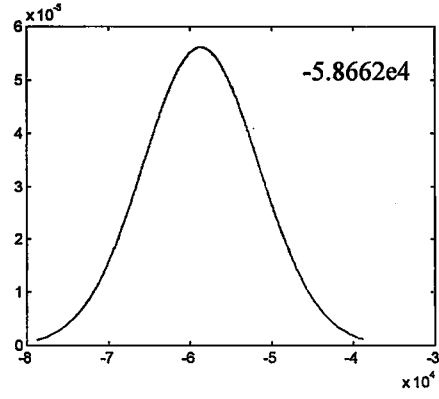
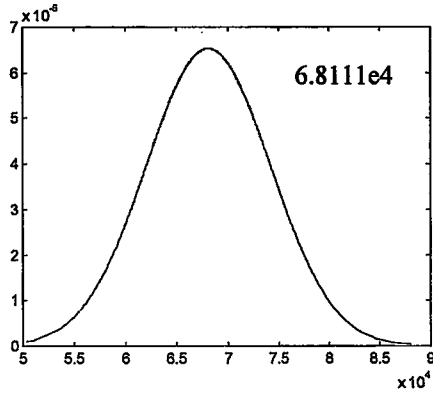
denklemindeki hatayı minimum yapacak K^c değerleri, test datası kullanılarak bulunmuştur. Herbir bölge için bulunan K^c değerleri izleyen sayfalarda grafik olarak verilmiştir.



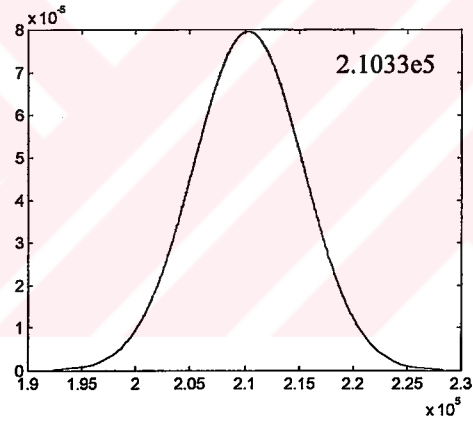
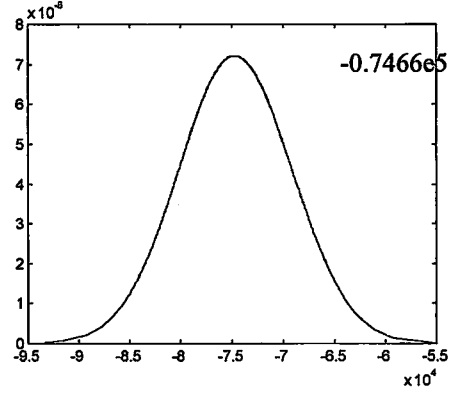
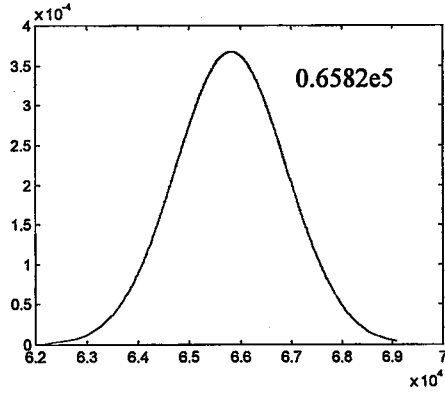
Şekil 5.13. 2-4 düğüm noktalarına indirgenmiş hesaplanan K^c rijitlik matrisinin %95 güvenirlikli normal dağılımı. ($k_{2-2}, k_{2-4}, k_{4-4}$)



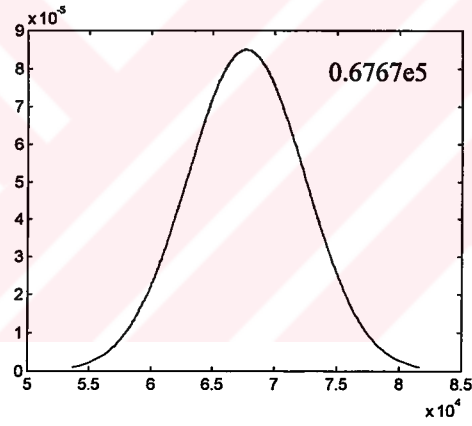
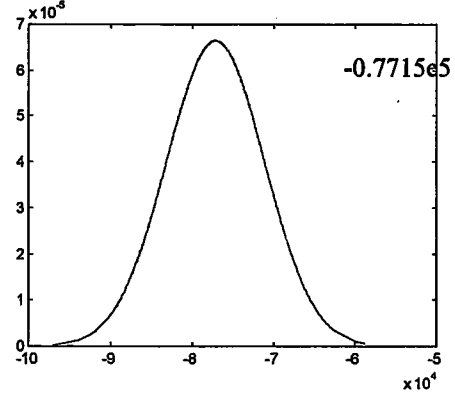
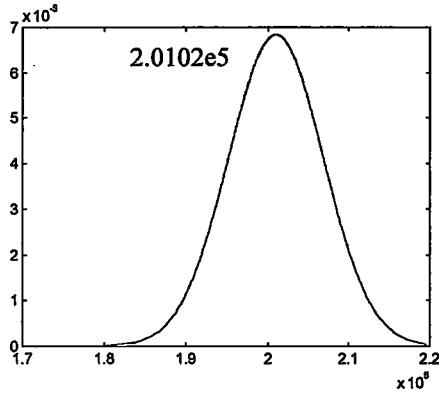
Şekil 5.14. 4-6 düğüm noktalarına indirgenmiş hesaplanan K^c rijitlik matrisinin %95 güvenirlikli normal dağılımı. ($k_{4-4}, k_{4-6}, k_{6-6}$)



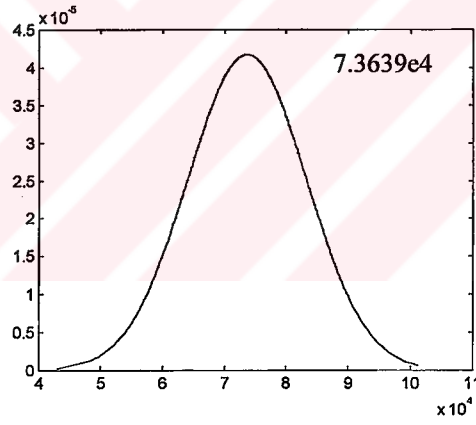
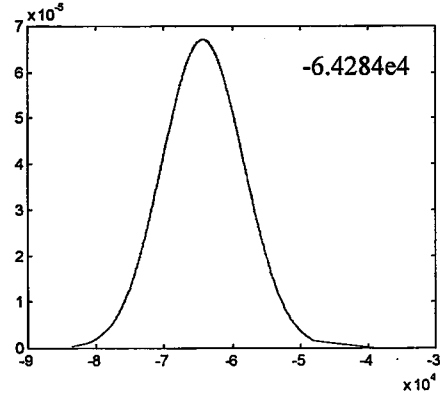
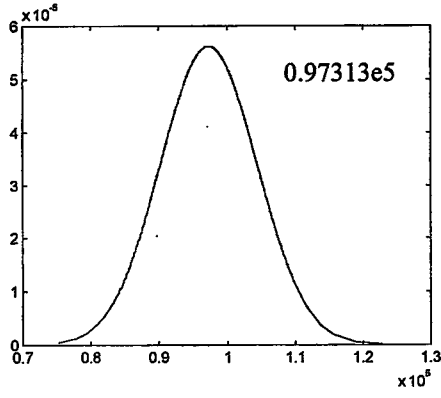
Şekil 5.15. 6-8 düğüm noktalarına indirgenmiş hesaplanan K^c rijitlik matrisinin %95 güvenirlikli normal dağılımı. ($k_{6-6}, k_{6-8}, k_{8-8}$)



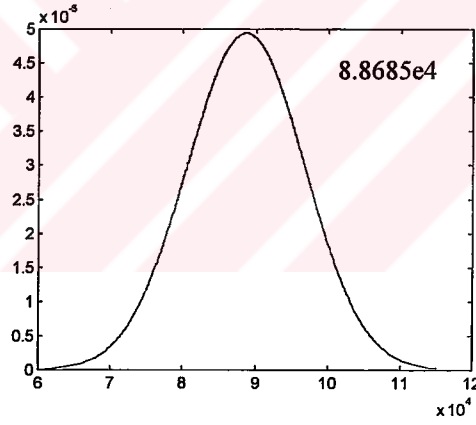
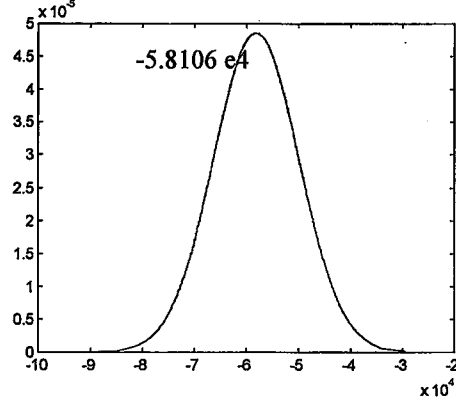
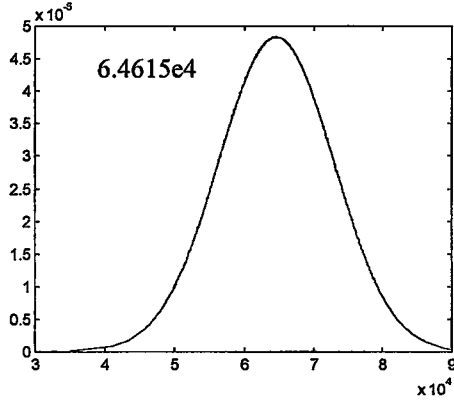
Şekil 5.16. 8-10 düğüm noktalarına indirgenmiş hesaplanan K^c rijitlik matrisinin %95 güvenirlilikli normal dağılımı. ($k_{8-8}, k_{8-10}, k_{10-10}$)



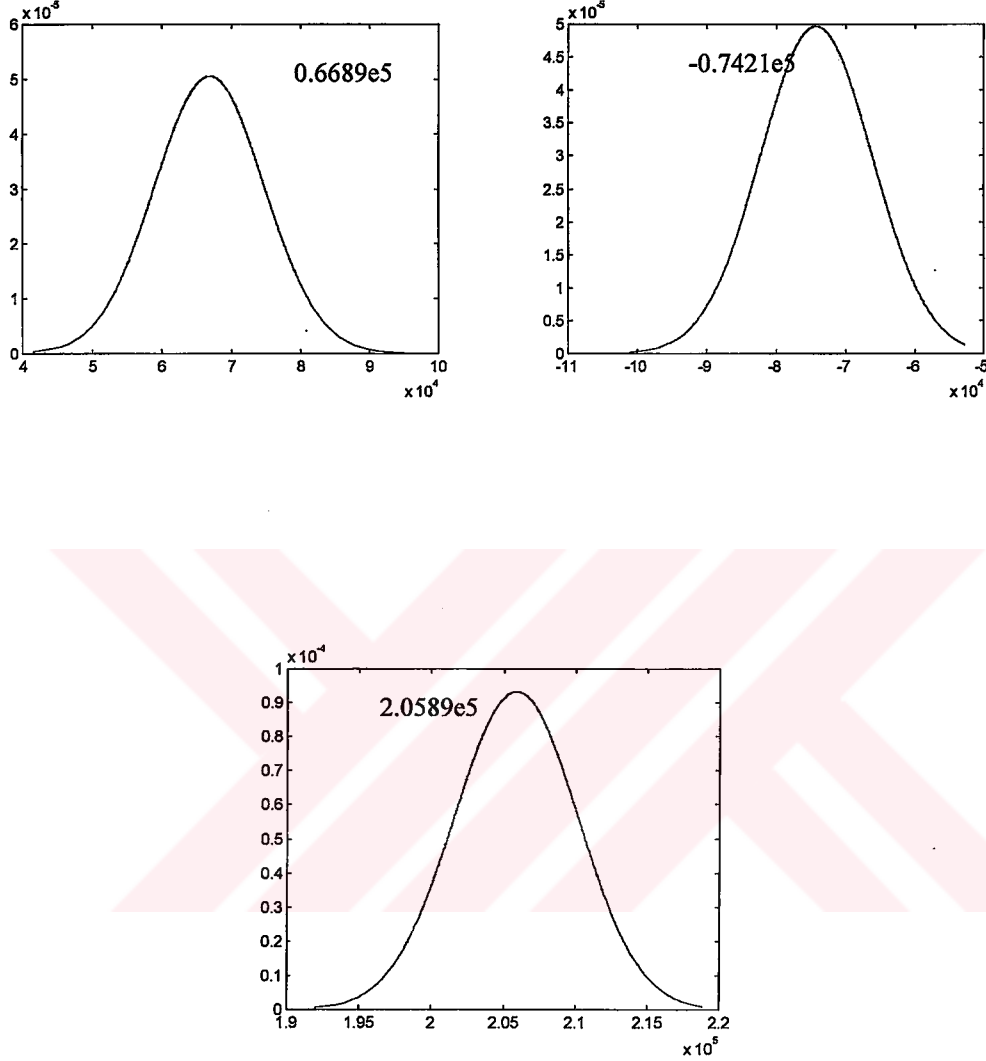
Şekil 5.17. 13-15 düğüm noktalarına indirgenmiş hesaplanan K^c rijitlik matrisinin %95 güvenirlikli normal dağılımı. ($k_{13-13}, k_{13-15}, k_{15-15}$)



Şekil 5.18 15-17 düğüm noktalarına indirgenmiş hesaplanan K^c rijitlik matrisinin %95 güvenilirlikli normal dağılımı. ($k_{15-15}, k_{15-17}, k_{17-17}$)



Şekil 5.19. 17-19 düğüm noktalarına indirgenmiş hesaplanan K^c rijitlik matrisinin %95 güvenirlikli normal dağılımı. ($k_{17-17}, k_{17-19}, k_{19-19}$)

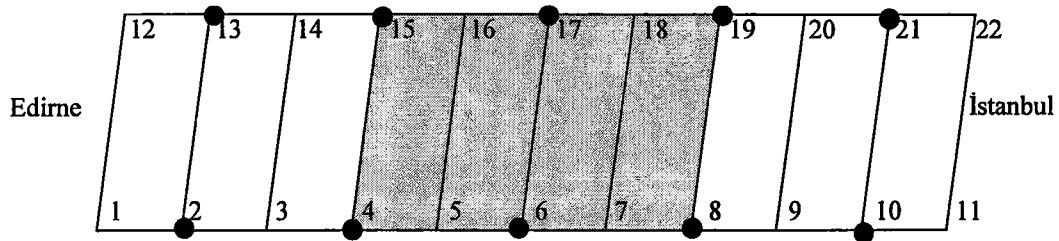


Şekil 5.20. 19-21 düğüm noktalarına indirgenmiş hesaplanan K^c rijitlik matrisinin %95 güvenirlilikli normal dağılımı. ($k_{19-19}, k_{19-21}, k_{21-21}$)

Şekil 5.13-5.20’de verilen K^c rijitlik matrisleri, rijitliklerdeki değişim incelendiği zaman 4-8 ve 15-19 numaralı düğüm noktaları arasında kalan bölgelerde bir hasar olma olasılığının yüksek olduğu görülmektedir. (Bak Tablo 5.1, Şekil 5.21, 5.22, 5.23)

Tablo 5.1 Sonuçların kıyaslanması

Düğüm No (Şekil 5.14)	İndirgenmiş Rijitlikler $\times 10^5$		Değişim (%) $\frac{(b) - (a)}{(b)} \times 100$
	Test Değeri (a)	Teorik Değer (b)	
2-4	$\begin{bmatrix} 2.077 & -0.785 \\ -0.785 & 0.694 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 2.095 & -0.798 \\ -0.798 & 0.7067 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.83 & -1.55 \\ 1.55 & 1.69 \end{bmatrix}$
4-6	$\begin{bmatrix} 0.98 & -0.63 \\ -0.63 & 0.68 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.03 & -0.69 \\ -0.69 & 0.76 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 4.1 & 8.13 \\ 8.13 & 10.11 \end{bmatrix}$
6-8	$\begin{bmatrix} 0.68 & -0.59 \\ -0.59 & 0.91 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.76 & -0.69 \\ -0.69 & 1.03 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 10.26 & 14.89 \\ 14.89 & 11.66 \end{bmatrix}$
8-10	$\begin{bmatrix} 0.66 & -0.75 \\ -0.75 & 2.1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.70 & -0.79 \\ -0.79 & 2.08 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 6.2 & 5.74 \\ 5.74 & -0.99 \end{bmatrix}$
13-15	$\begin{bmatrix} 2.01 & -0.77 \\ -0.77 & 0.6767 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 2.05 & -0.79 \\ -0.79 & 0.70 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 2.06 & -2.63 \\ 2.63 & 3.27 \end{bmatrix}$
15-17	$\begin{bmatrix} 0.97 & -0.64 \\ -0.64 & 0.68 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.02 & -0.69 \\ -0.69 & 0.76 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 4.68 & 7.14 \\ 7.14 & 10.52 \end{bmatrix}$
17-19	$\begin{bmatrix} 0.65 & -0.58 \\ -0.58 & 0.89 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.76 & -0.69 \\ -0.69 & 1.03 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 15.02 & 16.08 \\ 16.08 & 13.61 \end{bmatrix}$
19-21	$\begin{bmatrix} 0.67 & -0.74 \\ -0.74 & 2.06 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.70 & -0.79 \\ -0.79 & 2.06 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 5.0 & 6.84 \\ 6.84 & 0.01 \end{bmatrix}$



Şekil 5.21. Rijitlik azalışı gösteren bölgeler

Mayıs 1992 yılında yayınlanan “Preliminary Report for Çerkezköy Railway Bridge” isimli raporda hasar tespit çalışmaları incelendiğinde hasarlı bölgeler, bu doktora çalışması için geliştirilen algoritma kullanılarak tahmin edilen hasarlı bölgelerle üst üste çakışmıştır. Mayıs 1992 yılında yayınlanmış rapora göre 3 ve 8 nolu bölgelerde hasar tespit edilmiştir. (bakınız Tablo 5.2, Şekil 5.22, 5.23)

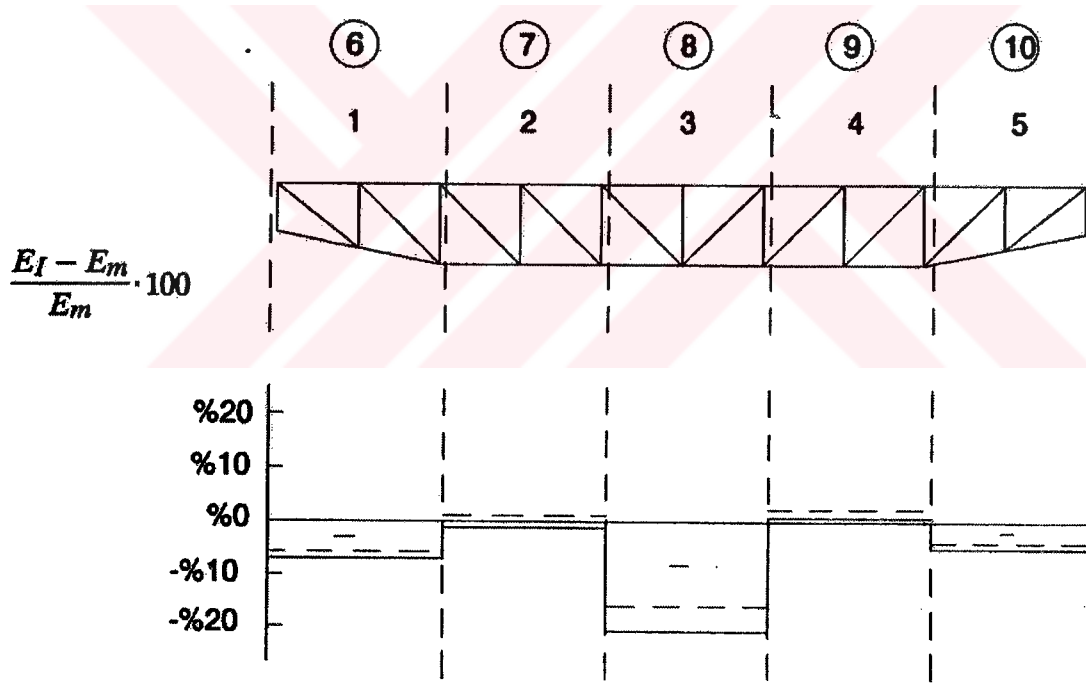
Tablo 5.2 Mayıs 1992 yılında yayınlanmış rapordan alınan rijitlik değişimlerini gösteren tablo.

Bölge Numarası	$E_I \times 10^4$ $\left[\frac{kN}{cm^2} \right]$	$\frac{E_I - E_m}{E_m} \cdot 100$
1	1.9575	-6.79
2	2.0821	-0.85
3	1.6549	-21.20
4	2.1095	0.45
5	2.0152	-4.04
6	1.9775	-5.83
7	2.1161	0.77
8	1.7846	-15.02
9	2.1391	1.86
10	2.0130	-4.14

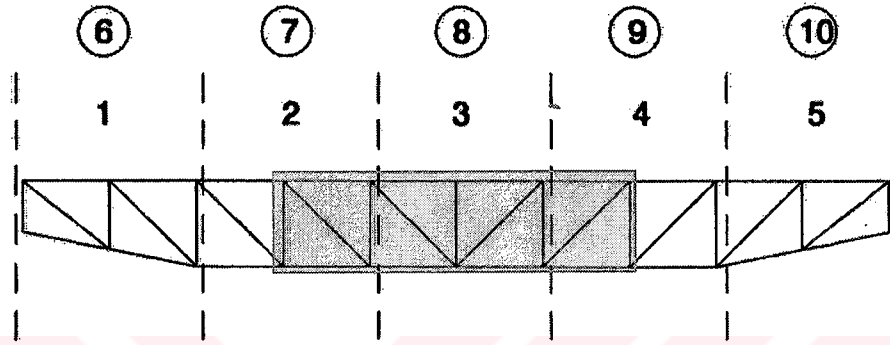
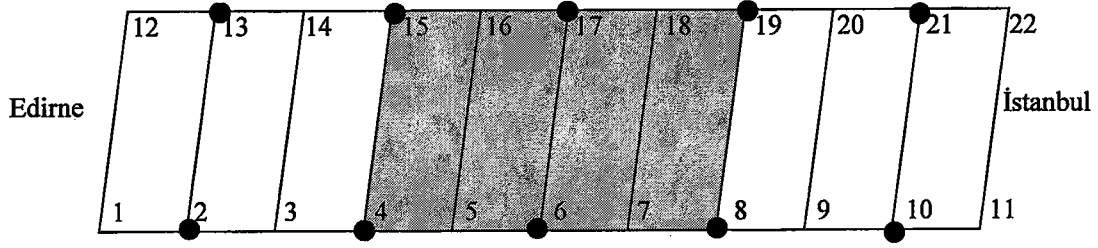
Yine aynı raporda, Çerkezköy demiryolu köprüsü elemanlarında (Şekil 5.23), DE2400 dizel lokomotifinin 5km/saat' lik hızla geçi sırasında Hottinger Baldwin yapımı sökülüp takılabilir deformasyon ölçerlerden elde edilen kayıtlara dayanılarak çizilmiş olan gerilme tesir hatları verilmiştir (Şekil 5.25). Bu gerilme tesir hatları incelendiğinde 30 ve 71 numaralı diyagonal elemanları için ölçülen ve hesaplanan gerilme değerleri hemen hemen üst üste düşerken; 32 ve 73 numaralı diyagonal elemanlar ile 39 ve 80 numaralı dikme elemanları için böyle bir durum söz konusu değildir. Bu ise özellikle 3 ve 8 numaralı bölgeler ve ikinci derecede 5 ile 10 numaralı bölgeler için bu çalışmada geliştirilmiş olan yöntemin (Uzgider, 1992) işaret etmiş olduğu hasarın varlığını doğrulamaktadır. Köprü üzerinde gözle yapılmış olan inceleme, bu hasarın muhtemelen montaj dizayn yükleri üzerine çıkmış olan yükleri nedeniyle perçinlerde oluşan ezilmeler olduğunu göstermiştir.

$$E_m = 2.1 \times 10^4 \text{ kN/cm}^2$$

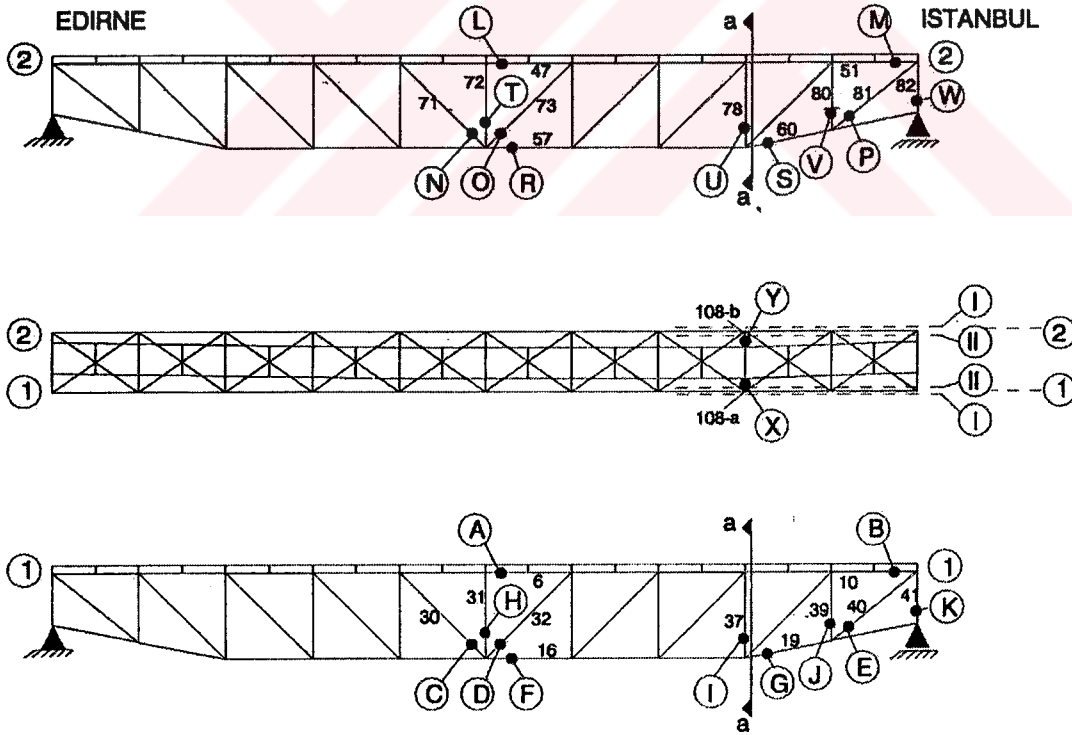
Bölge Numaraları



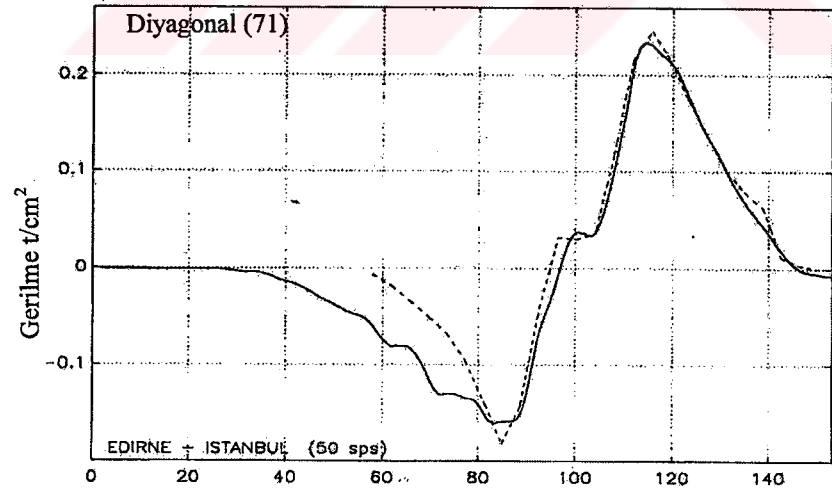
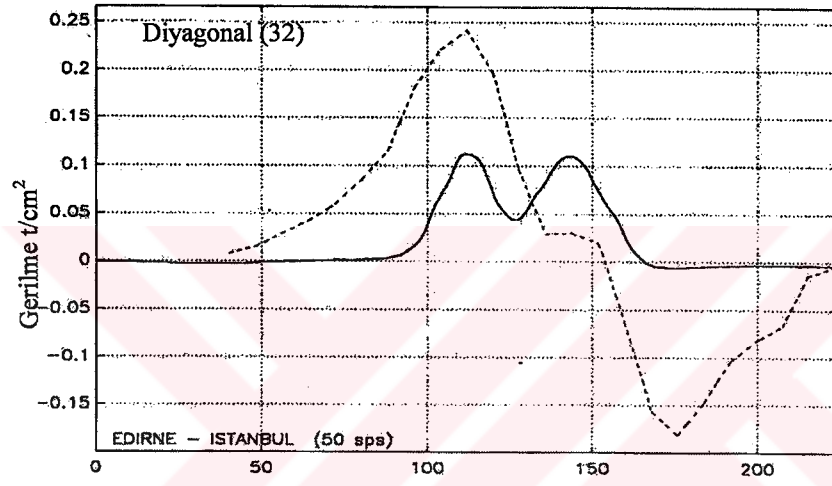
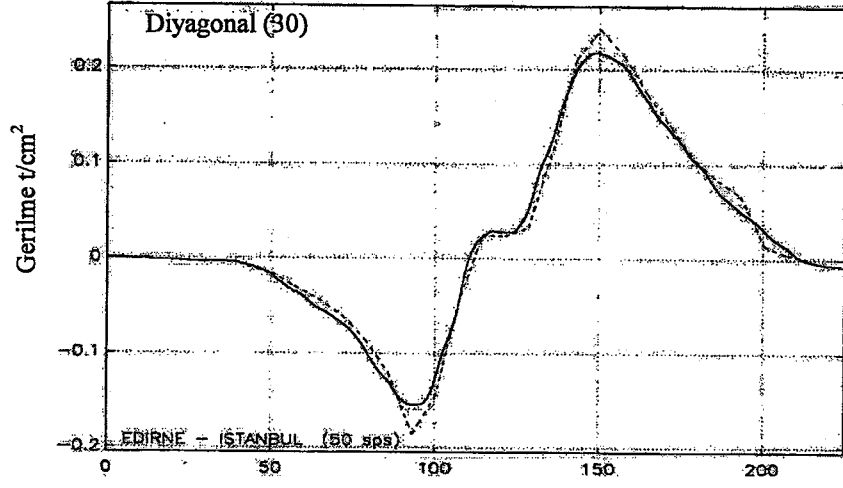
Şekil 5.22 Mayıs 1992 yılında yayınlanan rapordan alınmış rijitlik değişimlerini gösteren şekil



Şekil 5.23. Geliştirilen algoritma ile rijitlik azalması gösteren bölge



Şekil 5.24 Birim deplasman ölçerler ile ölçülen elemanlar

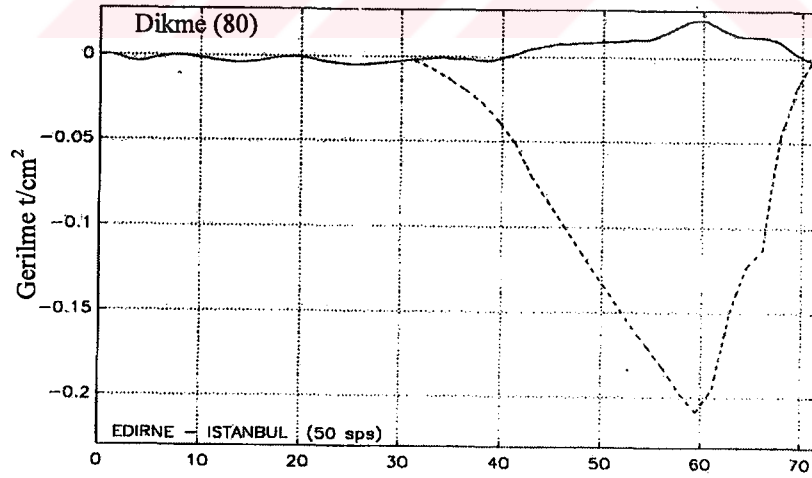
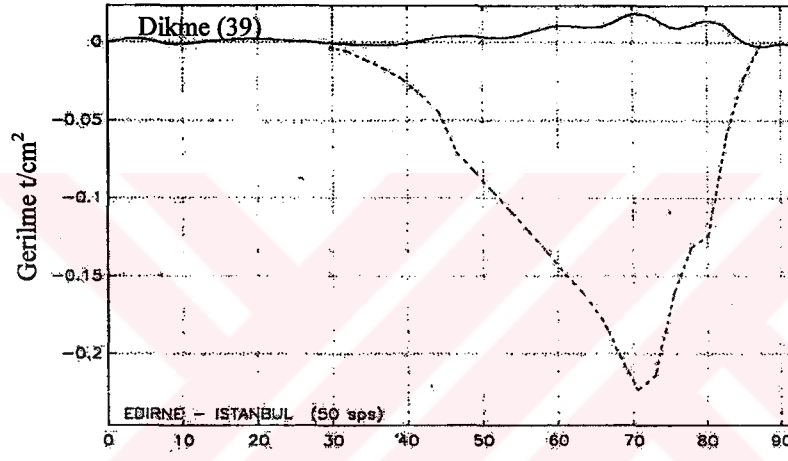
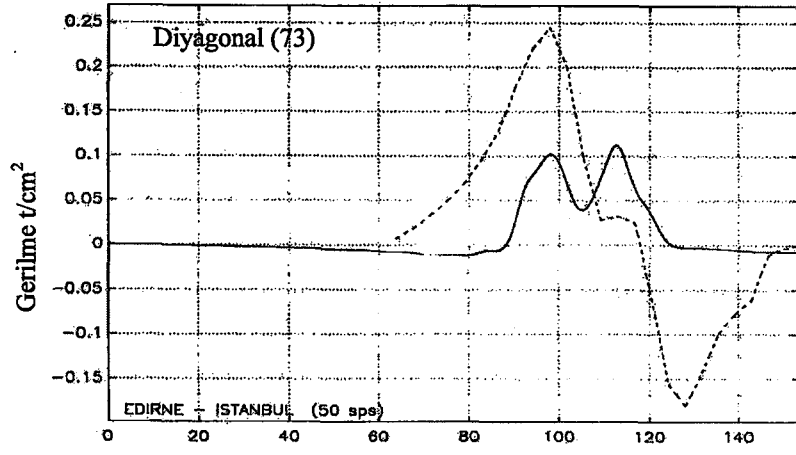


Hesap

Ölçüm

Zaman (saniye)

Şekil 5.25a Gerilme tesir hatları



Hesap

Ölçüm

Zaman (saniye)

Şekil 5.25b Gerilme tesir hatları

6. SONUÇLAR

6.1 Geliştirilen Algoritmanın Köprü Üzerinde Uygulanmasının Sonuçları

Bu doktora çalışmasında taşıyıcı sistemlerde K^c rijitlik değişimini ve bu değişimin yerini saptayabilen bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemin etkinliği ve güvenilirliği Şekil 4.11 ve Şekil 4.12 de görülen prototip üzerinde sınanmıştır. Bu amaçla yapılmış olan deney ve kullanılan ölçüm üniteleri ile data değerlendirme sistemi önceki bölümlerde verilmiştir. Elde edilen datanın geliştirilmiş olan yöntem ile değerlendirilmesi sonucu, prototip taşıyıcı üzerine sonradan kaynaklanmış olan levhanın (bak Şekil 4.11 ve 4.13b) neden olduğu rijitlik artışı ile yerinin saptanması mümkün olmuştur.

Ayrıca bu çalışmanın ilk adımını oluşturan ve prototip testleri sırasında elde edilen ivme datasının iki kez entegrasyonu ile deplasmanlara geçilmesi sırasında kullanılması gereken γ ve β entegrasyon sabitlerinin en iyi sonuç veren değerleri yapılan deneysel çalışmalar ile belirlenmiştir.

Böylece geliştirilen ve laboratuvar koşullarında yapılmış olan prototip testleri ile güvenilirliği ve etkinliği saptanmış olan yöntem, NATO Science For Stability Programınca desteklenmiş TU-850-Bridges Projesi kapsamında, 1991 yılında, Çerkezköy Demiryolu Köprüsü üzerinde yapılan test sırasında alınmış ivme kayıtları kullanılarak bu köprüye uygulanmıştır. Bu uygulama sonuçları Mayıs 1992 yılında yayınlanan “Preliminary Report for Çerkezköy Railway Bridge” isimli raporda yayınlanmış olan hasar tespit çalışmaları ile karşılaştırıldığında, rijitlik değişimi gösteren bölgelerin aynı olduğu görülmektedir.

Bu çalışmada geliştirilmiş olan yöntem; hasar tespiti konusundaki etkinliğinin yanı sıra, oldukça az sayıda ivme ölçerler, diğer test yöntemlerinde gerekenden daha kısa ve az sayıda kablo makarası ile maksimum 6 kanallı bir data toplama sistemi

gerektirmesi, emsallerine göre daha ekonomik bir test ekipmanına ve çok kısa sürede daha az sayıda test ekibi ile uygulanabilen bir test yöntemi olması nedenleriyle, literatürde mevcut benzerlerine göre optimum bir nitelik taşımaktadır.

Ayrıca gerekli ivme kayıtlarının, köprüyü geçici veya sürekli olarak mevcut trafiğe kapatmadan dahi (mevcut trafik altında) alınıp kullanılabilir olması, bu yöntemin en büyük özelliklerinden ve avantajlarından biridir.

6.2 İleriye Dönük Öneriler

Bu yönde ileride yürütülecek olan araştırmalarda, elektronik sektöründeki hızlı gelişmeler mutlaka yakından izlenmeli ve yenilikler ölçüm cihazlarına ve data toplama sistemlerine hızlı bir şekilde aktarılmalıdır.

Data toplama sistemleri kablolardan arındırılmaya çalışılmalıdır. Kablolu sistemler hem hantal olmakta, hem de kablo sayısı ve uzunluğu arttıkça kaydedilen verinin güvenilirliği azalmakta ve ayrıca test süresinin uzamasına neden olmaktadır. Kablolu sistemler yerine, algılayıcıların, radyo vericisi ile data transferi yapabilen veya data toplama sistemi üzerinde bulunduğu sistemler geliştirilebilir. Aşağıda bu tip sistemler için iki örnek verilmiştir.

- **Lokal Data Toplama Sistemleri :** Herbir algılayıcı içinde bir data toplama sistemi, bir GPS ve antenin bulunduğu kutuya yerleştirilebilir. Böylece bu durumda uzman olmayan bir test ekibi tarafından da özel testler gerçekleştirilebilir. Ekip, ölçüm yapılacak noktalara bu kutuları yerleştirerek diğer algılayıcılardan bağımsız olarak kayıt alabilir. Daha sonra bu kayıtlar test datalarının analiz edileceği laboratuvarlarda, GPS verileri sayesinde senkronize edilebilir. Bu tip data toplama sistemlerine sahip ölçüm sistemleri ile sözü edilen bu testlerin minimum sürede testin tamamlanacağı çok açıktır.
- **Global Data Toplama Sistemleri :** Herbir algılayıcı içinde bir adet GPS ve anteni bulunan, yüksek frekanslı radyo vericisi bulunan bir kutunun içine konur. Herbir algılayıcı, ölçüm yapılacak noktalara uzman olmayan bir test

ekibi tarafından da yerleştirilebilir. Test sırasında alınan ölçüm kayıtları aynı zamanda radyo vericileri ile üzerinde radyo dalgası alıcısı bulunan bir data toplama sistemine aktarılır. GPS kayıtları, senkronizasyonun sağlanması sırasında kullanılır.

Bu doktora çalışmasında araştırılıp örnek olarak verilmiş hasar tespit yöntemlerinin çoğu ve bu doktora çalışmasında üretilmiş algoritma lineer yapı modeline dayanmaktadır. İleri çalışmalarda yapının lineer olamayan davranışını da göz önünde tutacak çalışmalar hem daha güvenilir hem de daha detaylı sonuçlar verecektir. Örneğin sürekli açık duran bir yorulma çatlakını lineer sistem felsefesine dayanarak geliştirilmiş algoritmaların birçoğu tespit edebilirken, tekrarlı yükler altında açılıp-kapanan bir yorulma çatlakını, gerek çalışma koşullarında (operational load condition) yapılan testler sırasında, gerek zorlanmış titreşim testleri sırasında, yapıya lineer olamayan davranış kazandırdığı için, birçok hasar tespit yöntemi saptayamamaktadır.

Gelecekte, geliştirilmiş algoritmaların etkinliğinin yanı sıra ekonomikliği, uygulanabilir olup olamayacağına karar verdirecek en büyük etken olacaktır.

KAYNAKLAR

Actis, R.L. and A.D. Dimarogonas, 1989, "Non-Linear Effects due to Closing Cracks in Vibrating Beams," *ASME Design Engineering Division Publication* DE-Structural Vibration and Acoustics, **18**(3), 99–104.

Adams, R.D., P. Cawley, C.J. Pye and B.J. Stone, 1978, "A Vibration Technique for Non-Destructively Assessing the Integrity of Structures," *Journal of Mechanical Engineering Science*, **20**, 93–100.

Afolabi D., 1987, "An Anti-Resonance Technique for Detecting Structural Damage," in *Proc. of the 5th International Modal Analysis Conference*, 491–495, Londra, April 6-9.

Aktan, A.E., K.L. Lee, C. Chuntavan and T. Aksel, 1994, "Modal Testing for Structural Identification and Condition Assessment of Constructed Facilities," in *Proc. of 12th International Modal Analysis Conference*, 462–468, Honolulu, February 1-4.

Alampalli, S., G. Fu, and E.W. Dillon, 1995, "On the Use of Measured Vibration for Detecting Bridge Damage," in *Proc. Fourth International Bridge Engineering Conference*, 125–137, San Fransisco

Allbright, K., K. Parekh, R. Miller, and T.M. Baseheart, 1994, "Modal Verification of a Destructive Test of a Damaged Prestressed Concrete Beam," *Experimental Mechanics*, **34**(4), 389–396.

Alvin, K.F., 1996, "Finite Element Model Update via Bayesian Estimation and Minimization of Dynamic Residuals," in *Proc. of the 14th International Modal Analysis Conference*, 561–567, Michigan, February.

- Balis Crema, L., A. Castellani and G. Coppotelli**, 1995, "Generalization of Non De-structive Damage Evaluation Using Modal Parameters, in *Proc. of the 13th International Modal Analysis Conference*, 428–431, Nashville, Tennessee, February 13-16.
- Balis Crema, L., F. Mastroddi**, 1995, "Frequency-Domain Based Approaches for Damage Detection and Localization in Aeronautical Structures," in *Proc. of the 13th International Modal Analysis Conference*, 1322–1330, Nashville, Tennessee, February 13-16,
- Barai, S.V. and P.C. Pandey**, 1995, "Vibration Signature Analysis Using Artificial Neural Networks," *Journal of Computing in Civil Engineering*, **9**(4), 259–265.98
- Baruch, M.**, 1978, "Optimization Procedure to Correct Stiffness and Flexibility Matrices Using Vibration Tests," *AIAA Journal*, **16**(11), 1208–1210.
- Baruch, M.**, 1982, "Optimal Correction of Mass and Stiffness Matrices Using Measured Modes," *AIAA Journal*, **20**(11), 1623–1626.
- Baruch, M.**, 1984, "Methods of Reference Basis for Identification of Linear Dynamic Structures," *AIAA Journal*, **22**(4), 561–564.
- Baruch, M. and I.Y. Bar Itzhack**, 1978, "Optimum Weighted Orthogonalization of Measured Modes," *AIAA Journal*, **16**(4), 346–351.
- Baruch, M. and Y. Zemel**, 1989, "Mass Conservation in the Identification of Space Structures," in *Proc. of 30th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, 710–712, AIAA-89-1239-CP, Mobile, Alabama, April 3-5.

- Baruh, H.**, 1990, "Identification of Boundary Conditions in Flexible Structures," in *Proc. of 2nd USAF / NASA Workshop on System Identification and Health Monitoring of Precision Space Structures*, 193–211, California, March.
- Baruh, H. and S. Ratan**, 1993, "Damage Detection in Flexible Structures," *Journal of Sound and Vibration*, **166**(1), 21–30.
- Berger, H., J.P. Chaquin, and R. Ohayon**, 1984, "Finite Element Model Adjustment Using Experimental Data," in *Proc. of 2nd International Modal Analysis Conference*, 638–642, Orlando, Florida, February.
- Berger, H., L. Barthe, and R. Ohayon**, 1989, "Parametric Updating of a Finite Element Model from Experimental Modal Characteristics," in *Proc. of the 1989 European Forum on Aeroelasticity and Structural Dynamics*, April.
- Berman, A. and W.G. Flannely**, 1971, "Theory of Incomplete Models of Dynamic Structures," *AIAA Journal*, **9**(8), 1481–1487.
- Berman, A.**, 1979, "Mass Matrix Correction Using an Incomplete Set of Measured Modes," *AIAA Journal*, **17**(10), 1147–1148.
- Berman, A., F.S. Wei, and K.V. Rao**, 1980, "Improvement of Analytical Dynamic Models Using Modal Test Data," in *Proc. of 21st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, 809–814, AIAA-80-800-CP.
- Berman, A. and F.S. Wei**, 1981, Automated Dynamic Analytical Model Improvement, *NASA report CR-3452*.
- Berman, A. and E.J. Nagy**, 1983, "Improvement of Large Analytical Model Using Test Data," *AIAA Journal*, **21**(8) 1168–1173..99

- Bernitsas, M.M. and R.L. Tawekal**, 1991, "Structural Model Correlation Using Large Admissible Perturbations in Cognate Space," *AIAA Journal*, **29**(12), 2222–2232.
- Bishop, C.M.**, 1994, "Neural Networks and Their Applications," *Review of Scientific Instrumentation*, **65**(6), 1803–1832.
- Biswas, M., A.K. Pandey and M.M. Samman**, 1990, "Diagnostic Experimental Spectral/Modal Analysis of a Highway Bridge," *Modal Analysis: The International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis*, **5**, 33–42.
- Biswas, M., A. Pandey, and S. Bluni**, 1994, "Modified Chain-Code Computer Vision Techniques for Interrogation of Vibration Signatures for Structural Fault Detection," *Journal of Sound and Vibration*, **175**(1), 89–104.
- Brincker, R., P. Anderson, P.H. Kirkegaard, and J.P. Ulfkjaer**, 1995b, "Damage Detection in Laboratory Concrete Beams," in *Proc. of the 13th International Modal Analysis Conference*, **1**, 668–674, Nashville, Tennessee, February 13–16.
- Brock, J.E.**, 1968, "Optimal Matrices Describing Linear Systems," *AIAA Journal*, **6**(7), 1292–1296.
- Budipriyanto, A. and A.S.J. Swamidas**, 1994, "Experimental and Analytical Verification of Modal Behavior of Uncracked/Cracked Plates in Air and Water," in *Proc. of the 12th International Modal Analysis Conference*, 745–752, Honolulu, February.
- Caglayan, B.O.** (1993) *Yapi Sistemlerinin Karakteristik Parametrelerinin Tanımlanması (Real Time Identification of Structural Systems)*, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Carlin, R.A. and E. Garcia**, 1996, "Parameter Optimization of a Genetic Algorithm for Structural Damage Detection," in *Proc. of the 14th International Modal Analysis Conference*, 1292–1298, Michigan, USA, February.
- Cawley, P. and R.D. Adams**, 1979a, "The Locations of Defects in Structures from Measurements of Natural Frequencies," *Journal of Strain Analysis*, **14** (2), 49–57.
- Cawley, P.**, 1990, "Low Frequency NDT Techniques for the Detection of Disbonds and Delaminations," *The British Journal of Non-Destructive Testing*, **32**(9), 454–461.
- Ceravolo, R. and A. De Stefano**, 1995, "Damage Location in Structures Through a Connectivistic Use of FEM Modal Analyses," *Modal Analysis: The International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis*, **10**(3), 176–100.
- Chang, K.C., Z. Shen, G.C. Lee**, 1993, "Modal Analysis Technique for Bridge Damage Detection," *ASCE Structural Engineering in Natural Hazards Mitigation*, **2**, 1083–1088.
- Chance, J., G.R. Tomlinson, and K. Worden**, 1994, "A Simplified Approach to the Numerical and Experimental Modeling of the Dynamics of a Cracked Beam," in *Proc. of the 12th International Modal Analysis Conference*, 778–785, Honolulu, February 1-4.
- Chen, J.-C. and J.A. Garba**, 1980, "Analytical Model Improvement Using Modal Test Results," *AIAA Journal*, **18**(6), 684–690.
- Chen, J.-C. and J.A. Garba**, 1988a, "On-Orbit Damage Assessment for Large Space Structures," *AIAA Journal*, **26**(9), 1119–1126.
- Chen, J.-C. and J.A. Garba**, 1988b, "Structural Damage Assessment Using a System Identification Technique," from *Structural Safety Evaluation Based on*

System Identification Approaches, H.G. Natke and J.T.P. Yao, Eds., Friedr. Vieweg & Sohn, Braun-schweig, Wiesbaden.

Chen, H.L., C.C. Spyrakos, and G. Venkatesh, 1995, "Evaluating Structural Deterioration by Dynamic Response," *Journal of Structural Engineering*, **121**(8), 1197–1204.

Chou, C.-M., J.C. O'Callahan, and C.-H. Wu, 1989, "Localization of Test/Analysis Structural Model Errors," in *Proc. of 30th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, 748–752, AIAA-89-1244-CP, Mobile, Alabama, April 3-5

Chou, C.-M. and C.-H. Wu, 1990, "System Identification and Damage Localization of Dynamic Structures," in *Proc. of 31st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, 113–120, AIAA-90-1203-CP, Long Beach, CA, April.

Choy, F.K., R. Liang, and P. Xu, 1995, "Fault Identification of Beams on Elastic Foundation," *Computers and Geotechnics*, **17**, 157–176.

Chu, Y.C. and M.H.H. Shen, 1992, "Analysis of Forced Bilinear Oscillators and the Application to Cracked Beam Dynamics," *AIAA Journal*, **30**(10), 2512–2519.

Crespo, C., R. Ruotolo and C. Surace, 1996, "Non-Linear Modeling of a Cracked Beam," in *Proc. of the 14th International Modal Analysis Conference*, 1017–1022.101, Michigan, USA, February.

Doebbling, S.W., L.D. Peterson, and K.F. Alvin, 1995, "Measurement of Static Flexibility Matrices for Experiments with Incomplete Reciprocity," in *Proc. of 36th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, 2777–2791, AIAA-95-1092-CP, New Orleans, Louisiana, April 10-13.

- Doebbling, S.W.**, 1995, Measurement of Structural Flexibility Matrices for Experiments with Incomplete Reciprocity, Ph. D. Dissertation, University of Colorado, Boulder, CO, *Department of Aerospace Engineering Sciences*, CU-CAS-95-10.
- Doebbling, S.W., L.D. Peterson, and K.F. Alvin**, 1996, "Estimation of Reciprocal Residual Flexibility from Experimental Modal Data," *ALAA Journal*, **34**(8), 1678-1685
- Dong C., P.Q. Zhang, W.Q. Feng, and T.C. Huang**, 1994, "The Sensitivity Study of the Modal Parameters of a Cracked Beam," in *Proc. of the 12th International Modal Analysis Conference*, 98–104, Honolulu, February 1-4.
- Dos Santos, J.M.C. and D.C. Zimmerman**, 1996a, "Damage Detection in Complex Structures Using Component Mode Synthesis and Residual Modal Force Vector," in *Proc. of the 14th International Modal Analysis Conference*, 1299–1305.
- Elkordy, M.F., K.C. Chang, and G.C. Lee**, 1993, "Neural Network Trained by Analytically Simulated Damage States," *ASCE Journal of Computing in Civil Engineering*, **7**(2), 130–145.
- Elkordy, M.F., K.C. Chang, and G.C. Lee**, 1994, "A Structural Damage Neural Network Monitoring System," *Microcomputers in Civil Engineering*, **9**, 83–96.102
- Farrar, C.R., W.E. Baker, T.M. Bell, K.M. Cone, T.W. Darling, T.A. Duffey, A. Eklund, and A. Migliori**, 1994, Dynamic Characterization and Damage Detection in the I-40 Bridge Over the Rio Grande, *Los Alamos National Laboratory report LA-12767-MS*.
- Farrar, C.R. and K.M. Cone**, 1995, "Vibration Testing of the I-40 Bridge Before and After the Introduction of Damage," in *Proc. 13th International Modal Analysis Conference*, 203–209, Nashville, Tennessee, February 13-16.

Farrar, C.R., T.A. Duffey, P.A. Goldman, D.V. Jauregui, and J.S. Vigil, 1996, Finite Element Analysis of the I-40 Bridge Over the Rio Grande, *Los Alamos National Laboratory report* LA-12979-MS.

Farrar, C.R. and D.V. Jauregui, 1996, Damage Detection Algorithms Applied to Experimental and Numerical Modal Data From the I-40 Bridge, *Los Alamos National Laboratory report* LA-13074-MS.

Feldman, M. and S. Braun, 1995, "Identification of Nonlinear System Parameters Via the Instantaneous Frequency: Application of the Hilbert Transform and Wigner-Wille Techniques," in *Proc. 13th International Modal Analysis Conference*, 637-642, Nashville, Tennessee, February 13-16.

Feng, M.Q. and E.Y. Bahng, 1999, "Damage Assessment of Jacketed RC Columns Using Vibration Tests", *Journal of Structural Engineering*, **125** (3), p.265

Fox, C.H.J., 1992, "The Location of Defects in Structures: A Comparison of the Use of Natural Frequency and Mode Shape Data," in *Proc. of the 10th International Modal Analysis Conference*, 522-528, San Diego, CA, February.

Fritzen, C.P., S. Seibold and D. Buchen, 1995, "Application of Filter Techniques for Damage Identification in Linear and Nonlinear Mechanical Structures," in *Proc. of the 13th International Modal Analysis Conference*, 1874-1881, Nashville, Tennessee, February 13-16.

Gafka, G.K. and D.C. Zimmerman, 1996, "Structural Damage Detection via Least Squares Dynamic Residual Force Minimization with Quadratic Measurement Error Inequality Constraint," in *Proc of the 14th International Modal Analysis Conference*, 1278-1284, Michigan, February.

Gates, J.H., 1976, "California's Seismic Design Criteria for Bridges," *ASCE Journal of Structural Engineering*, **102**, 2301-2313.

- Ghaboussi, J.**, 1993, "An Overview of the Potential Applications of Neural Networks in Civil Engineering," *ASCE Structural Engineering in Natural Hazards Mitigation*, **2**, 1324–1330.
- Girard, A., J. Chatelain, and N. A. Roy**, 1992, "Efficient Sensitivity Analysis of Frequency Response Functions," in *Proc. of the 9th International Modal Analysis Conference*, 1100–1104.103, Blacksburg, VA, May
- Gorlov, A.M.**, 1984, "Disaster of the I-95 Mianus River Bridge—Where Could Lateral Vibration Come From?" *ASME Journal of Applied Mechanics*, **51**, 694–696.
- Gudmundson, P.**, 1982, "Eigenfrequency Changes of Structures Due to Cracks, Notches, or other Geometrical Changes," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **30**(5), 339–353.
- Gudmundson, P.**, 1983, "The Dynamic Behavior of Slender Structures with Cross-Sectional Cracks," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **31**, 329–345.
- Gysin, H.P.**, 1986, "Critical application of an Error Matrix Method for Location of Finite element Modeling Inaccuracies," in *Proc. of the 4th International Modal Analysis Conference*, 1339–1351, LA, USA, February.
- Hajela, P. and F.J. Soeiro**, 1989, "Structural Damage Detection Based on Static and Modal Analysis," in *Proc. of 30th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, 1172–1182, AIAA-89-1293-CP, Mobile, Alabama, April 3-5
- Hajela, P. and F.J. Soeiro**, 1990, "Recent Developments in Damage Detection Based on System Identification Methods," *Structural Optimization*, **2**.

- Haug, E. F. and K. K. Choi**, 1984, "Structural Design Sensitivity Analysis with Generalized Global Stiffness and Mass Matrices," *AIAA Journal*, **22**(9), 1299–1303.
- He, J. and D.J. Ewins**, 1986, "Analytical Stiffness Matrix Correction Using Measured Vibration Modes," *Modal Analysis: The International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis*, **1**(3), 9–14.
- Hearn, G. and R.B. Testa**, 1991, "Modal Analysis for Damage Detection in Structures" *Journal of Structural Engineering*, **117**(10), 3042–3063.
- Hemez, F.M.**, 1993, Theoretical and Experimental Correlation Between Finite Element Models and Modal Tests in the Context of Large Flexible Space Structures, *Ph. D. Dissertation, Dept. of Aerospace Engineering Sciences*, University of Colorado, Boulder, CO.
- Huang, F. and S. Gu**, 1993, "Application of Higher Order Cumulants to Structure Fault Diagnosis", in *Proc. 11th International Modal Analysis Conference*, 1237–1240, FL, USA, February.
- Huang, T.-J., Z. Liang, and G.C. Lee**, 1996, "Structural Damage Detection Using Energy Transfer Ratios (ETR)," in *Proc. 14th International Modal Analysis Conference*, 126–132, Michigan, February.
- Ismail, F., A. Ibrahim, and H.R. Martin**, 1990, "Identification of Fatigue Cracks from Vibration Testing" *Journal of Sound and Vibration*, **140**, 305–317.
- Jain, B.K.**, 1991, "Diagnostics Through Experimental Vibration Signature Analysis of Prestressed Concrete Bridges," *International Symposium on Fracture in Steel and Concrete Structures*, 1123–1136, Madras, India,.
- James, G., R. Mayes, T. Carne, T. Simmermacher, and J. Gooding**, 1995, "Health Monitoring of Operational Structures–Initial Results," in *Proc. of 36th*

AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, 2226–2236, New Orleans, Louisiana, April 10-13.

Jauregui, D.V. and C.R. Farrar, 1996a, “Damage Identification Algorithms Applied to Numerical Modal Data From a Bridge,” in *Proc. 14th International Modal Analysis Conference*, 119–125, Michigan, USA, February.

Jauregui, D.V. and C.R. Farrar, 1996b, “Comparison of Damage Identification Algorithms on Experimental Modal Data From a Bridge,” in *Proc. 14th International Modal Analysis Conference*, 1423–1429, Michigan, USA, February.

Ju, F. and M. Mimovich, 1986, “Modal Frequency Method in Diagnosis of Fracture Damage in Structures,” in *Proc. of the 4th International Modal Analysis Conference*, 1168–1174, Los Angeles, February.

Ju, F., 1993, “Structural Dynamic Theory in Health Monitoring,” *Vibration, Shock, Damage, and Identification of Mechanical Systems, ASME DE*, **64**, 39–46.

Juneja, V., R.T. Haftka and H.H. Cudney, 1994, “Location of Damage in a Space Structure by Contrast Maximization,” in *Proc. of 35th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, 296–306, AIAA-94-1711-CP, South Carolina, April 18-20.

Kabe, A.M., 1985, “Stiffness Matrix Adjustment Using Mode Data,” *AIAA Journal*, **23**(9), 1431–1436.105

Kam, T.Y. and T.Y. Lee, 1992, “Detection of Cracks in Structures Using Modal Test Data,” *Engineering Fracture Mechanics*, **42**(2), 381–387.

Kammer, D. C., 1988, “Optimal Approximation for Residual Stiffness in Linear System Identification,” *AIAA Journal*, **26**(1), 104–112.

- Kaouk, M.**, 1993, Finite Element Model Adjustment and Damage Detection Using Measured Test Data, *Ph. D. Dissertation, Dept. of Aerospace Engineering Mechanics and Engineering Science*, Univ. of Florida, Gainesville, FL.
- Kaouk, M. and D.C. Zimmerman**, 1994a, "Structural Damage Assessment Using a Generalized Minimum Rank Perturbation Theory," *AIAA Journal*, **32**(4), 836–842.
- Kaouk, M. and D.C. Zimmerman**, 1994b, "Assessment of Damage Affecting All Structural Properties," in *Proc. of the 9th VPI&SU Symposium on Dynamics and Control of Large Structures*, 445–455, Blacksburg, VA, May.
- Kaouk, M. and D.C. Zimmerman**, 1995a, "Structural Health Assessment Using a Partition Model Update Technique," in *Proc. of the 13th International Modal Analysis Conf.*, 1673–1679, Nashville, Tennessee, February 13-16.
- Kaouk, M. and D.C. Zimmerman**, 1995b, "Reducing the Required Number of Modes for Structural Damage Assessment," in *Proc. of 36th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conf.*, 2802–2812, AIAA-95-1094-CP, New Orleans, Louisiana, April 10-13.
- Kato, M. and S. Shimada**, 1986, "Vibration of PC Bridge During Failure Process," *ASCE Journal of Structural Engineering*, **112**, 1692–1703.
- Kim, H.M. and T.J. Bartkowicz**, 1993, "Damage Detection and Health Monitoring of Large Space Structures, *Sound and Vibration*, **27**(6), 12–17..106
- Kim, H.M. and T.J. Bartkowicz**, 1994, "A Two-Step Structural Damage Detection Using a Hexagonal Truss Structure," in *Proc. of 35th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conf.*, 318–324, AIAA-94-1713-CP, South Carolina, April 18-20.
- Kim, H.M. and T.J. Bartkowicz**, 1995, "An Experimental Study for Damage Detection Using a Hexagonal Truss Structure" in *Proc. of 36th*

AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conf., 3347–3356, AIAA-95-1116-CP, New Orleans, Louisiana, April 10-13

Kim, H.M., T.J. Bartkowicz, S.W. Smith, and D.C. Zimmerman, 1995a, “Structural Health Monitoring of Large Structures,” in *Proc. of 49th Meeting of the Society for Machinery Failure Prevention Technology*, 403–412, April.

Kim, J.-H., H.-S. Jeon, and C.-W. Lee, 1992, “Application of the Modal Assurance Criteria for Detecting and Locating Structural Faults,” in *Proc. 10th International Modal Analysis Conference*, 536–540, San Diego, CA, February.

Kim, J.-T., and N. Stubbs, 1993, Assessment of the Relative Impact of Model Uncertainty on the Accuracy of Global Nondestructive Damage Detection in Structures. *Report prepared for New Mexico State University*.

Kirkegaard, P. and A. Rytter, 1994, “Use of Neural Networks for Damage Assessment in a Steel Mast,” in *Proc. of the 12th International Modal Analysis Conference*, 1128–1134, Honolulu, February 1-4.

Kirkegaard, P., S. Nielsen, and H. Hansen, 1995, “Identification of Non-Linear Structures using Recurrent Neural Networks,” in *Proc. of the 13th International Modal Analysis Conference*, 1128–1134, Nashville, Tennessee, February 13-16.

Klein, K., J.Y. Guigne, and A.S.J. Swamidas, 1994, “Monitoring Changes in Modal Parameters with Fatigue,” in *Proc. of the 12th International Modal Analysis Conference*, 1792–1800, Honolulu, February 1-4.

Klenke, S.E. and T.L. Paez, 1996, “Damage Identification with Probabilistic Neural Networks,” in *Proc. of the 14th International Modal Analysis Conference*, 99–104, Michigan, February.

Ko, J. M., C. W. Wong, and H. F. Lam, 1994, “Damage Detection in Steel Framed Structures by Vibration Measurement Approach,” in *Proc. of 12th International Modal Analysis Conference*, 280–286, Honolulu, February 1-4.

- Koh, C.G., L.M. See and T. Balendra**, 1995, "Damage Detection of Buildings: Numerical and Experimental Studies," *Journal of Structural Engineering*, **121**(8), 1155–1160.107
- Kong, F., Z. Liang, and G.C. Lee**, 1996, "Bridge Damage Identification Through Ambient Vibration Signature," in *Proc. 14th International Modal Analysis Conference*, 717–724, Michigan, February.
- Krawczuk, M. and W.M. Ostachowicz**, 1992, "Parametric Vibrations of a Beam with Crack," *Archive of Applied Mechanics*, **62**, 463–473.
- Kudva, J., N. Munir, and P. Tan**, 1991, "Damage Detection in Smart Structures Using Neural Networks and Finite Element Analysis," in *Proc. of ADPA/AIAA/ASME/SPIE Conference on Active Materials and Adaptive Structures*, 559–562, Alexandria, VA, Nov
- Ladeveze, P. and M. Reynier**, 1989, "A Localization Method of Stiffness Errors for the Adjustment of FE Models," in *Proc. of the 12th ASME Mechanical Vibration and Noise Conference*, 355–361, Montreal, Canada, Sept. 17 – 21.
- Lam, H.F., J.M. Ko, and C.W. Wong**, 1995, "Detection of Damage Location Based on Sensitivity Analysis," in *Proc. of the 13th International Modal Analysis Conference*, 1499–1505, Nashville, Tennessee, February 13-16.
- Law, S.S., P. Waldron, and C. Taylor**, 1992, "Damage Detection of a Reinforced Concrete Bridge Deck Using the Frequency Response Function," in *Proc. of the 10th International Modal Analysis Conference*, 772–778, San Diego, CA, February.
- Leath, W.J. and D.C. Zimmerman**, 1993, "Analysis of Neural Network Supervised Training with Application to Structural Damage Detection," *Damage and Control of Large Structures, Proc. of the 9th VPI&SU Symposium*, 583–594, Blacksburg, VA, USA, May.

- Li, C. and S.W. Smith,** 1994, "A Hybrid Approach for Damage Detection in Flexible Structures," in *Proc. of 35th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, 285–295, South Carolina, April 18-20.
- Li, C. and S.W. Smith,** 1995, "Hybrid Approach for Damage Detection in Flexible Structures," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, **18**(3), 419–425.
- Liang, Z., M. Tong, and G.C. Lee,** 1995, "Modal Energy Measurement of a Long Steel Bridge," in *Proc. 13th International Modal Analysis Conference*, 226–232, Nashville, Tennessee, February 13-16.
- Lim, T.W.,** 1990, "A Submatrix Approach to Stiffness Matrix Correction Using Modal Test Data," *AIAA Journal*, **28**(6), 1123–1130..108
- Lim, T.W.,** 1991, "Structural Damage Detection Using Modal Test Data," *AIAA Journal*, **29**(12), 2271–2274.
- Lin, C. S.,** 1990, "Location of Modeling Errors Using Modal Test Data," *AIAA Journal*, **28**, 1650–1654.
- Lin, C.S.,** 1994, "Unity Check Method for Structural Damage Detection," in *Proc. Of 35th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, 347–354, AIAA-94-1717-CP, South Carolina, April 18-20.
- Lin R.M. and D.J. Ewins,** 1990, "On the Location of Structural Nonlinearity from Modal Testing—A Feasibility Study," in *Proc. of the 8th International Modal Analysis Conference*, 358–364, Florida, USA, February.

- Lindner, D.K. and R. Goff**, 1993, "Damage Detection. Location and Estimation for Space Trusses," *SPIE Smart Structures and Intelligent Systems*, **1917**, 1028–1039.
- Lindner, D.K., G.B. Twitty, and S. Osterman**, 1993, "Damage Detection for Composite Materials using Dynamic Response Data," *ASME Adaptive Structures and Materials Systems*, **35**, 441–448.
- Lindner, D. K., and G. Kirby**, 1994, "Location and Estimation of Damage in a Beam Using Identification Algorithms," in *Proc. of 35th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conf.*, 192–198, AIAA-94-1755-CP, South Carolina, April 18-20.
- Liu, P.-L.**, 1995, "Identification and Damage Detection of Trusses using Modal Data" *Journal of Structural Engineering*, **121**(4), 599–608.
- Ma, C. and Q. Zeng**, 1994, "The Time Frequency Spectral Estimation of Nonlinear Vibration Systems" in *Proc. 12th International Modal Analysis Conference*, 857–862, Honolulu, February 1-4.
- Man, X.T., L.M. McClure, Z. Wang, R.D. Finch, P.Y. Robin, and B.H. Jansen**, 1994, "Slot Depth Resolution in Vibration Signature Monitoring of Beams Using Frequency Shift" *Journal of the Acoustic Society of America*, **95**(4), 2029–2037.109
- Manning, R.**, 1994, "Damage Detection in Adaptive Structures Using Neural Networks" in *Proc. of 35th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, 160–172, South Carolina, April 18-20.
- Manson, G., K. Worden, and G.R. Tomlinson**, 1993, "Pseudo-Fault Induction in Engineering Structures" *ASME Adaptive Structures and Materials Systems*, **AD 35**, 449–455.

- Mayes, R.L.**, 1995, "An Experimental Algorithm for Detecting Damage Applied to the I-40 Bridge over the Rio Grande," in *Proc. 13th International Modal Analysis Conference*, 219–225, Nashville, Tennessee, February 13-16.
- Mazurek, D.F. and J.T. DeWolf**, 1990, "Experimental Study of Bridge Monitoring Tech-nique" *ASCE Journal of Structural Engineering*, **116**, 2532–2549.
- Meneghetti, U. and A. Maggiore**, 1994, "Crack Detection by Sensitivity Analysis," in *Proc. of the 12th International Modal Analysis Conference*, 1292–1298, Honolulu, February 1-4.
- Migliori, A., T.M. Bell, R.D. Dixon, R. Strong**, 1993, Resonant Ultrasound Non-Destructive Inspection, *Los Alamos National Laboratory report LA-UR-93-225*.
- Mioduchowski, A.**, 1993, "Shear Waves in Buildings with Discontinuous Distribution of Microcracks" in *Proc. 11th International Modal Analysis Conference*, 108–114, Florida, USA, February.
- Mottershead, J.E. and M.I. Friswell**, 1993, "Model Updating in Structural Dynamics: A Survey" *Journal of Sound and Vibration*, **167**(2), 347–375.
- Narkis, Y.**, 1994, "Identification of Crack Location in Vibrating Simply Supported Beams" *Journal of Sound and Vibration*, **172**(4), 549–558.
- Norris, M.A. and L. Meirovitch**, 1989, "On the Problem of Modeling for Parameter Iden-tification in Distributed Structures" *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, **28**, 2451–2463.
- Nwosu, D.I., A.S.J. Swamidas, J.Y. Guigne, and D.O. Olowokere**, 1995, "Studies on Influence of Cracks on the Dynamic Response of Tubular T-Joints for Nondestructive Evaluation" in *Proc. of the 13th International Modal Analysis Conference*, 1122–1128.110, Nashville, Tennessee, February 13-16.

- Ojalvo, I.U. and D. Pilon**, 1988, "Diagnostics for Geometrically Locating Structural Math Model Errors from Modal Test Data" in *Proc. of 29th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, 1174–1186, Williamsburg, VA, April 18-21.
- Ojalvo, I.**, 1992, "A Consistent First-Order Theory for Structural Model Parameter Improvement Based Upon Dynamic Test Data" in *Proc. of 33rd AIAA/ ASME/ ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, 2286–2294, AIAA-92-2516-CP, New Orleans, Louisiana, April 10-13
- Olhoff, N. and J. Rasmussen**, 1991, "Method of Error Elimination for a Class of Semi-Analytical Sensitivity Analysis Problems" *Optimization in Engineering*, Verlag, 192–200.
- Pandey, A.K., M. Biswas, and M.M. Samman**, 1991, "Damage Detection from Changes in Curvature Mode Shapes" *Journal of Sound and Vibration*, **145**(2), 321–332.
- Pandey, A.K., and M. Biswas**, 1994, "Damage Detection in Structures Using Changes in Flexibility" *Journal of Sound and Vibration*, **169** (1), 3–17.
- Pape, D.A.**, 1993, "A Modal Analysis Approach to Flaw Detection in Ceramic Insulators" in *Proc. of the 11th International Modal Analysis Conference*, 35–40, Florida, February.
- Park, Y.S., H.S. Park, and S.S. Lee**, 1988, "Weighted-Error-Matrix Application to Detect Stiffness Damage-Characteristic Measurement" *Modal Analysis: The International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis*, **3**(3), 101–107.
- Patrick D.T. O'Conner**, 1991, "Practical Reliability Engineering", 3. baskı, John Wiley & Sons Ltd, England.

- Penny, J.E.T., D.A.L. Wilson, and M.I. Friswell**, 1993, "Damage Location in Structures Using Vibration Data" in *Proc. of the 11th International Modal Analysis Conference*, 861–867, Florida, February
- Perchard, D.R., and A.S.J. Swamidas**, 1994, "Crack Detection in Slender Cantilever Plates Using Modal Analysis" in *Proc. of the 12th International Modal Analysis Conference*, 1769–1777, Honolulu, February 1-4.
- Peterson, L.D., S.W. Doebling and K.F. Alvin**, 1995, "Experimental Determination of Local Structural Stiffness by Disassembly of Measured Flexibility Matrices" in *Proc. of 111 36th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, 2756–2766, AIAA-95-1090-CP, New Orleans, Louisiana, April 10-13
- Petroski, H. J. and J. L. Glazik**, 1980, "Effects of Cracks on the Response of Circular Cylindrical Shells" *Nuclear Technology*, **5**, 303–316.
- Piranda, J., G. Lallement, and S. Cogan**, 1991, "Parametric Correction of Finite Element Models by Minimization of an Output Residual: Improvement of the Sensitivity Method" in *Proc. of the 9th International Modal Analysis Conference*, 363–368, Firenze, Italy, September 10-12
- Povich, C., and T. Lim**, 1994, "An Artificial Neural Network Approach to Structural Damage Detection Using Frequency Response Functions" in *Proc. of 35th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, 151–159, South Carolina, April 18-20.
- Prime, M.B. and D.W. Shevitz**, 1996, "Linear and Nonlinear Methods for Detecting Cracks in Beams", in *Proc. of the 14th International Modal Analysis Conference* 1437–1443, Michigan, USA, February.
- Prion, H.G.L., C.E. Ventura and M. Rezai**, 1996, "Damage Detection of Steel Frame By Modal Testing" in *Proc. 14th International Modal Analysis Conference*, 1430–1436, Michigan, February.

- Raghavendrachar, M. and A. E. Aktan**, 1992, "Flexibility by Multireference Impact Testing for Bridge Diagnostics" *ASCE Journal of Structural Engineering*, **118**, 2186–2203.
- Rhim, J. and S. Lee**, 1994, "A Neural Network Approach for Damage Detection and Identification of Structures" in *Proc. of 35th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, 173–180, South Carolina, April 18-20.
- Richardson, M.H.**, 1980, Detection of Damage in Structures from Changes in their Dynamic (Modal) Properties- A survey, NUREG/CR-1431, U.S. *Nuclear Regulatory Commission*, Washington, D.C.
- Ricles, J.M.**, 1991, Nondestructive Structural Damage Detection in Flexible Space Structures Using Vibration Characterization, *NASA report* CR-185670.
- Ricles, J.M. and J.B. Kosmatka**, 1992, "Damage Detection in Elastic Structures Using Vibratory Residual Forces and Weighted Sensitivity" *AIAA Journal*, **30**, 2310–2316.112
- Rizos, P.F., N. Aspragathos, and A.D. Dimarogonas**, 1990, "Identification of Crack Location and Magnitude in a Cantilever Beam from the Vibration Modes" *Journal of Sound and Vibration*, **138**(3), 381–388.
- Roy, N.A., A. Girard, and P.E. Dupuis**, 1991, "A Direct Energy Approach for Updating Dynamic Finite Element Models" in *Proc. 9th International Modal Analysis Conference*, 51-57, Firenze, Italy, September 10-12
- Rytter, A.**, 1993, Vibration Based Inspection of Civil Engineering Structures, *Ph. D. Dissertation, Department of Building Technology and Structural Engineering*, Aalborg University, Denmark.

- Salane, H.J., J.W. Baldwin, and R.C. Duffield**, 1981, "Dynamics Approach for Monitoring Bridge Deterioration" *Transportation Research Record*, **832**, 21–28.
- Salawu, O.S. and C. Williams**, 1993, "Structural Damage Detection Using Experimental Modal Analysis—A Comparison of Some Methods" in *Proc. of 11th International Modal Analysis Conference*, 254–260, Florida, USA, February.
- Salawu, O.S. and C. Williams**, 1994, "Damage Location Using Vibration Mode Shapes" in *Proc. of 12th International Modal Analysis Conference*, 933–939, Honolulu, February 1-4.
- Salawu, O.S.**, 1994, "Nondestructive Evaluation of Constructed Facilities Using Vibration Testing" *Insight*, **36**(8), 611–615.
- Salawu, O.S.**, 1995, "Nondestructive Assessment of Structures Using the Integrity Index Method Applied to a Concrete Highway Bridge" *Insight*, **37**(11), 875–878.
- Salawu, O.S. and C. Williams**, 1995, "Bridge Assessment Using Forced-Vibration Testing" *Journal of Structural Engineering*, **121**(2), 161–173.
- Samman, M.M., M. Biswas, and A.K. Pandey**, 1991, "Employing Pattern Recognition for Detecting Cracks in a Bridge Model" *Modal Analysis: The International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis*, **6**, 35–44.
- Samman, M. M. and M. Biswas**, 1994, "Vibration Testing for Nondestructive Evaluation of Bridges" *Journal of Structural Engineering*, **120**(1), 290–306.
- Sanayei, M. and O. Onipede**, 1991, "Damage Assessment of Structures Using Static Test Data" *AIAA Journal*, **29**(7), 1174–1179.

- Sanayei, M., O. Onipede, and S.R. Babu**, 1992, "Selection of Noisy Measurement Locations for Error Reduction in Static Parameter Identification" *AIAA Journal*, **30**(9), 2299–2309.
- Sanayei, M., and Saletnik, M. J.**, 1996a "Parameter Estimation of Structures from Static Strain Measurements; I: Formulation," ASCE, Journal of Structural Engineering, **122**(5), 555-562.
- Sanayei, M., and Saletnik, M. J.**, 1996b, "Parameter Estimation of Structures from Static Strain Measurements. II: Error Sensitivity Analysis," ASCE, Journal of Structural Engineering, **122**(5), 563-572.
- Schuetze, M., H. Doll, and P. Hildebrandt**, 1994, "Review on an Expert System Under Development: Measuring Techniques in Civil Engineering Including Structural Assessment" in *Proc. 13th International Modal Analysis Conference*, 1349, Nashville, Tennessee, February 13-16.
- Schulz, M.J., P.F. Pai, and A.S. Abdelnaser**, 1996, "Frequency Response Function Assignment Technique for Structural Damage Identification" in *Proc. of the 14th International Modal Analysis Conference*, 105–111, Michigan, February.
- Schwarz, B.J., P.L. McHargue, and M.H. Richardson**, 1996, "Using SDM to Train Neural Networks for Solving Modal Sensitivity Problems" in *Proc. of the 14th International Modal Analysis Conference*, 1285–1291, Michigan, February.
- Shen, M.H.H. and Y.C. Chu**, 1992, "Vibrations of Beams with a Fatigue Crack" *Computers & Structures*, **45**(1), 79–93.
- Shirole, A.M. and R.C. Holt**, 1991, "Planning for a Comprehensive Bridge Safety Assurance Program" *Transportation Research Record*, **1290**, 39–50.
- Sibbald, A., A. Bensalem, and C.A. Fairfield**, 1995, "NDT of Arch Bridges" *Insight*, **37**(11), 864–870.

- Silva, J.M.M. and A.J.M.A. Gomes**, 1990, "Experimental Dynamic Analysis of Cracked Free-free Beams" *Experimental Mechanics*, **30**(1), 20–25..114
- Silva, J.M.M. and A.J.M.A. Gomes**, 1994, "Crack Identification of Simple Structural Elements Through the use of Natural Frequency Variations: The Inverse Problem" in *Proc. of the 12th International Modal Analysis Conference*, 1728–1735, Honolulu, February 1-4.
- Simmermacher, T., D.C. Zimmerman, R.L. Mayes, G.M. Reese and G.H. James**, 1995, "Effects of Finite Element Grid Density on Model Correlation and Damage Detection of a Bridge" in *Proc. of 36th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, 2249-2258, New Orleans, Louisiana, April 10-13
- Skjaerbaek, P.S., S.R.K. Nielsen, and A.S. Cakmak**, 1996, "Assessment of Damage in Seismically Excited RC-Structures from a Single Measured Response" in *Proc. Of the 14th International Modal Analysis Conference*, 133–139, Michigan, February.
- Smith, S.W. and C.A. Beattie**, 1991a, Model Correlation and Damage Location for Large Space Truss Structures: Secant Method Development and Evaluation, *NASA-CR-188102*.
- Smith, S.W. and C.A. Beattie**, 1991b, "Secant-Method Adjustment for Structural Models" *AIAA Journal*, **29**(1), 119–126.
- Smith, S.W. and C.A. Beattie**, 1991c, "Optimal Identification Using Inconsistent Modal Data" in *Proc. of 32nd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, 2319–2324, AIAA-91-0948-CP, Baltimore, April 8-10

- Smith, S.W.**, 1992, "Iterative Use of Direct Matrix Updates: Connectivity and Convergence" in *Proc. of 33rd AIAA Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, 1797–1806., Texas, USA, April.
- Soeiro, F.J. and P. Hajela**, 1990, "Damage Detection in Composite Materials Using Identification Techniques," in *Proc. of 31st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, AIAA-90-0917-CP, 950–960, Long Beach, CA, April.
- Spillman, W., D. Huston, P. Fuhr, and J. Lord**, 1993, "Neural Network Damage Detection in a Bridge Element," *SPIE Smart Sensing, Processing, and Instrumentation*, 1918, 288–295, R.O. Claus, ed., July.
- Springer, W.T. and A. Reznicek**, 1993, "The Stiffness Matrix for an L-Section Beam Containing a Crack" in *Proc. 11th International Modal Analysis Conference*, 994–997.115, Florida, USA, February 1-4
- Spyrakos, C., H.L. Chen, J. Stephens, and V. Govindaraj**, 1990, "Evaluating Structural Deterioration Using Dynamic Response Characterization" *Proc. Intelligent Structures*, Elsevier Applied Science, 137–154.
- Stephens, J.E. and R.D. VanLuchene**, 1994, "Integrated Assessment of Seismic Damage in Structures" *Microcomputers in Civil Engineering*, **9**, 119–128.
- Straser, E. G. and A. S. Kiremidjian**, 1996, "Monitoring and Evaluating Civil Structures Using Measured Vibration" in *Proc. 14th International Modal Analysis Conference*, 84–90, Michigan, USA, February 12-15.
- Stubbs, N. and R. Osegueda**, 1987, "Global Nondestructive Damage Evaluation of Offshore Platforms Using Modal Data" in *Proc. of the 6th International Offshore Mechanics and Arctic Engineering Conf.*, 517–524, Houston, Texas, U.S.A., March 1-6

- Stubbs, N. and R. Osegueda**, 1990a, "Global Non-Destructive Damage Evaluation in Solids" *Modal Analysis: The International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis*, **5**(2), 67–79.
- Stubbs, N. and R. Osegueda**, 1990b, "Global Damage Detection in Solids—Experimental Verification" *Modal Analysis: The International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis*, **5**(2), 81–97.
- Stubbs, N., J.-T. Kim, and K. Topole**, 1992, "An Efficient and Robust Algorithm for Damage Localization in Offshore Platforms" in *Proc. ASCE Tenth Structures Congress*, 543–546., San Antonio, Texas, April 13-16
- Stubbs, N., J.-T. Kim, and C.R. Farrar**, 1995, "Field Verification of a Nondestructive Damage Localization and Severity Estimation Algorithm" in *Proc. 13th International Modal Analysis Conference*, 210–218., Nashville, Tennessee, February 13-16
- Surace, C. and R. Ruotolo**, 1994, "Crack Detection of a Beam Using the Wavelet Transform" in *Proc. 12th International Modal Analysis Conference*, 1141., Honolulu, Februar 1-4
- Swamidas, A.S.J. and Y. Chen**, 1995, "Monitoring crack Growth Through Change of Modal Parameters" *Journal of Sound and Vibration*, **186**(2), 325–343.
- Szewczyk, P.Z. and P. Hajela**, 1994, "Damage Detection in Structures Based on Feature-Sensitive Neural Networks" *ASCE Journal of Computing in Civil Engineering*, **8**(2), 163–178.
- Tang, J.P., and K.-M. Leu**, 1991, "Vibration Tests and Damage Detection of P/C Bridg-es" *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, **14**, 531–536..116
- Toksoy, T. and A.E. Aktan**, 1994, "Bridge-condition Assessment by Modal Flexibility" *Experimental Mechanics*, **34**, 271–278.

- Tsou, P. and M.-H. H. Shen,** 1994, "Structural Damage Detection and Identification Using Neural Networks" *AIAA Journal*, **32**(1), 176–183.
- Turner, J.D. and A.J. Pretlove,** 1988, "A Study of the Spectrum of Traffic-Induced Bridge Vibration" *Journal of Sound and Vibration*, **122**, 31–42.
- Uzgider, E., Özgen A., Piroglu, F., and Dönmez, M.** (1992) *Preliminary Report for Çerkezköy Railway Bridge*, NATO Science for Stability Programme, *TU-BRIDGES Research Project Report 3*, published by the Istanbul Technical University, Civil Engineering Faculty, Istanbul / Turkey.
- Uzgider, E., Ozgen, A., Piroglu, F., and Sanli, A.K.** (1993) "Full-Scale Testing of Railway Bridges", *Proceedings of the 4th Int. Conference on Structural Failure, Product Liability and Technical Insurance, organized by the Technical University of Vienna*, pp. 365-372, Elsevier Science Publishers B.V.
- Uzgider, E., Piroglu, F., Sanli, A.K. and Caglayan, O.B.** (1994) "Bridge Behavior Using Dynamic Strain Measurement"s, *Proceedings of the International Bridge Conference - Warsaw 94 organized by Road and Research Institute*, **2**, 115-124, Warsaw/Poland
- Uzgider, E., Sanli, A.K. and Caglayan, O.B.** (1994) "Real Time Identification of Railway Bridges Using Acceleration Recordings Under Current Traffic", *Proceedings of the International Bridge Conference - Warsaw 94, organized by Road and Research Institute*, **1**, 175-182, Warsaw/Poland.
- Uzgider, E.** (1994) "Non-Destructive Testing and Evaluation Methods for Railway Bridges", *Transportation Infrastructure: Environmental Challenges in Poland and Neighboring Countries*, published in cooperation with NATO Scientific Affairs Division, NATO ASI Series 2. 5, 413-422, Springer Verlag.
- Uzgider, E.** (1994) "Non-Destructive Testing and Evaluation Methods for Railway Bridges", *Transportation Infrastructure: Environmental Challenges in Poland*

and Neighboring Countries, published in cooperation with NATO Scientific Affairs Division, NATO ASI Series, 2., 5, 413-422, Springer Verlag.

Uzgider, E., Sanli, A.K., Piroglu, F. and Caglayan, O. B. (1995) "Identification of Railway Bridges Using Traffic Induced Vibrations", *TRB Transportation Research Board*, Steel, Concrete and Wood Bridges, Record No 1476, , 48-58, National Academy Press, Washington D.C./ USA

Uzgider, E., Sanli, A., Piroglu, F. and Caglayan, B.O. (1996) "General Report for the Bridge Tests Conducted in 1992, 1993 and 1994", *NATO Science for Stability Programme TU-850-BRIDGES Research Project Report 4*, published by the Istanbul Technical University, Civil Engineering Faculty, Istanbul Technical University, Civil Engineering Faculty, Structural Department, Istanbul / Turkey

Uzgider, E., Sanli, A.K., Piroglu, F., Ozgen, A., Caglayan, B.O. and Tektunali, A.C. (1996) "Testing & Evaluation of Karacam Railway Bridge", *NATO Science for Stability Programme, TU-BRIDGES Research Project Report 5*, published by the Istanbul Technical University, Civil Engineering Faculty, Istanbul / Turkey.

Uzgider, E., Gunduz, N., Aydogan, M., Piroglu, F., Caglayan, B.O., Rahmatian, P. and Ilicali, B. (1996) "Testing & Evaluation of Cambazkaya Railway Bridge", *NATO Science for Stability Programme, TU-BRIDGES Research Project Report 6*, published by the Istanbul Technical University, Civil Engineering Faculty, Istanbul / Turkey.

Uzgider, E., Aydogan, M., Gunduz, N., Sanli, A.K., Ozuer, B., Caglayan, B.O. and Babal, M. (1996) "Testing & Evaluation of Ismetpasa Railway Bridge", *NATO Science for Stability Programme, TU-BRIDGES Research Project Report 7*, published by the Istanbul Technical University, Civil Engineering Faculty, Istanbul / Turkey.

- Uzgider, E., Piroglu, F., Sanli, A.K., Ozuer, B., Caglayan, B.O. and Kaya, H.** (1996) "Testing & Evaluation of Luleburgaz Railway Bridge", *NATO Science for Stability Programme, TU-BRIDGES Research Project Report 8*, published by the Istanbul Technical University, Civil Engineering Faculty, Istanbul / Turkey.
- Villemure, I., C.E. Ventura, and R.G. Sexsmith,** 1996, "Impact and Ambient Vibration Testing To Assess Structural Damage In Reinforced Concrete Frames," in *Proc. 14th International Modal Analysis Conference*, 1178–1184., Michigan, USA, February.
- Wang, W. and A. Zhang,** 1987, "Sensitivity Analysis in Fault Vibration Diagnosis of Structures" in *Proc. of 5th International Modal Analysis Conference*, 496–501., London, 6-9 April.
- White, K.R., J. Minor, and K.N. Derucher,** 1992, Bridge Maintenance, Inspection and Evaluation, *Marcel Dekker*, New York.
- Wolff, T. and M. Richardson,** 1989, "Fault Detection in Structures From Changes in Their Modal Parameters," in *Proc. of the 7th International Modal Analysis Conference*, 87–94, LasVegas, USA, February.
- Worden, K. and G.R. Tomlinson,** 1993, "Damage Location and Quantification Using Neural Networks" from *Engineering Integrity Assessment*, J.M. Edwards, J. Kerr, P. Stanley, Eds., Chameleon Press Ltd., London, 11–33.
- Worden, K., A. Ball, and G. Tomlinson,** 1993, "Neural Networks for Fault Location," in *Proc. of the 11th International Modal Analysis Conference*, 47–54.117, Florida, USA, February.
- Wu, X., J. Ghaboussi, and J.H. Garrett,** 1992, "Use of Neural Networks in Detection of Structural Damage" *Computers and Structures*, **42**(4), 649–659.

- Yen, G.G. and M.K. Kwak**, 1993, "Neural Network Approach for the Damage Detection of Structures" in *Proc. of 34th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, 1549–1555, AIAA-93-1485-CP, La Jolla, CA, April 19-21.
- Yuen, M.M.F.**, 1985, "A Numerical Study of the Eigenparameters of a Damaged Cantilever" *Journal of Sound and Vibration*, **103**, 301–310.
- Zhang, D.-W. and L. Zhang**, 1992, "Matrix Transformation Method for Updating Dynamic Models" *AIAA Journal*, **30**(5), 1440–1443.
- Zhang, Z. and A.E. Atkan**, 1995, "The Damage Indices for Constructed Facilities" in *Proc. of the 13th International Modal Analysis Conference*, 1520–1529, Nashville, Tennessee, February 13-16.
- Zhao J. and J.T. DeWolf**, 1999, "Sensitivity Study for Vibrational Parameters Used in Damage Detection", *Journal of Structural Engineering*, **125**(4), 410-416.
- Zimmerman, D.C. and M. Kaouk**, 1992, "Eigenstructure Assignment Approach for Structural Damage Detection" *AIAA Journal*, **30**(7), 1848–1855.
- Zimmerman, D.C. and S.W. Smith**, 1992, "Model Refinement and Damage Location for Intelligent Structures" *Intelligent Structural Systems*, H.S. Tzou and G.L. Anderson, Eds., Kluwer Academic Publishers, 403–452.
- Zimmerman, D.C., S.W. Smith, H.M. Kim, and T.J. Bartkowicz**, 1996, "An Experimental Study of Structural Damage Detection Using Incomplete Measurements" *ASME Journal of Vibration and Acoustics*, **118**(4), .543-550.
- Zimmerman, D.C. and T. Simmermacher**, 1994, "Model Refinement and System Health Monitoring Using Data From Multiple Static Loads and Vibration Tests" in *Proceedings of the AIAA Dynamic Specialists Conference*, April, 1994, Hilton Head, SC, p.325-335.

Zimmerman, D.C., M. Kaouk, and T. Simmermacher, 1995a, “Structural Damage Detection Using Frequency Response Functions” in *Proc. of the 13th International Modal Analysis Conf.*, 179–184, Nashville (Tennessee), February 13-16.

Zimmerman, D.C. and T. Simmermacher, 1995, “Model Correlation Using Multiple Static Load and Vibration Tests” *AIAA Journal*, **33**(11), 2182–2188.

Zimmerman, D.C., S.W. Smith, H.-M. Kim, and T.J. Bartkowicz, 1996, “Spacecraft Applications for Damage Detection Using Vibration Testing” in *Proc. of the 14th International Modal Analysis Conference*, 851–856..118.119, Michigan, USA, February 12-15.



ÖZGEÇMİŞ

Yazar, 1968 senesinde İzmirde doğdu. 1980 senesinde Hakimiyeti Milliye ilkokulundan, 1986 senesinde İzmir Anadolu Lisesinden başarıyla mezun oldu.

1986 senesinde İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölüme kayıt olup, 1990 yılında ilk ona girerek iyi bir dereceyle mezun oldu. Aynı yıl, aynı fakültenin yüksek lisans bölümüne kaydoldu. 1991 yılında İnşaat Fakültesi Yapı Anabilim Dalına asistan olarak alındı. 1993 yılında yüksek lisansı başarıyla tamamlayıp, Yüksek İnşaat Mühendisi Ünvanını aldı. Yazar halen İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Yapı Anabilim Dalında görev yapmaktadır.