T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YAPISAL HASAR TEŞHİSİNDE DALGACIK DÖNÜŞÜMÜNE DAYALI BİR YÖNTEM GELİŞTİRİLMESİ

Hakan GÖKDAĞ

DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA-2010

T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YAPISAL HASAR TEŞHİSİNDE DALGACIK DÖNÜŞÜMÜNE DAYALI BİR YÖNTEM GELİŞTİRİLMESİ

Hakan GÖKDAĞ

Prof.Dr. Osman KOPMAZ
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA-2010

T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YAPISAL HASAR TEŞHİSİNDE DALGACIK DÖNÜŞÜMÜNE DAYALI BİR YÖNTEM GELİŞTİRİLMESİ

Hakan GÖKDAĞ

DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu Tez 17/09/2010 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Osman KOPMAZ Danışman	Prof. Dr. İbrahim YÜKSEL Üye	Prof. Dr. Tuncay ERTAŞ Üye
Prof. Dr. Hakan BOYACI Üye		Yrd. Doç. Dr. Gürsel ŞEFKAT Üye

ÖZET

Doğal frekanslar, sönüm oranları ve doğal titreşim modları hasar sebebiyle yapının fiziksel özelliklerinde meydana gelen değişimlere duyarlı temel titreşim verileridirler. Titreşim modları, diğerlerinden farklı olarak, hasar yerine ait bilgiyi de içerir. Hasarlı bölgede mod verisinde hasar derecesi ile orantılı lokal süreksizlikler ortaya çıkar. Veride ölçümden kaynaklanan bir miktar parazit de mevcuttur. Dalgacık dönüşümü (DD) ölçüme karışan belli derecede parazite rağmen hasar kaynaklı süreksizliklerin yerini ve derecesini belirleyebilen bir matematiksel araçtır. DD'nin bu özelliğinden yararlanılarak, titreşim modları gibi konum verilerinin DD katsayıları ile hasar teşhisi yapılmaktadır. Bu konuda genellikle iki yaklaşım uygulanmaktadır. Birincisinde sadece hasarlı yapı verisine ait DD katsayıları kullanılır. İkincisinde sağlıklı haldeki verinin de DD katsayıları hesaplanır ve birincisinden çıkarılır. Birinci yaklaşımın üstün tarafı sağlıklı yapıya ait veriye ihtiyaç duymamasıdır. Çünkü bu tür bir referans veriyi elde etmek çoğu durumda zordur. Fakat hasar derecesi küçüldüğünde ve yüksek indisli titreşim modları kullanıldığında ikinci yaklaşım daha avantajlı olur. Bu çalışmada, sadece hasarlı haldeki veriyi kullanan, fakat performansı ikinci yaklaşımdakine yakın bir hasar teşhis yöntemi geliştirilmiştir. Yöntemin esası; uygun bir dalgacık fonksiyonu kullanarak ayrık DD (ADD) ile orijinal veriden bir yaklaşım fonksiyonu elde etmek ve bunu referans olarak kullanmaktır. Bunun için, öncelikle veri sınırlarda bozulma en az olacak şekilde genişletilir. Bu amaçla, performansı sıkça kullanılagelen yöntemlerden daha iyi olan, polinom uydurma esaslı basit ve etkili bir yöntem geliştirilmiştir. İkinci adımda, genişletilen veriden, sağlıklı haldeki mod şekli yerine kullanılmak üzere uygun bir yaklaşım fonksiyonu elde edilir. Bunun için ADD'nin çok-çözünürlüklü analiz özelliğinden ve sıfıra eşit momentlerinin sayısı yüksek dalgacıkların veri sıkıştırma kabiliyetinden yararlanılmıştır. ADD'de kullanılacak dalgacığın moment sayısı ve uygun ADD ayrışım düzeyinin nasıl belirleneceği izah edilmiş, yöntemin performansı kiriş, düzlem levha ve karmaşık şekilli sac parça gibi yapıların sayısal ve deneysel titreşim modları ile test edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yapısal hasar teşhisi, Titreşim modları, Dalgacık dönüşümü

ABSTRACT

Natural frequencies, damping ratios and vibration modes are the fundamental vibration parameters sensitive to changes in physical properties of structure due to damage. Apart from the others, vibration modes contain damage location info, as well. Mode shapes have local discontinuties which are proportional to damage extents. Moreover, measurement noise exists in vibration modes. The wavelet transform (WT) is a mathematical tool capable of identifying defect locations in modal shapes in spite of certain noise interference. In wavelet-based damage detection of spatial data such as mode shapes, there have been two major approaches. In the first, only the WT coefficients of damaged structural response are analyzed for defect identification. In the second, however, the WT coefficients of a reference data such as healthy structural mode shape are computed and subtracted from the former. The first method is advantegous in comparison to the second in that it does not require a reference data. Because, it is difficult to obtain such data in most cases, especially for the old structures. But, in the cases of small-extent damage and employement of higher order vibration modes, the second method becomes preferable. In this thesis, a new method using only the mode shapes of damaged structure but having more sensitivity to singularity then the first approach is proposed. This new method is based on extracting a suitable approximation function from the mode shape of damaged structure through the discrete WT (DWT), and employing this as reference like in the second method above. To this end, vibration mode of damaged structure is, first, extended at the ends to reduce border distortions as much as possible. In this regard, a new, simple and efficient extention method based on polynomial curve fitting is introduced. It is shown that this extention method is both capable of reducing distortion considerably and superior to the frequently used other approaches. In the second step, a suitable approximation function to use as reference is extracted from this extended mode shape by the DWT. For this purpose, the multiresolution property of the DWT and the data compression capability of wavelets having higher vanishing moments are utilised. The issues of selecting suitable number of vanishing moments and deciding on the correct DWT decomposition level are explained in detail. The performance of this new damage detection method is compared to the others' by applying to numerical and experimental vibration modes of beam, plate-like structure as well as a sheet metal part having complex geometry.

Key Words: Structural damage detection, Vibration modes, Wavelet transform

İÇİNDEKİLER

ÖZET ... iii
ABSTRACT ... iv
İÇİNDEKİLER ... v
KISALTMALAR DİZİNİ ... vi
ÇİZELGELER DİZİNİ ... vii
ŞEKİLLER DİZİNİ ... viii
SİMGELER DİZİNİ ... xi
GİRİŞ ... 1
1. KAYNAK ÖZETLERİ ... 5
1.1. Titreşim Temelli HT Yöntemleri ... 5
1.2. DD Temelli HT Yöntemleri ... 9
1.2.1. I. Grup DD Yöntemleri ... 12
1.2.2. II. Grup DD Yöntemleri ... 14
1.3. Tez Çalışmasının İçeriği ... 21
2. MATERYAL VE YÖNTEM ... 22
2.1. Titreşim Modları ... 22
2.2. Dalgacık Dönüşümü (DD) ... 25
2.2.1 SDD ve ADD ... 25
2.2.2 Dalgacık seçimi ... 36
2.2.3 DD temelli HT yöntemi ... 39
2.2.3.1. M_h'nin genişletilmesi ... 41
2.2.3.2. Uygun yaklaşım fonksiyonunun elde edilmesi ... 46
2.3. Titreşim Modlarının Deneysel Ölçümü ... 50
2.3.1. Teorik temeller ... 50
2.3.2. Deneysel çalışma ... 53
2.3.2.1 Donanımla ilgili ayarlar ... 55
2.3.2.2 Yazılımla ilgili ayarlar ... 57
2.3.2.3 FCF'lerden titreşim modlarının elde edilmesi ... 60
3. ARAŞTIRMA SONUÇLARI ve TARTIŞMA ... 63
3.1. Genişletme Yönteminin Test Edilmesi ... 63
3.1.1. P_d, N_{cf} ve s arasındaki ilişki ... 63
3.1.2. Diğer yöntemlerle karşılaştırılması ... 70
3.1.3. Deneysel veriye uygulama ... 77
3.2. Hasar Teşhisi ... 85
3.2.1 I_{II} indisinin kullanımı ... 85
3.2.2. İki boyutlu yapıda HT ... 115
3.2.2.1. Düzlem plak deneyi ... 126
3.2.2.2. Karmaşık şekilli sac parçada HT ... 141
SONUÇ ... 164
KAYNAKLAR ... 171
EK ... 178
ÖZGEÇMİŞ ... 182
TEŞEKKÜR ... 183

KISALTMALAR DİZİNİ

AA	-	Ankastre – Ankastre
ADD	-	Ayrık Dalgacık Dönüşümü
AS	-	Ankastre – Serbest
BB	-	Basit – Basit
B&K	-	Brüel & Kjaer
DD	-	Dalgacık Dönüşümü
DPD	-	Dalgacık Paketi Dönüşümü
FCF	-	Frekans Cevabı Fonksiyonu
FD	-	Fourier Dönüşümü
HT	-	Hasar Teşhisi
HÜ	-	Hölder Üsteli
LÜ	-	Lipschitz Üsteli
LDV	-	Laser Doppler Vibrometer
MAC	-	Modal Assurance Criterion
ODS	-	Operational Deflection Shape
SDD	-	Sürekli Dalgacık Dönüşümü
SNR	-	Signal to Noise Ratio
SS	-	Serbest – Serbest

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 EK'de verilen program ve ANSYS sonuçlarının karşılaştırılması. 24
Çizelge 2.2 Titreşim ölçüm setindeki elemanların temel özellikleri. 53
Çizelge 3.1 AA mesnetli kirişin 3. titreşim modu için bozulmaların karşılaştırılması... 72
Çizelge 3.2 BB kirişin 5. titreşim modu için bozulmaların karşılaştırılması..... 75
Çizelge 3.3 SS kirişin 8. titreşim modu için bozulmaların karşılaştırılması 75
Çizelge 3.4 Sınır şartları belirsiz kirişin 4. titreşim modu için bozulmaların karşılaştırılması..... 76
Çizelge 3.5 Deneysel ve sayısal doğal frekansların karşılaştırılması 80
Çizelge 3.6 Deneysel 1. titreşim modu için bozulmaların karşılaştırılması 82
Çizelge 3.7 Deneysel 2. titreşim modu için bozulmaların karşılaştırılması 82
Çizelge 3.8 Deneysel 3. titreşim modu için bozulmaların karşılaştırılması 83
Çizelge 3.9 Deneysel titreşim modları ölçülen kirişte hasar yeri ve özellikleri 88
Çizelge 3.10 sym14 dalgacığı için ölçek-frekans ilişkisi 96
Çizelge 3.11 İki boyutlu yapıda HT için kullanılan indisler. 116
Çizelge 3.12 Sac parçadaki yarıkların uzunluğu ve yerleşimi. 152

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 FD ve DD'nin karşılaştırılması 11
Şekil 1.2 Bir mod şekli için eğrilik ve SDD katsayılarının karşılaştırılması. 17
Şekil 1.3 Simetrik (a-1) ve asimetrik (a-2) titreşim modlarının HT için düzenlenmesi 20
Şekil 2.1 Bir kiriş elemanının düğüm noktalarındaki şekil değiştirme bileşenleri. 22
Şekil 2.2 Titreşim modlarının karşılaştırılması 24
Şekil 2.3 Hasarlı haldeki bir titreşim modunun SDD katsayılarının değişimi. 28
Şekil 2.4 Şekil 2.3'deki grafiğin SNR=80dB olması halinde görünümü. 30
Şekil 2.5 ADD katsayıları ve ayrışım düzeyi ilişkisi 34
Şekil 2.6 Bir sinyalin farklı düzeylerdeki ayrıntı ve yaklaşım fonksiyonları. 34
Şekil 2.7 Şekil 2.4'ü elde etmede kullanılan titreşim modunun ilk 6 düzeydeki ADD katsayıları. 35
Şekil 2.8 sym2 dalgacığı kullanılması halinde SDD katsayıları 37
Şekil 2.9 dbN ve symN dalgacık ailelerinin ilk birkaç ferdi. 39
Şekil 2.10 Bozulma azaltma ile ilgili bir önlem alınmaması halinde SDD katsayıları. 42
Şekil 2.11 sym6 dalgacığı. N_{sp} = 2x6-1=11 45
Şekil 2.12 Sol uçta bozulmadan etkilenen aralık. 45
Şekil 2.13 Sağlıklı (1) ve hasarlı (2) haldeki kirişin ilk 5 titreşim modu 47
Şekil 2.14 symN (N=2,3,…,20) dalgacığının filtre katsayılarının frekans spektrumları 49
Şekil 2.15 Tek serbestlik dereceli, viskoz sönümlü kütle-yay sistemi ve bunun reseptans formundaki FCF'sinin reel ve sanal kısımları 52
Şekil 2.16 Titreşim ölçüm setinin temel elemanları ve bilgisayarla bağlantısı. 54
Şekil 2.17 Kiriş ve plakta misina ile askılama 55
Şekil 2.18 B&K8206-003 nolu modal çekiç için uç seçenekleri ve spektral özellikleri 57
Şekil 2.19 Çit etkisi ve azaltılması 61
Şekil 3.1 1. mod şekli için sol ve sağ uçtaki bozulmalar. 65
Şekil 3.2 2. mod şekli için sol ve sağ uçtaki bozulmalar. 67
Şekil 3.3 2. mod şeklinin farklı ölçeklerde polinomla genişletilmesi ve bu halde SDD katsayılarının değişimi. 68
Şekil 3.4 Parazit olması ve olmaması halinde en uygun N_{cf} değerlerinin değişimi. 69
Şekil 3.5 3. titreşim modunun farklı yöntemlerle genişletilmesi. 72
Şekil 3.6 Farklı yöntemlerle elde edilen SDD katsayılarının karşılaştırılması. 74
Şekil 3.7 Deneysel çalışmada kullanılan kiriş 78
Şekil 3.8 Deneysel FCF eğrileri ve bunların sanal kısımlarının grafiği 79
Şekil 3.9 19. Ölçüm noktasındaki FCF ve tutarlılık fonksiyonları. 80
Şekil 3.10 Deneysel (D) ve sayısal (S) titreşim modlarının karşılaştırılması. 81
Şekil 3.11 3. titreşim modunun farklı yöntemlerle genişletilmesi. 83
Şekil 3.12 3. titreşim modunun s=20 ölçeğindeki SDD katsayıları 85
Şekil 3.13 AS kirişin 3. titreşim modu için MAC indislerinin ADD ayrışım düzeyi (1'den 7'ye kadar rakamlarla gösterilmiştir) ile değişimi ′=d/dx. 86

Şekil 3.14 3. titreşim modu ve bundan elde edilen yaklaşım fonksiyonlarının karşılaştırılması....87
Şekil 3.15 Deneysel titreşim modları ölçülen kirişte hasar konfigürasyonu. 88
Şekil 3.16 Hasarlı kirişin deneysel FCF eğrileri ve bunların sanal kısımlarının grafiği. 89
Şekil 3.17 Hasarlı (D) ve sağlıklı (U) haldeki kirişin ilk üç deneysel mod şekli 90
Şekil 3.18 SS kirişin deneysel titreşim modları için A_M ve M_h arasındaki korelasyonların ADD ayrışım düzeyi ile değişimi. 91
Şekil 3.19 1. titreşim modu için ayrışım düzeyi (M) ile korelasyon indislerinin değişimi. 93
Şekil 3.20 1. titreşim modunun hasarlı ve hasarsız halde frekans spektrumları. 95
Şekil 3.21 6 ve 7. düzeylerdeki yaklaşım fonksiyonları ve titreşim modunun karşılaştırılması....97
Şekil 3.22 1. titreşim modu için I_{II} indisinin düzeyle değişimi ve diğer indislerle karşılaştırılması....99
Şekil 3.23 Hasarlı ve sağlıklı halde 8.titreşim modu ve frekans spektrumları. 101
Şekil 3.24 Hasarlı kirişin 8. titreşim modu için korelasyon indislerinin ADD ayrışım düzeyi M ile değişimi 102
Şekil 3.25 8. Titreşim modu için I_{II} indisinin düzeyle değişimi ve diğer indislerle karşılaştırılması....104
Şekil 3.26 8.titreşim modunun eğriliği 104
Şekil 3.27 ADD'de farklı dalgacıklar kullanılması halinde I_{II} indisinin değişimi. 106
Şekil 3.28 Hasarlı kirişin 2. titreşim modu için I_I ve I_{III} indisleri....107
Şekil 3.29 Hasarlı kirişin 2.titreşim modu için korelasyon indislerinin ADD ayrışım düzeyi ile değişimi....108
Şekil 3.30 I_{II} indisinin uygun ayrışım düzeyi etrafındaki değişimi. 109
Şekil 3.31 Deneysel 1.titreşim modu için korelasyon indislerinin ADD ayrışım düzeyi ile değişimi....111
Şekil 3.32 Deneysel 1. titreşim modu ile hesaplanan hasar indisleri....113
Şekil 3.33 Hasarlı kesitlerde atalet momentleri....114
Şekil 3.34 Referans çalışmadaki SDD grafikleri. 114
Şekil 3.35 İki boyutlu bir yapıda ölçüm bölgesi. 116
Şekil 3.36 Serbest kenarlı plağın boyutları ve hasar yerleri. 118
Şekil 3.37 Sağlıklı ve %10 hasarlı halde plağın 7. titreşim modu. 119
Şekil 3.38 7. titreşim modunun sağlıklı ve hasarlı halde frekans spektrumları. 119
Şekil 3.39 Plağın 7.titreşim modunun 35.satırı için korelasyon indislerinin ADD ayrışım düzeyi ile değişimi....121
Şekil 3.40 Plağın 7. titreşim modunun satır verilerine ait hasar indisleri. 123
Şekil 3.41 SDD hesabında sym4 kullanılması halinde indislerin grafikleri. 124
Şekil 3.42 Plağın hasarlı ve hasarsız halde 10. titreşim modu....125
Şekil 3.43 10. titreşim modunun sütunları ile hesaplanan hasar indisleri 126
Şekil 3.44 Deneyde kullanılan plağın özellikleri. 127
Şekil 3.45 Plak askı noktaları. 127
Şekil 3.46 Hasarsız plağın FCF eğrileri. 129
Şekil 3.47 Hasarlı plağın FCF eğrileri. 130
Şekil 3.48 Düzlem plağın deneysel ve sayısal titreşim modları. 132
Şekil 3.49 Üçüncü mod şeklinin satırlarıyla hesaplanan hasar indisleri. 136
Şekil 3.50 Üçüncü mod şeklinin sütunlarıyla hesaplanan hasar indisleri. 138

Şekil 3.51 Dört kenarı ankastre mesnetli plak. 139
Şekil 3.52 Ankastre mesnetli plağın temel mod şekli ve bununla hesaplanan hasar indisleri 140
Şekil 3.53 Sayısal uygulamada dikkate alınan sac parça. 142
Şekil 3.54 Sac parçanın hasarlı ve sağlıklı haldeki 2. titreşim modu ve bunun satır verilerinin frekans spektrumları. 143
Şekil 3.55 2. Titreşim modu için I_I^y ve I_{III}^y grafikleri. (s=30 ölçeğinde sym6 dalgacığı ile hesaplanmışlardır) 144
Şekil 3.56 Mod verisinin ilk satırı için indislerin ADD ayrışım düzeyi M ile değişimi. 145
Şekil 3.57 Farklı düzeylerdeki yaklaşım fonksiyonları ile elde edilen I_{II}^y grafikleri. 146
Şekil 3.58 Hasarlı haldeki titreşim modu ve satır verilerinin spektrum grafikleri . 147
Şekil 3.59 Sac parçanın 4. titreşim modu ile hesaplanan hasar indisleri 149
Şekil 3.60 4. Mod verisinin spektum grafiği ve sym14 dalgacığının belli ölçeklerdeki merkez frekansları 149
Şekil 3.61 Deneyde kullanılan karmaşık şekilli sac parça. 151
Şekil 3.62 Parçanın araçtaki kullanım yerinin şematik gösterimi. 151
Şekil 3.63 Ölçüm alanı 152
Şekil 3.64 Sac parça üzerinden ölçülen bir ivme verisi. 153
Şekil 3.65 Hasarlı sac parçadan ölçülen 180 adet FCF eğrisi ve sanal kısımları. .. 155
Şekil 3.66 Sac parçanın hasarlı (M_h) ve sağlıklı (M_{hz}) halde ilk dokuz mod şekli ve aralarındaki korelasyonu gösteren MAC matrisi. 158
Şekil 3.67 Karmaşık şekilli sac parçanın deneysel mod şekilleri için hasar indisleri 162

SİMGELER DİZİNİ

c_k	-	Dalgacık filtre katsayıları
h	-	Kiriş kesit yüksekliği [m]
h_c	-	Kirişte hasarlı kesit yüksekliği [m]
k	-	Kesit şekil faktörü
s	-	SDD'de ölçek parametresi
x_c	-	Kirişte hasar yeri [m]
w	-	Kiriş kesit genişliği [m]
y	-	Sehim [m]
α	-	Lipschitz Üsteli
ρ	-	Yoğunluk [kgm^{-3}]
θ	-	Ölçek fonksiyonu
φ	-	Eğim açısı [radyan]
ψ	-	Dalgacık fonksiyonu
A_M	-	M düzeyindeki yaklaşım fonksiyonu
B_L	-	Sol uçtaki bozulmaların normu
B_R	-	Sağ uçtaki bozulmaların normu
E	-	Elastisite modülü [N/m^2]
E_A	-	Yaklaşım enerji oranı
G	-	Kayma modülü [N/m^2]
H	-	Hasar kaynaklı bileşenler
I_I	-	Hasarlı ve sağlıklı haldeki verilerin SDD katsayıları farkı
I_I^y, I_I^d	-	İki boyutlu yapıda mod matrisinin satır (y) ve sütunları (d) ile hesaplanan I_I verilerini içeren indisler
I_{II}	-	Hasarlı haldeki veri ve bundan ADD ile elde edilmiş yaklaşım fonksiyonunun SDD katsayıları farkı
I_{II}^y, I_{II}^d	-	İki boyutlu yapıda mod matrisinin satır (y) ve sütunları (d) ile hesaplanan I_{II} verilerini içeren indisler
I_{III}	-	Sadece hasarlı haldeki verinin SDD katsayıları
I_{III}^y, I_{III}^d	-	İki boyutlu yapıda mod matrisinin satır (y) ve sütunları (d) ile hesaplanan I_{III} verilerini içeren indisler
L	-	Kiriş uzunluğu [m]
M	-	ADD ayrışım düzeyi
M_h	-	Hasarlı haldeki titreşim modu
M_{hz}	-	Sağlıklı " " "
N_{VM}	-	Sıfıra eşit momentlerin sayısı
N_{cf}	-	Polinom uydurmada kullanılan veri noktalarının sayısı
N_e	-	Sonlu eleman sayısı
N_g	-	Genişletmedeki nokta sayısı
N_{sp}	-	Dalgacık fonksiyonunun genişliği
P_d	-	Genişletme polinomunun derecesi
$S_{m,n}$	-	ADD yaklaşım katsayısı
W	-	SDD dalgacık katsayısı
$W_{m,n}$	-	ADD ayrıntı katsayısı

GİRİŞ

Binalar, köprüler, boru hatları, imalat sistemleri vs mühendislik yapıları çevre ve işletme şartlarının etkisiyle zamanla yıpranırlar. Bu tür yapılarda erken hasar teşhisi (HT), başta emniyet olmak üzere, ekonomi ve kalite gibi kavramlarla yakından ilgilidir. Yapının sağlık durumu değerlendirilmez ve gerekli müdahaleler zamanında yapılmazsa önemli maddi zararlar, can kayıpları, ürün kalitesinde azalma gibi olumsuzluklar ortaya çıkabilir. Bu sebeple HT makine, inşaat, elektronik gibi farklı mühendislik dallarının ortak ilgi alanı olmuştur. Bu alanda yeni yöntemler geliştirme ve var olanları iyileştirme üzerinde çalışmalar devam etmektedir.

Hasar, genel anlamda, bir sistemin amacına yönelik çalışmasını olumsuz etkileyen her türlü değişimdir. Bu çalışmada, özel olarak, mukavemet kaybına sebep olan hasar türleri ile ilgilenilmektedir. İmalat hataları, işletme yükleri ve olumsuz çevresel şartlar yapının çeşitli yerlerinde çatlak, çentik, aşınma benzeri zayıflıklar ile mekanik bağlantılarda gevşeme türü değişimlere sebep olur. HT yöntemleri bu gibi etkilerin varlığını, yerini ve derecesini belirleme amacına hizmet ederler (Ngwangwa ve ark. 2006). Hasar sebebiyle yapının kalan ömrünü tayin etme ayrı bir konu olup, "ömür analizi" kapsamında ele alınır.

HT ya da daha genel anlamda yapısal sağlık kontrolü amacıyla kullanılan metotlar tahribatlı ve tahribatsız olarak ikiye ayrılır (Yiğit ve ark. 2008). Tahribatlı yöntemde, adından da anlaşılacağı üzere, test parçasına zarar vermek söz konusudur. Bu alanda, çekme, koparma, çentik-darbe testleri yanında tabaka kaldırarak kalıntı gerilmelerinin ölçülmesi, yorulma analizi gibi daha gelişmiş metotlar da bulunmaktadır. Test parçasına zarar vermeye ek olarak, elde edilen bulguların test numunesine mahsus olması, test için genellikle pahalı ve büyük laboratuara ihtiyaç duyulması tahribatlı testi kısıtlayan diğer unsurlardır. Buna karşılık, ölçülmek istenilen nicelikle ilgili kesin sayısal değer elde edilmesi en önemli üstünlüğüdür (Hellier 2003, p.1.19). Örneğin, koparma testinde numunenin kopma mukavemeti sayısal olarak belirlenir. Aynı geometri ve malzeme

özelliklerine sahip diğer parçaların kopma mukavemetinin bu civarda olduğu söylenebilir.

Yapıya zarar vermeden sağlık değerlendirmesi yapmak kuşkusuz daha önemlidir. Bu sebeple, tahribatsız test konusu üzerinde de fazlaca durulmuştur. Bu alanda kullanılan başlıca yaklaşımlar; görsel test, sıvı geçirgenlik testi, manyetik parçacık testi, radyografi, ultrasonik test, girdap (*eddy*) akım testi, termal kızılötesi test ve akustik emisyon testidir. Bunların ortak özelliği ve başlıca üstünlüğü test parçasına zarar vermemesidir. Bunun yanında, bazı yöntemlerle (radyografi, ultrasonik) –belli derinliğe kadar– malzeme içindeki süreksizliklerin yeri ve yönelimi de belirlenebilmektedir. Bazıları (görsel, ultrasonik test) yerinde (*in situ*) yani işletme anında sistemi durdurmadan veya parçayı bulunduğu ortamdan ayırmadan test imkânı verir. Yine bir kısmının (ultrasonik, girdap akım testi) taşınabilir test düzeneğine sahip olması maliyeti azaltan unsurlardandır (Hellier 2003). Test sırasında sağlıklı haldeki yapıya ait bir referans veriye ihtiyaç duyulmaması bu yöntemlerin başka bir üstünlüğüdür (Yan ve ark. 2007).

Yukarıdaki tahribatsız yöntemlerin önemli ve ortak bir yetersizliği "lokal" olmalarıdır (Doebling ve ark. 1996, Sampaio ve ark. 1999). Bunun anlamı, test sırasında yapının tamamı yerine belli bir kısmının dikkate alınmasıdır. Örneğin, bir basınçlı tankta kaynak dikişleri kritik bölgelerdir. Hasar büyük ihtimalle buralarda olacaktır. Dolayısıyla tüm yapı yerine öncelikle bu bölgeyi test etmek söz konusudur. Yapının tamamını kontrol etmek zaman alıcıdır. Ayrıca, karmaşık geometriler testi zorlaştırır. Bu sebeple, büyük ve karmaşık yapılarda bu yöntemleri uygulamak zordur (Yan ve ark. 2007). Söz konusu yetersizlikler araştırmacıları global özellikteki tahribatsız yöntemlere sevk etmiştir. Titreşim özelliklerindeki değişime dayalı yöntemler (veya daha kısa olarak titreşim temelli yöntemler) global özelliktedirler (Xia ve Hao 2003). "Titreşim özellikleri" ifadesi doğal frekanslar, sönüm oranları, doğal titreşim modları şeklindeki temel modal parametreleri belirtir. Bunlar kütle, katılık ve sönüm dağılımı olarak bilinen yapısal özelliklere bağlıdırlar. Hasar yapısal özellikleri etkiler, buna bağlı olarak modal parametreler değişir. Bu değişim doğal frekanslarda azalma, sönüm oranlarında artma ve titreşim modlarında lokal süreksizlikler şeklinde ortaya çıkar (Wang ve Deng

1999). Titreşim temelli HT yöntemleri bu değişimlerden yararlanarak hasar yeri ve derecesini belirleme amacıyla geliştirilmiştir. Bunlara global denmesinin sebebi hasar nerede olursa olsun modal parametrelerin bundan etkilenmesidir. Söz konusu yöntemler tüm yapıyı birden dikkate alarak hasar değerlendirmesi yaparlar.

Titreşim modları, diğer modal parametrelerden farklı olarak, hasar yeri ile ilgili bilgi de içerir. Örneğin mod şekli eğriliğinden yararlanılarak hasar yeri belirlenebilir (Alvandi ve Cremona 2006). Fakat ölçüm için kullanılan ekipmanın yetersizliği, olumsuz test ortamı ve ölçüm hataları gibi kanallarla titreşim modlarına bir miktar parazit karışır. Parazit hasar kaynaklı değişimleri algılamayı güçleştirir. Güncel çalışmalara bakıldığında, parazite rağmen hasar kaynaklı değişimleri tespit etmek üzere dalgacık dönüşümünden (DD, *wavelet transform*) yararlanıldığı görülmektedir (Gentile ve Messina 2003, Zhong and Oyadiji 2007). DD veri sıkıştırma, parazit ayıklama, tekillik algılama amaçları ile kullanılan bir sinyal işleme aracıdır. DD'nin bu özelliklerinden yararlanılarak çok sayıda HT yöntemi geliştirilmiştir. DD temelli HT uygulamalarında fazladanlık (*redundancy*) özelliğinden ötürü sürekli DD (SDD) daha çok tercih edilir (Gentile ve Messina 2003, Douka ve ark. 2003). Bu çalışmalarda genellikle iki yaklaşımın varlığı dikkat çekmektedir (Gökdağ ve Kopmaz 2009, Gökdağ 2010). Birincisinde sadece hasarlı yapı verisinin SDD katsayıları ile HT gerçekleştirilir. İkinci yaklaşımda sağlıklı haldeki verinin SDD katsayıları da hesaplanıp birincisinden çıkarılır. Birinci yöntemin üstün tarafı sağlıklı haldeki veri gibi bir referansa ihtiyaç duymamasıdır. Çünkü böyle bir veri her zaman her yapı için (özellikle eski olanlar için) mevcut olmayabilir. Hasar derecesi azaldığında ikinci yöntem daha avantajlı olur. Mevcut tezin konusu bu iki yöntemin üstünlüklerine sahip yeni bir yöntem geliştirme üzerinedir. Buna göre, sadece hasarlı yapı verisini kullanan fakat hasara duyarlılığı ikinci yaklaşımdaki kadar yüksek bir yöntem geliştirmek amaçlanmaktadır. *Bu yöntemin esası, ikinci yaklaşımdaki referans veriyi DD'nin çok-çözünürlüklü analiz ve veri sıkıştırma gibi özelliklerinden yararlanarak orijinal veriden elde etmek, şeklinde özetlenebilir*. Yöntemin uygulanabilirliği kiriş, plak gibi temel yapı elemanlarının sayısal ve deneysel titreşim modları ile test edilmiştir. Ayrıca, yapılan çalışmalardan farklı olarak, karmaşık şekilli bir sac parçanın titreşim modları ile HT konusu da ele alınmış, geliştirilen yöntemin performansı bu tür veri ile de değerlendirilmiştir.

Çalışma kapsamında kullanılan sayısal verinin üretilmesinde ANSYS (v.12) ve MATLAB (R2009b) programlarından yararlanılmıştır. Titreşim modlarını ölçmek üzere Brüel&Kjaer markalı iki kanallı bir titreşim ölçüm seti ve ölçülen veriden frekans cevabı fonksiyonu (FCF) elde etmek için PULSE v13.1 yazılımı kullanılmıştır.

1. KAYNAK ÖZETLERİ

Bu bölümde, tez konusunun diğer HT çalışmaları içindeki yerini izah etmek üzere, ilk olarak, titreşim temelli metotlar hakkında bilgi verilecektir. Ardından DD temelli HT çalışmaları konusunda yapılanlardan bahsedilecektir. Son olarak, yapılan çalışmalarla ilgili genel bir değerlendirme arz edilip tez çalışmasının içeriği özetlenecektir.

1.1. Titreşim Temelli HT Yöntemleri

Bu alanda yüzlerce çalışma yapılmıştır (Doebling ve ark. 1996). Bu sebeple, tüm çalışmalara değinmek yerine, yararlandıkları ortak prensipler açıklanıp bir iki temsilî örnek verilecektir.

İlk titreşim temelli yöntemlerde çoğunlukla **doğal frekanslar**daki değişimlerden yararlanılmıştır. Çünkü doğal frekanslar ölçülmesi kolay parametrelerdir. Hasarlı bölgede hasar sebebiyle ilave bir esneklik (*flexibility*) meydana gelir. Bu bir nevi yapının şekil değiştirme direncinin azalması demektir. Dolayısıyla doğal frekanslar azalır. Chondros ve Dimarogonas (1980) bu prensipten yararlanarak bir ucu ankastre kiriş için $\omega_n/\omega_{n0}=1/(1+\mu^2)$ şeklinde bir oran geliştirmiştir ($\mu^2=3EI/LK_T$, EI: kirişin eğilme katılığı, L: boy). Böylece, periyodik doğal frekans ölçümleri ile ankastre uçtaki kaynak bağlantısının mukavemeti izlenebilir. Kaynaktaki çatlak etkisi; kiriş ile mesnet arasında bağlı ve eğilmeden kaynaklanan dönmeye direnç gösteren bir yay ile temsil edilmiştir. K_T bu yay sabitini gösterir ve çatlaklı kesit yüksekliğinin normal yüksekliğe oranına bağlıdır. Önerilen yönteme göre, sağlıklı yapının ilk üç doğal frekansı ölçülüp kaydedilir (bunlar 0 alt indisli doğal frekanslardır). Daha sonra, periyodik ölçümlerle ilk üç doğal frekans ölçülür ve bu oranların değerleri takip edilir. Orandaki azalma hasar derecesi ile orantılı olduğundan kaynak bağında hasar olup olmadığı, varsa ne mertebede olduğu anlaşılabilir. Fakat bu yöntem enine doğrultudaki yüzeysel çatlak için geçerlidir. Malzeme içinde farklı yönelimde çatlak olması halinde uygulanamayacağı bildirilmiştir. Salawu (1997) bu sınıftaki diğer yöntemleri de ele alan geniş bir literatür

taramasına yer vermiş ve şu sonuçlara ulaşmıştır: Genel olarak doğal frekans temelli yöntemlerin uygulanması kolaydır. Fakat değişik zamanlarda ölçülen frekanslardaki farklılıklar ölçüm hatası, sıcaklık vs parametrelerden de kaynaklanabilir. Bu durumda, hasar oluştuğuna hükmedebilmek için en az %5 mertebesinde değişim olması gerekir (Salawu 1997). Bu ise doğal frekans değişimlerinden hasar olup olmadığını sağlıklı bir şekilde anlamak için hasarın ciddi boyutlara ulaşması gerektiğini ifade eder. Ayrıca, özellikle simetrik yapılarda, bir frekanstaki aynı değişim farklı hasar konumlarına karşılık gelebilir. Dolayısıyla, frekans değişimleriyle hasar yerini tek (*unique*) olarak belirlemek genellikle zordur (Yan ve ark. 2007).

Hasarın varlığını doğal frekanslardaki azalmalardan anlamak mümkün olsa da, bunun yerini tespit etmek için **titreşim modları**nı kullanmak gerekir (Yan ve ark 2007). Titreşim modlarının kullanıldığı bir çalışmada (Rizos ve Aspraghatos 1990) şöyle bir yöntem uygulanmıştır: Çatlaklı kirişin doğal frekanslarını veren analitik ifade (frekans eşitliği) çıkarılır. Sonra titreşim modları deneyle ölçülür. Burada şöyle bir prosedür takip edilmiştir: Kiriş ilgili doğal frekansına çok yakın bir frekansta bir sarsıcı ile tahrik edilerek her noktanın modal genliği ölçülür. Farklı iki noktaya ait modal genlik yukarıdaki frekans eşitliğinde yazılır. Frekans eşitliğinde bilinmeyen terimler hasar derinliği ve yeri olduğundan iki bilinmeyenli iki denklem çözülerek bunlar bulunur. Görüldüğü gibi metodu uygulamak basittir, fakat çatlaklı kirişin analitik modeline ihtiyaç duyulmaktadır. Başka bir yöntemde (Alvandi ve Cremona 2006) hasar sebebiyle mod şekli eğriliğindeki değişimden yararlanılmıştır. Bir kirişin sağlıklı ve hasarlı haldeki bir mod şekli biliniyor olsun. Bunun eğriliği ($y''(x)$) ve eğilme momenti ($M(x)$) arasındaki bağıntı ($y''(x)=M(x)/EI(x)$) hatırlanırsa hasarlı haldeki mod şeklinin eğriliğinde lokal değişimler oluşacağı anlaşılır. Hasarlı ve sağlıklı haldeki modların eğrilik farkı süreksizlik yerlerinde ani değişimler yapar. Bunlar takip edilerek hasar yeri belirlenebilir. Hasar derecesi ile de mod şeklinin eğriliğindeki değişim orantılıdır. Başka bir yaklaşım da modal şekil değiştirme enerjisi (E_y) ile geliştirilmiştir. Mod şekli eğriliğinden yararlanarak elemanın enerjisi $E_y = (1/2)\int_0^L EI(x)(y''(x))^2$ olarak yazılabilir (L: eleman boyu). Hasar olduğunda katılık kaybı meydana gelir, bu da şekil değiştirme enerjisinde azalmaya sebep olur. Yapının hasarlı ve sağlıklı haldeki mod şekilleri ve

eleman katılık matrisleri biliniyorsa E_y hesaplanabilir. Stubbs ve ark. (1995) bu yaklaşımla β_{ij} şeklinde bir indis geliştirmişlerdir. Bu indis yapının hasarlı ve sağlıklı haldeki i. mod şeklini ve bunlarla hesaplanmış E_y değerini kullanarak j. eleman için bir sayı verir. Bu sayı 1'den küçükse ilgili eleman hasarlıdır ve hasar derecesi sayının 1'den küçüklüğü ile orantılıdır. Genel olarak, titreşim modu ölçümünde ortaya çıkan hata frekans ölçümündeki hatadan daha fazladır. Buna rağmen, mod şekilleri frekanslara göre hasar hakkında daha fazla bilgi içerir (Yan ve ark. 2007). Ayrıca mod şekilleri sıcaklık vs ortam şartlarından daha az etkilenirler (Farrar ve James 1997).

Başka bir grup yöntem HT için **modal esneklik matrisi**nden yararlanır. Doğal frekans ve titreşim modları beraber kullanılarak esneklik matrisi $\mathbf{F}=\mathbf{\Phi}\mathbf{\Omega}^{-1}\mathbf{\Phi}^{T}=\sum_{i=1}^{n}\omega_i^{-2}\mathbf{\Phi}_i\mathbf{\Phi}_i^{T}$ şeklinde tanımlanır ($\mathbf{\Phi}$: yapının sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilmiş modal vektörlerini içeren matris, T: transpoz, $\mathbf{\Omega}$: köşegen elemanları ω_i^{-2} olan köşegen matris, ω_i : i. doğal frekans). Hasardan önceki ve sonraki esneklik matrisleri sırasıyla **F** ve **F*** olsun. Bunların farkı $\mathbf{\Delta}=\mathbf{F}^*-\mathbf{F}$ olup, **Δ'**nın j. sütunundaki en büyük eleman esneklik değişiminin en büyük olduğu serbestlik derecesine, yani hasar yerine karşılık gelir. Pandey ve Biswas (1994) esneklik matrisindeki değişimin farklı sınır şartlarında değişik tarzda meydana geldiğini göstermişlerdir. Esneklik matrisi incelendiğinde bunun ilk birkaç doğal frekans ve mod şekli ile yeterince hassas ölçülebileceği görülür. Çünkü mod indeksi arttıkça $1/\omega_i^2$ çarpanı küçülür ve yüksek mertebeden terimlerin katkısı hızla azalır. Fakat bu yaklaşım küçük hasar mertebeleri için uygun değildir (Yan ve ark. 2007).

Diğer bir yaklaşım **Frekans Cevabı Fonksiyonu (FCF) eğriliği**ne dayanmaktadır. Titreşim modları, en genel halde, FCF fonksiyonlarından birtakım parametre tahmin yöntemleri ile elde edilirler. Dolayısıyla, mod verisinin doğruluğu kullanılan yöntemin uygunluğuna bağlıdır. Fakat doğrudan FCF eğrileri kullanılarak hasar değerlendirmesi yapılabilirse parametre tahmin aşamasındaki hesap hatalarından kaçınılmış olunur. n serbestlik dereceli bir sistem için reseptans $\boldsymbol{\alpha}(\omega)=(-\omega^2\mathbf{M}+i\omega\mathbf{C}+\mathbf{K})^{-1}$ şeklinde tanımlıdır (**M**, **C** ve **K** sırasıyla kütle, sönüm ve

katılık matrisleri ve $i=\sqrt{-1}$'dir). Reseptans matrisinin bir elemanı $\alpha(\omega)_{m,n}$ olup, n. noktaya uygulanan kuvvet sebebi ile m. noktada meydana gelen deplasmanı ifade eder. Mod şeklindeki eğriliğe benzer tarzda FCF eğriliğindeki değişimler de hasarın yeri ve şiddeti hakkında bilgi verir (Sampaio ve ark. 1999). FCF eğriliği $\alpha''(\omega)_{m,n}=\left(\alpha(\omega)_{m+1,n}-2\alpha(\omega)_{m,n}+\alpha(\omega)_{m-1,n}\right)/h^2$ biçiminde merkezî sonlu farklarla ifade edilebilir. Buna göre, belirli frekans aralığında, hasarlı ve hasarsız yapıya ait eğrilikler arasındaki fark hesaplanarak hasar yeri ve derecesi belirlenebilir.

Yukarıdakilerin dışında matris güncelleme tekniğini temel alan çalışmalar da vardır. Yapının sonlu eleman modeli biliniyorsa, sağlıklı (u) ve hasarlı hal (d) için sırasıyla $\left(\lambda_u^2\mathbf{M}_u+\lambda_u\mathbf{C}_u+\mathbf{K}_u\right)\boldsymbol{\phi}_{i,u}=\mathbf{0}$, $\left(\lambda_d^2\mathbf{M}_d+\lambda_d\mathbf{C}_d+\mathbf{K}_d\right)\boldsymbol{\phi}_{i,d}=\mathbf{0}$ yazılabilir ($\boldsymbol{\phi}_i$: i. mod şekli). Buradan, hasar sebebi ile başlangıçtaki kütle, sönüm ve katılık matrislerinin $\mathbf{X}_d=\mathbf{X}_u-\Delta\mathbf{X}$ şeklinde değiştiği anlaşılmaktadır (burada $\mathbf{X}$ yerine $\mathbf{M}$, $\mathbf{K}$ ve $\mathbf{C}$ yazılır). Bunlar hasarlı haldeki eşitliğe yazılır, sağlıklı halde yapının kütle, katılık ve sönüm matrislerinin bilindiği varsayılırsa, hasarlı haldeki i. özdeğer ve mod şekli için $\left(\lambda_d^2\Delta\mathbf{M}+\lambda_d\Delta\mathbf{C}+\Delta\mathbf{K}\right)\boldsymbol{\phi}_{i,d}=\mathbf{E}_i$ yazılabilir. Burada $\mathbf{E}_i$ ifadesine "modal kuvvet hatası" denir. Bu hata bazen amaç fonksiyonu bazen de kısıt olarak kullanılır. Ayrıca, fark matrislerin simetrik olması veya matrislerin pozitif olması şartı kısıt olarak kullanılarak optimizasyon problemi çözülür ve hasarın hangi elemanda ne miktarda olduğu belirlenir (Doebling ve ark 1996).

Prensipleri yukarıda açıklanan titreşim temelli yöntemlerin genel yetersizlikleri özetle aşağıdaki gibidir (Doebling ve ark. 1996, Yan ve ark. 2007):

- Yapının geometrik ve fiziksel özelliklerinden bağımsız değildirler; belli yapılar ve özel kabuller altında uygun sonuç verirler.
- Genellikle sağlıklı yapı bilgisini de gerektirirler. Fakat her yapı için bu bilgi mevcut değildir.
- Pratikte ölçüme karışan parazitler sebebiyle yöntemlerin gerçek performansı sayısal uygulamalardaki kadar iyi olmamaktadır.

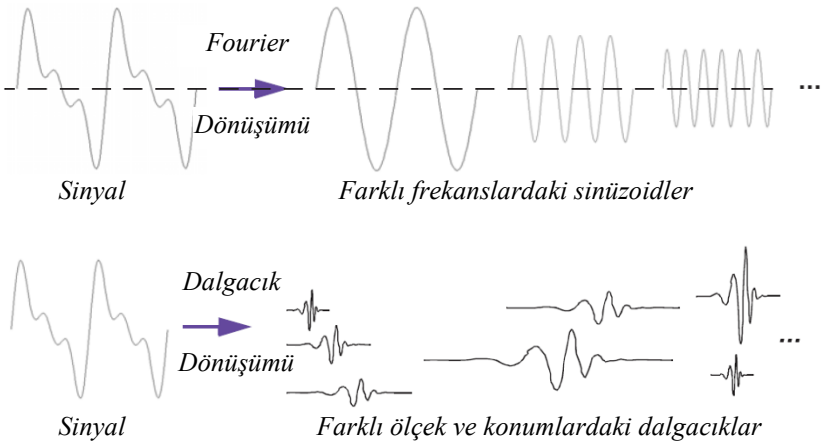
Yukarıdaki yöntemler klasik titreşim temelli metotlar olarak bilinmektedir. Genetik algoritma, yapay sinir ağları, DD gibi modern araçlar kullanılarak titreşim temelli yöntemlerin performansı arttırılmaya çalışılmış ve yeni yöntemler geliştirilmiştir. Bu şekilde modern titreşim temelli metotlar ortaya çıkmıştır (Yan ve ark. 2007). Genetik algoritma, optimizasyon problemlerinde global optimum noktanın bulunmasını sağlar. Bu yaklaşım, optimizasyon problemine dönüştürülebilen HT uygulamalarında kullanılır. Örneğin, Chou ve Ghaboussi (2001), geometrik ölçüleri bilinen bir kafes yapıda elemanların kesit ölçülerini bilinmeyen olarak seçip, hesaplanan ve ölçülen deplasmanlar arasındaki farkı minimize etme esasına dayalı bir optimizasyon problemi kurmuştur. Problemin çözümü ile hasarlı elemanların kesit ölçüleri belirlenmiştir. Yapay sinir ağları öğrenme ve hatırlayabilme özelliklerine sahip algoritmalardır. Sebep ve sonuç arasındaki ilişkinin karmaşık ve modellenmesi zor olduğu durumda kolaylık sağlar. Bir dizi giriş ve buna karşılık belli çıkış değerleri ile ağ "eğitilir". Eğitme işlemi ağdaki bir dizi ağırlık katsayısının optimizasyon süreci ile belirlenmesi demektir. Wu ve ark. (1992) üç katlı bir yapıya her hasar durumunda belli tahrikler uygulayıp ölçülen ivme verisinin frekans spektrumunu hesaplamışlardır. Çeşitli hasar durumlarındaki katılık değerleri giriş, bu haldeki spektrum bileşenleri de çıkış alınarak bir sinir ağı oluşturulmuştur. Böylece, belli deprem etkilerinde yapıda ne kadar hasar oluşacağı tahmin edilmiştir. DD, daha önce de ifade edildiği gibi, veri sıkıştırma, parazit ayıklama, tekillik (*singularity*) algılama gibi alanlarda kullanılan bir veri işleme aracıdır. DD'nin bu özelliklerinden yararlanan HT yöntemleri bir sonraki başlıkta ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

1.2. DD Temelli HT Yöntemleri

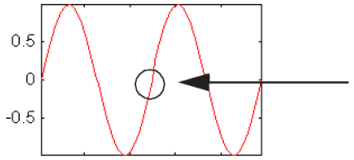
Ortaya çıkışı 19. yüzyılın başlarına kadar uzanmakla birlikte (Vidacovic 1999, p.xi) DD'nin teorisi ve uygulamada kullanılması ile ilgili önemli gelişmeler son 30 yılda olmuştur. 1982'de Fransız mühendis Jean Morlet sismik sinyallerin analizinde kullanmıştır (Debnath 2002, p.xi). Daubechies'in çalışması ile (Daubechies 1988) DD'nin sinyal işlemedeki uygulamalarında önemli bir artış görülmüştür. Tıpta

elektrokardiogram sinyallerinde süreksizlik tespiti amacıyla, resim işlemede parazit ayıklama ve veri sıkıştırma uygulamalarında kullanılmaktadır. Örneğin JPEG 2000 resim formatı biortogonal dalgacık filtreleri ile geliştirilmiştir. Ortogonal DD'de ölçek parametresi 2'nin kuvvetleri şeklinde değiştiğinden akustik sinyallerinin analizi için de uygun bir araçtır. Örneğin bir araçta kapının belli bir hızda kapatılması sırasında ortaya çıkan ses DD ile analiz edilerek aracın akustik özellikleri değerlendirilmiştir. DD parazit ayıklamada da kullanılmaktadır. Mesela bir kaynak robotunu belirlenen yörüngede hassas bir şekilde hareket ettirmek üzere konum sensöründen gelen verideki paraziti ayıklama amacıyla kullanılmıştır (Stark 2005). Williams ve Amaratunga (1994) iki boyutlu bir matrisin ortogonal DD ile bulunan birinci düzey yaklaşımına (bu matrisin boyutu başlangıçtakinin dörtte biri kadardır) ait özdeğerlerin başlangıçtaki matrisin özdeğerlerine çok yakın olduğunu göstermişlerdir. Bu da DD'nin veri sıkıştırma özelliği ile ilgili bir uygulamadır.

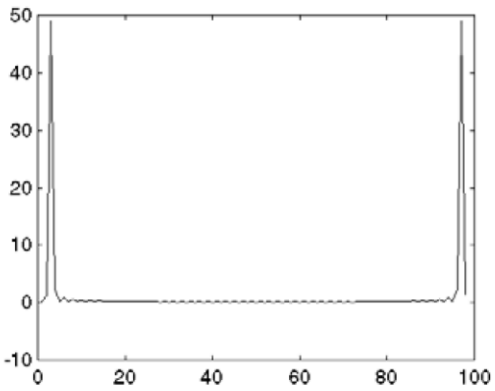
Fourier Dönüşümü (FD) istasyoner (özellikleri zamanla değişmeyen) sinyaller için uygun olup sinyalin frekans bileşimi hakkında bilgi verir. Sinyalde bazı anlarda önemli değişimler meydana gelse, bunların ne zaman ortaya çıktığını göstermede yetersizdir. Fakat DD bu iş için uygun bir araçtır (Arı ve ark. 2008 s.1). DD belirli matematiksel özelliklere sahip bir dalgacık (*wavelet*) ile sinyalin konvolüsyonudur. Bu şekilde hesaplanan katsayılara **dalgacık katsayıları** denir. FD'nin bazları olan sinüs ve kosinüs fonksiyonlarının aksine dalgacıklar sadece belirli bölgede sıfırdan farklı değerler alırlar; yani zaman ekseninde lokalizasyonları daha iyidir (Şekil 1.1 a)). Lokal değişime duyarlılık konusunda FD ve DD'nin karşılaştırılması Şekil 1.1b)'de gösterilmiştir. Belli bir noktasında çok küçük bir süreksizliğe sahip bir sinüs fonksiyonunun dönüşüm katsayıları incelendiğinde, FD'nin süreksizlik noktasına duyarsız olduğu görülmektedir. FD grafiğindeki pikler sadece sinyaldeki baskın frekansa (sinüs fonksiyonunun frekansına) karşılık geldiği halde DD grafiğinde süreksizlik noktasında dalgacık katsayılarının belirgin değişim arz ettiği görülmektedir. FD'de değişken frekans parametresidir, DD'de zaman (yatay eksen) ve ölçek (düşey eksen) parametreleridir. Yani tek boyutlu bir verinin DD katsayıları –birden fazla ölçekte hesaplama yapılması halinde– bir matristir.



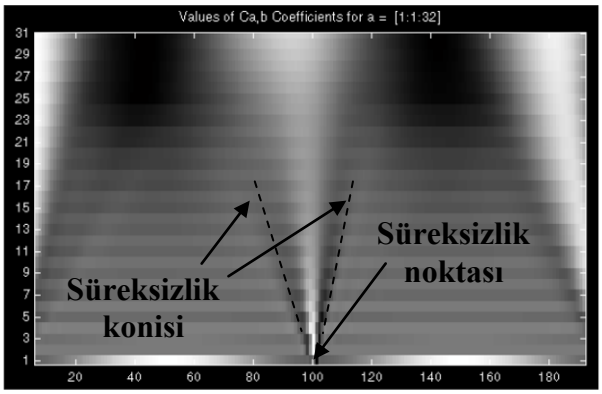
a)



Küçük bir süreksizliğe sahip sinüzoid

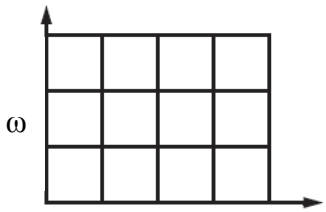


Fourier Katsayıları

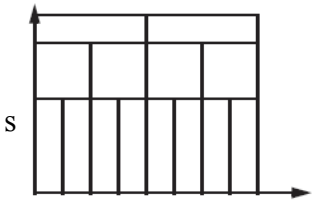


Dalgacık Katsayıları

b)



STFT (Gabor)



Dalgacık Analizi

ω: Frekans, s: Ölçek

c)

Şekil 1.1 FD ve DD'nin karşılaştırılması.

Kaynak: Misiti ve ark. 2007, p.1-11,12,15,16.

Ölçek parametresi frekansla ters orantılıdır; bu sayı arttıkça dalgacık zaman ekseninde genişler. Dolayısıyla DD grafiğinde süreksizlik konisi artan ölçekle genişler (Misiti ve ark. 2007, Mallat 1998, p.174). FD'nin anlık değişimleri açığa çıkarmadaki yetersizliğini gidermek üzere kısa süreli FD (*Short Time Fourier Transform,* STFT) geliştirilmiştir. Buna pencerelenmiş FD (*windowed Fourier Transform*) veya Gabor dönüşümü de denmektedir. Fakat bunda frekans ve zaman eksenlerindeki varyans sabittir. Başka bir deyişle, frekans-zaman düzlemindeki pencere genişliği değişmez. Hâlbuki DD'de zaman eksenindeki pencere genişliği yüksek frekanslarda (küçük ölçeklerde) daralmaktadır (Şekil 1.1c)). Başka bir deyişle, yüksek frekanslı bileşenleri daha iyi analiz etmek üzere zaman eksenindeki çözünürlük artmaktadır (Addison 2002, p.51).

DD temelli HT yöntemleri temelde DD'nin tekillik algılama özelliğinden yararlanırlar. Analiz edilen sinyalin türüne bağlı olarak bunları iki grupta toplamak mümkündür. Birincisinde yapı üzerindeki belli noktalardan ölçülen zamana bağlı verinin dalgacık katsayıları ile hasar değerlendirmesi yapılırken, ikinci grupta analiz edilen veri yapı geometrisine bağlı bir konum verisidir (örneğin titreşim modları, statik veya dinamik şekil değiştirme profilleri). Bunlar aşağıdaki iki başlıkta ele alınacaktır.

1.2.1. I. Grup DD Yöntemleri

Yapının bir noktasından zamana bağlı titreşim verisi ölçülsün. Hasar oluştuğunda bu veride anlık bir değişim olur, fakat bunu gözle ayırt etmek çoğu durumda zordur. En genel halde veriye parazit karışır. Dolayısıyla, verinin türevleri ile de süreksizlik yerini belirlemek zordur. Bu durumda DD'nin tekillik algılama özelliğinden yararlanılabilir. Hou ve ark. (2000) tek serbestlik dereceli bir kütle yay sistemini dikkate almış, elastikliği birden fazla paralel bağlı yayla temsil etmişlerdir. Hareket sırasında yaylardan biri koptuğunda ani bir katılık kaybı oluşur. Zamana bağlı yer değiştirme verisi ayrık DD (ADD) ile analiz edilerek kopma anı belirlenmiştir. Parazit etkisini araştırmak amacıyla zaman verisine MATLAB ortamında yapay beyaz gürültü eklenmiştir. Deneysel doğrulama için bir deprem sırasında hasar gören yapının çatı

katından ölçülen ivme verisi analiz edilmiş ve ADD ile hasar oluşum zamanı tespit edilmiştir. Bir fonksiyonun bir noktadaki lokal düzgünlüğü (türevlenebilmesi) matematikte Hölder (Lipschitz olarak da bilinir) üsteli ile (HÜ) ifade edilir. HÜ ile lokal dalgacık katsayıları arasında ilişki vardır (Mallat 1998, p.169). Robertson ve ark. (2003) bu ilişkiden yararlanarak, yapıdan alınan zaman verisinde belli frekanstaki bileşenlerin aniden ortaya çıkma veya güçlenme anlarını tespit etmişler ve bunların farklı türdeki hasarlarla ilişkili olabileceğini göstermişlerdir. Başka bir çalışmada (Li ve ark. 2007) yapıdan ölçülen zaman verisi EMD (*empric mode decomposition*) ve ADD'nin beraber kullanılması temeline dayanan bir yöntemle analiz edilerek hasar anı tespit dilmiştir. Bu yaklaşımın sadece ADD katsayılarını kullanan yaklaşıma göre daha iyi olduğu gösterilmiştir. Deprem sırasında bir binadan kaydedilen ivme verisi de analiz edilerek yöntemin pratikte uygulanabilirliği gösterilmiştir.

Hasar oluşum anını belirlemek için öne sürülen yaklaşım rulmanlı yatak ve dişli kutularında yorulma çatlakları, aşınma vs kusurların algılanması için de uygulanmıştır (Wang ve McFadden 1995, Mori ve ark. 1996). Buradaki temel prensip şöyledir: Hasar oluştuğunda, hasarlı bölgeyle temas sırasında çarpma sebebiyle çok küçük puls benzeri kuvvetler oluşur. Bunlar yatak civarından ölçülen ivme verisinde lokal süreksizliklere sebep olur. Bu süreksizlikler DD ile tespit edilerek hasar oluşum anı belirlenebilir ve bunun zamanla gelişimi takip edilebilir. Bu çalışmaların ilkinde SDD ve ADD karşılaştırılmıştır. SDD ile yüksek çözünürlüklü katsayılar elde edilmesi hasar etkisini belirlemeyi kolaylaştırmakla birlikte işlem zamanı fazladır. ADD halinde ortogonal dönüşüm söz konusu olduğundan daha az katsayı hesaplanmakta fakat katsayıların çözünürlüğü daha az olmaktadır.

Bu gruptaki başka bir uygulamada, ölçülen zaman verileri dalgacık paketi dönüşümü (DPD) ile analiz edilerek hasar değerlendirmesi yapılmıştır. Yan ve Yam (2002) bir kompozit plağa beş piezoelektrik eleman (PZT) (bunların biri tahrik, diğer dördü tahrik cevabını ölçmek için kullanılmıştır) bağlamıştır. Eyleyici (*actuator*) görevi gören PZT ardışık darbe tipi gerilim sinyaliyle uyarılır, diğer dört PZT'den ölçülen cevap verileri DPD ile analiz edilerek bileşen enerjileri bulunur. Bunlar incelendiğinde

hasarsız hale göre bazı bileşen enerjilerinin çok değiştiği (hasar bazı bileşenleri kuvvetlendirirken bazılarını da zayıflatmaktadır) görülmüştür. Bu değişimden yararlanarak hasar teşhisi yapılmıştır. Metodun sağlıklı hale ait bilgi gerektirmesi bir dezavantajdır. Benzer bir çalışmada Yam ve ark. (2003) yapay sinir ağları yaklaşımı ile başka bir HT yöntemi ortaya koymuştur. Bunda da yine hasarsız yapı bilgisine ihtiyaç vardır. Ayrıca, yöntemin küçük hasarlara yeterince duyarlı olmadığı belirtilmiştir.

Diğer bir HT yaklaşımı da şu şekildedir: Plak gibi düz bir yapı düzleme dik doğrultuda titreştirildiğinde plak kalınlığı doğrultusunda titreşerek plak düzlemi içinde ilerleyen *Lamb* dalgaları oluşur. Bunların ilerleme hızı plak kalınlığı ve titreşim frekansının çarpımına bağlı olup, kalınlık değişimine oldukça duyarlıdırlar. Çatlak benzeri süreksizlikte dalga enerjisinin bir kısmı geri yansıyana, bir kısmı da çatlaktan sonra ilerleyene iletilir. Ma ve Fu (2004) bir PZT eyleyici ile oluşturdukları plak dalgalarını diğer PZT'lerden ölçerek SDD ile analiz etmiş, ilerleyen ve yansıyan dalgaların sensörlere ulaşma zamanından hasar yerini belirlemiştir. Zumpano ve Meo (2007) yöntemi kompozit plaklara uygulamışlardır. Benzer bir çalışmayı Li ve ark. (2006) çatlaklı kiriş için yapmıştır. Eğilme dalgaları kiriş üzerine belli yükseklikten serbest bırakılan bir bilyenin çarpması ile elde edilmiştir.

Bir başka çalışmada Zhu ve Law (2006) hareketli yük altındaki bir köprüden ölçülen zaman verisinin SDD katsayıları ile hasar yeri ve derecesini belirlemişlerdir. Sabit hızla ilerleyen hareketli yük hasar yerinden geçtiğinde sehim sinyalinde anlık bir değişim olur. Sinyalin SDD katsayıları bu değişime duyarlıdır. Söz konusu çalışma, bu tez yazarının araştırmalarına göre, türünün tek örneği niteliğindedir.

1.2.2. II. Grup DD Yöntemleri

Bu gruptaki yöntemler yapının titreşim modları, statik yük altındaki şekil değiştirme profilleri, serbest titreşim sırasında ya da dinamik yük altında herhangi bir anda aldığı şekil gibi konum verilerini DD ile analiz ederek hasar değerlendirmesi

yaparlar. Hasar yerinde bu verilerin türevlerinde lokal süreksizlikler oluşur. Örneğin, çatlak olan yerde eğilme mod şekillerinde eğim süreksizliği görülür (Chang ve Chen 2003). Çentik şeklinde bir hasar eğrilik süreksizliğine yol açar (Hong ve ark. 2002). DD katsayılarının bu tür süreksizliklere duyarlı olmasından yararlanılmıştır.

Konuyla ilgili ilk çalışmada basit mesnetli, çatlaklı bir kirişin eğilme titreşim modları analitik olarak elde edilmiştir. Bunlarla belli başlangıç şartları altında serbest titreşim yapan kirişin bir t anındaki deplasman profili bulunmuştur. Bunun ADD ile analizinden hasar yeri tespit edilmiştir (Liew ve Wang 1998). Başka bir çalışmada (Wang ve Deng 1999), ayrıca, kirişin statik yük altındaki şekli ve düzlem gerilmeye maruz bir plağın hasar bölgesinde belli bir doğrultudaki deplasman profili SDD ile işlenerek HT yapılmıştır. Çalışmada Haar ve Gabor dalgacıkları karşılaştırılmış, zaman-frekans çözünürlüğünün daha iyi olması sebebiyle Gabor dalgacıklarının iyi sonuç verdiği belirtilmiştir. Bu tür çalışmalarda modellemede genellikle yüzeysel çatlak dikkate alınır. Fakat Quek ve ark. (2001) çatlağın kiriş içinde ve kiriş eksenine göre yönelimli olduğu en genel durumu da göz önüne almıştır. Bu halde, çatlağın eksen üzerindeki izdüşüm bölgesinde dalgacık katsayılarının ani pikler yaptığı gözlenmiştir.

Okafor ve Dutta (2000) hasarlı kirişin titreşim modlarını ADD ile yaklaşım ve ayrıntı fonksiyonlarına ayırmışlar, belli düzeydeki (sayısal titreşim modu için 6, deneysel mod şekli için 4. düzeydeki) ayrıntı fonksiyonlarının SDD katsayıları ile HT yapmışlardır. Yüksek indisli titreşim modlarının hasara daha duyarlı olduğu bildirilmiştir.

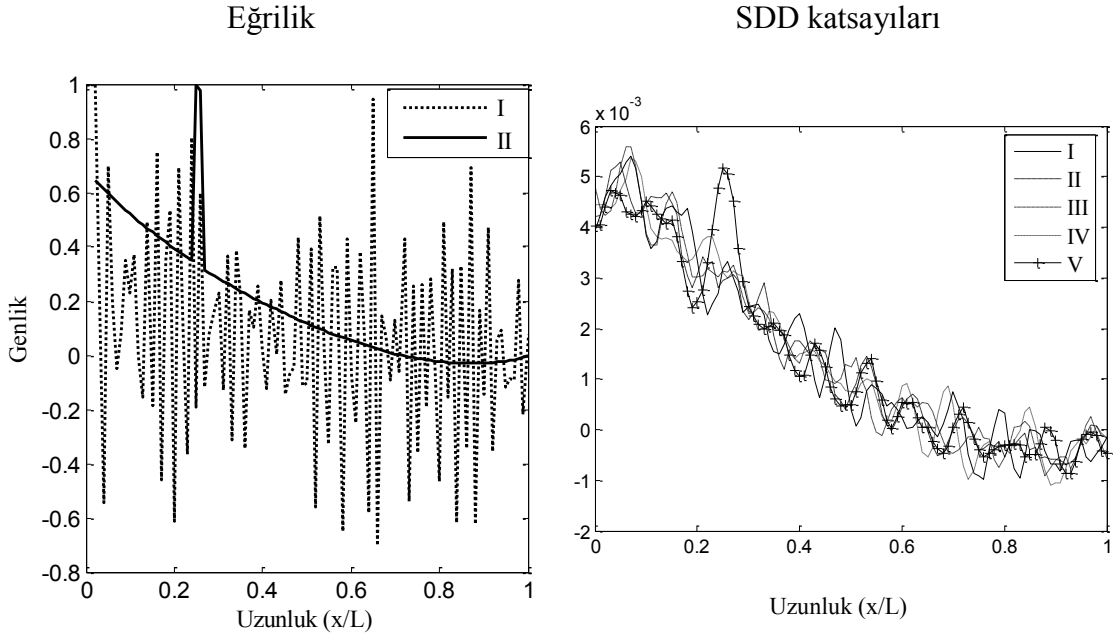
Lu ve Hsu (2002) DD'nin süreksizlik algılama özelliğinin HT amacıyla kullanılabileceğini, bu hususta önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermek amacıyla şu çalışmayı yapmıştır: Eğilme direnci olmayan sicim şeklinde bir yapı üzerinde belli konumlara ayrık kütle ve yay elemanları bağlayıp bu halde titreşim modlarını elde etmişlerdir. Ayrık elemanlar hasar kaynaklı lokal değişimleri oluşturmak amacıyla sicime bağlanmıştır. Titreşim modlarının belli düzeylerde ADD katsayılarını elde etmişlerdir. Ayrık elemanların olmadığı durumdaki (yani hasarsız haldeki)

katsayılarla kıyaslandığında eklenti bölgelerindeki katsayıların önemli genliklere sahip olduğu görülmüştür. Analizlerde Meksikalı şapkası (*Mexican Hat*) biçimindeki dalgacık kullanılmıştır.

Yukarıdaki ve benzeri çalışmalarda DD'nin lokal hasar tespitinde ne kadar etkili olduğu vurgulanmış ama bunun teorik gerekçeleri yeterince izah edilmemiştir. Bu konuda ilk çalışma Hong ve ark. (2002) tarafından yapılmıştır. Hasar bölgesindeki Lipschitz üsteli (LÜ) ile dalgacık katsayıları arasında $|W_f(x,s)| \leq As^{\alpha+0.5}$ ($W_f(x,s)$: f ile gösterilen mod şeklinin x noktasında (hasar yerinde) s ölçeğindeki SDD katsayısı, α: LÜ, A: bir sabit) şeklinde bir ilişki olduğu gösterilmiştir. Ayrıca, veriye eklenen parazit arttıkça bu üstelin azaldığı, çünkü veri tekilliğinin (*singularity*) arttığı belirtilmiştir. Öte yandan, veri daha büyük aralıklarla örneklendiğinde LÜ'nün arttığı gözlenmiştir. Konuyla ilgili diğer bir çalışmada (Douka ve ark. 2003) veriye karışan beyaz gürültü formundaki parazitin negatif üstele sahip olduğu belirtilmiştir. Küçük ölçeklerde parazit kaynaklı dalgacık katsayılarının daha büyük olduğu, dolayısıyla hasar etkisini sağlıklı bir şekilde tespit etmek için daha yüksek ölçeklerdeki katsayıların incelenmesi gerektiği belirtilmiştir. Diğer taraftan, farklı konumlarda bulunan aynı derinlikteki çatlakların dalgacık katsayıları aynı olmaz. Fakat yazarlar başka bir çalışmada (Loutridis ve ark. 2004) yine HÜ'den yararlanarak, farklı konumlardaki aynı derinlikteki çatlakları aynı sayıyla gösteren bir yoğunluk faktörü geliştirmişlerdir. Benzer bir çalışmayı karşılıklı iki kenarı birleştirecek kadar uzun çatlak içeren plak için de yapmışlardır (Douka ve ark. 2004). Farklı konumlarda aynı derinlikteki çatlakları aynı sayılarla gösterme konusunda bir yöntem de Chang ve Chen (2005) tarafından geliştirilmiştir. Öncelikle titreşim modları ölçülüp dalgacık katsayıları ile hasar yerleri tespit edilmiştir. Ölçülen doğal frekanslar ve belirlenen hasar koordinatları çatlaklı kirişin karakteristik determinantında yazılarak, bilinmeyen çatlak derinlikleri bulunmuştur.

Gentile ve Messina (2003) DD'nin parazite rağmen hasar kaynaklı tekilliği açığa çıkardığını göstermişlerdir. Verinin türevleri ile karşılaştırıldığında SDD katsayılarının hasara daha duyarlı olduğu bildirilmiştir. Konuyla ilgili bir uygulamada (Gökdağ ve Kopmaz 2008) açık kesitli bir kirişin temel mod şeklinin SDD katsayıları ve mod şekli

eğriliği karşılaştırmıştır (Şekil 1.2). Çalışmada hasar elastisite modülünde azalma olarak modellenmiştir. Aynı hasar derecesi ve parazit miktarı için soldaki I eğrisi ile sağdaki V eğrisi karşılaştırıldığında eğriliğin hasara duyarlı olmadığı görülmektedir. Hâlbuki SDD katsayıları hasar konumunda (x=0.25L) belirgin bir değişim yapmaktadır. Eğrilik ancak parazitsiz halde hasar etkisini göstermektedir. Başka bir çalışmada (Chang ve Chen 2003) çatlak içeren bir Timoshenko kirişinin analitik titreşim modları sinüs formundaki parazitle kirletilmiştir. DD'den önce kayar ortalama (*moving average*) yöntemiyle parazit azaltma işlemi yapılmıştır. Dalgacık katsayıları hem hasara hem de parazite duyarlı olduğundan, katsayı grafiklerinde parazit etkisini azaltmak için bu yola başvurmuşlardır. Yazarlar bu yaklaşımı dönen kirişlerin titreşim modlarına da uygulamışlardır (Chang ve Chen 2004).



Şekil 1.2 Bir mod şekli için eğrilik ve SDD katsayılarının karşılaştırılması. Soldaki şekilde I: Parazit var, II: Parazit yok iken eğriliğin değişimi. Aynı parazitli veri için sağdaki şekilde I: Hasar yok, diğer durumlarda Elastisite modülünde II: %20, III: %40, IV: %60, V:%80 azalma halinde s=7 ölçeğindeki SDD katsayıları.
Kaynak: Gökdağ ve Kopmaz (2008)

Ovanesova ve Suarez (2004) DD temelli HT'nin kirişlerden başka düzlem çerçeve türü yapılar için de uygulanabileceğini göstermişlerdir. Bu çalışmada, özel olarak, HT amacıyla uygun dalgacık seçimi konusunda ayrıntılı bilgiler verilmiştir. Özetle;

simetrik, ortogonal (eğer ADD kullanılacaksa) ve sıfıra eşit momentlerinin sayısı (*number of vanishing moments*), N_{VM}, yüksek dalgacıkların (örneğin bior6.8 dalgacığı) iyi performans gösterdiği ifade edilmiştir.

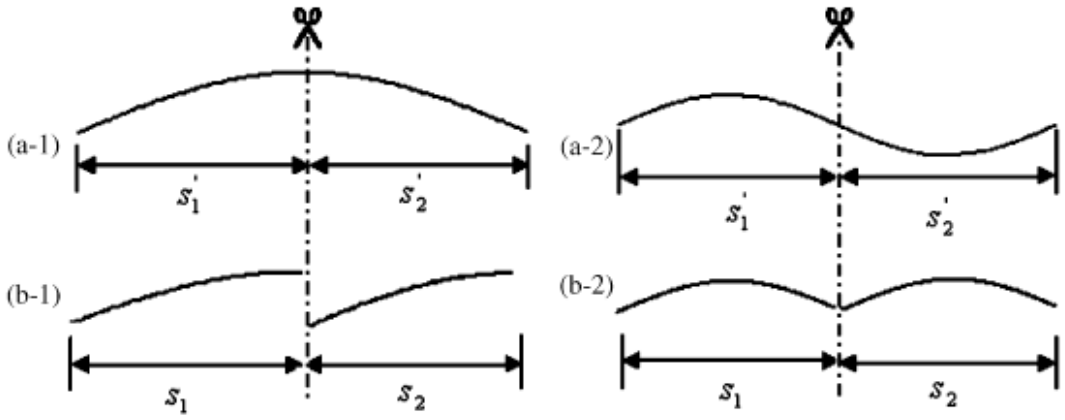
Rucka ve Wilde (2006a) bir kirişin statik yük altındaki deplasman profilini SDD ile analiz ederek hasar değerlendirmesi yapmışlardır. Kiriş yan tarafında eşit aralıklı renkli noktalar işaretlenmiş, sonra kirişin yük altındaki resmi Sony DSC-F707 markalı dijital fotoğraf makinesi ile çekilmiş ve görüntü işleme teknikleri ile deplasman profili çıkarılmıştır. Bunun SDD katsayıları ile HT gerçekleştirilmiştir. SDD için N_{VM} değeri 4 olan dalgacıklar kullanılmıştır. Sınırlardaki bozulmayı (*boundary distortion*) azaltmak için kübik spline ekstrapolasyonu ile genişletme uygulanmıştır. Yazarlar benzer bir çalışmayı titreşim modları ile de gerçekleştirmişlerdir (Rucka ve Wilde 2006b). Bu çalışmada, ayrıca, ankastre mesnetli bir plağın temel mod şeklinin yatay ve düşey doğrultudaki SDD katsayıları ile bir hasar indisi tanımlamıştır.

DD ile HT eksenel titreşimler yapan çubuk yapıların anlık şekil değiştirme profillerine de uygulanmıştır. Castro ve ark. (2006a) s=2 ölçeğindeki SDD katsayılarını kullanmışlar, sınırlardaki bozulmayı azaltmak için hasarlı haldeki katsayıları sağlıklı haldeki dalgacık katsayılarından çıkarmışlardır (hasar lokal bir etki olduğundan çıkarma sırasında hasar yeri hariç diğer bölgelerdeki fark sıfır veya sıfıra çok yakın olur). Zorlayıcı kuvvet frekansı yüksek olduğunda elde edilen profillerin hasara daha duyarlı olduğu ifade edilmiştir. Veriye parazit karışması halinde zorlayıcı kuvvet frekansının rezonans frekansına yakınlığının parazitli veriden iyi sonuç alma noktasında etkili olduğu bildirilmiştir. Başka bir çalışmada yazarlar (Castro ve ark. 2006b) eksenel titreşim modlarını kullanmışlardır. Hasar etkisi lokal katılık ve lokal kütle kaybı şeklinde ayrı ayrı incelenmiş ve her iki halde de yüksek indisli modların hasara daha duyarlı olduğu gösterilmiştir. Ayrıca, daha yüksek ölçeklerde parazit etkisinin nispeten az olduğu belirtilmiştir.

Poudel ve ark. (2007) sağlıklı ve hasarlı titreşim modları farkından yararlanarak HT üzerinde çalışmışlardır. Önerilen yönteme göre, öncelikle titreşim modları çok

yüksek çözünürlükte ölçülür. Çalışmada bu iş için sensör çözünürlüğü 1280x1024psi, frekans aralığı 100-2000 frame/s olan bir dijital kamera kullanılmıştır. Sonra fark fonksiyonu bulunup bunun frekans spektrumu incelenir. Hasar spektrum grafiğindeki piklerin sayısını ve yerleşimini etkilemektedir. Bu pikleri içine alan aralık belirlenir. Burada parazitleri ayıklamak ve HT açısından işe yaramayan bileşenleri dikkate almamak amaçlanmaktadır. Daha sonra, bir dalgacık için ölçek-frekans arasındaki ilişkiden yararlanarak, hesaplanacak SDD katsayılarının alt ve üst ölçek aralığı belirlenir. Hesaplamalarda kompleks Gauss2 dalgacığı önerilmiştir. Bu halde hasar yerinde SDD katsayılarının modülü ölçek boyunca belirgin bir değişim yapar, faz açısı da işaret değiştirir. Zhong ve Oyadiji (2007) simetrik sınır şartlarına sahip kirişler için istasyoner DD temelli bir yöntem geliştirmiştir. Bu çalışmada istasyoner DD'nin ADD'den daha fazla çözünürlüğe sahip katsayılar üretmesi ve bu katsayıların verinin konum ekseninde kaydırılmasından etkilenmemesi özelliklerinden yararlanılmıştır. Tek indisli titreşim modları kiriş orta noktasına göre simetrik, çift indisli olanlar da asimetriktir (Şekil 1.3)). Bu parçalardan birinde hasar olduğunda diğer yarıdaki kısım referans olarak kullanılır ve her iki parçanın dalgacık katsayıları birbirinden çıkarılarak HT yapılabilir. Bu yaklaşımın özellikle hasar derecesi küçük olduğunda daha iyi olduğu belirtilmiştir. Yazarlar yine istasyoner DD'yi kullanarak başka bir çalışma daha yapmıştır (Zhong ve Oyadiji 2008). Burada analiz edilen veri, üzerinde kütle bulunan kirişin bir doğal frekansının kütlenin konumu ile değişim eğrisidir. Bu eğrinin DD katsayılarının mod şekli katsayılarına göre hasara daha duyarlı olduğu ifade edilmiştir.

Messina (2008) HT'yi zorlaştıran sınır bozulması (*boundary distortion*) problemine çözüm olacak üç metottan bahsetmektedir. Bunların ilk ikisi veriyi simetrik ve asimetrik genişletme, üçüncüsü "*self-minimization*" adında optimizasyon temelli bir yöntemdir. Simetrik genişletmenin ankastre uçta kısmen iyi olduğu, fakat basit ve serbest mesnet halinde yetersiz olduğu belirtilmiştir. Asimetrik genişletme en iyi sonucu basit mesnet halinde vermektedir. Serbest uç halinde kısmen iyi, ankastre uç için uygun değildir. Optimizasyon temelli yöntem ise sınır şartından bağımsızdır, her durumda uygulanabilir. Fakat işlem süresi diğer ikisine göre fazladır.



Şekil 1.3 Simetrik (a-1) ve asimetrik (a-2) titreşim modlarının HT için düzenlenmesi.
Kaynak: Zhong ve Oyadiji (2007), p 2307.

Plak türü iki boyutlu parçalarla HT için iki boyutlu DD de kullanılmıştır. Loutridis ve ark. (2005) çatlaklı bir plağın analitik titreşim modlarını iki boyutlu ADD ile işleyerek hasar değerlendirmesi yapmışlardır. Analizde birinci düzey yatay ayrıntı katsayıları matrisi kullanılmıştır. Konumsal çözünürlüğü korumak amacıyla ADD işlemine mahsus seyreltme (*downsampling*) işlemi yapılmamıştır. Sınırlardaki bozulmayı azaltmak üzere peryodik genişletme yapılmış, sym6 dalgacığı kullanılmıştır. Kim ve ark. (2006) düzlem plağın sağlıklı ve hasarlı haldeki eğrilik oranından yararlanarak bir indis tanımlamıştır: $\beta = \nabla^2 w^* / \nabla^2 w$, (∇^2 : Laplace operatörü, w: sehim fonksiyonu, *: hasarlı hal). Bu oranın sağlıklı yerlerde 1, hasar yerinde 1'den büyük olması beklenir. Paydanın sıfır olduğu konumlarda hesaplama problemleri ortaya çıkar. Bunu aşmak için Haar dalgacığı kullanılarak pay ve paydanın iki boyutlu ADD açılımı kullanılmıştır. Fan ve Qiao (2009) iki boyutlu SDD ile bir plakta HT uygulaması yapmıştır. Dergauss2d adlı iki boyutlu bir Gauss dalgacığı kullanılmıştır. Bu dalgacık ailesinden N_{VM}'si 2 olanların HT için yeterli olduğu belirtilmiştir. Daha yüksek N_{VM} halinde mod verisindeki yüksek frekanslı bileşenlerin güçlendiği, sınırlardaki süreksizlikten kaynaklanan sivriliklerin fazlalaştığı ifade edilmiştir. DD katsayıları ile HT'nin diğer iki yöntemden (*gapped smoothing method*-GSM, *strain energy method*-SEM) daha üstün olduğu gösterilmiştir.

1.3. Tez Çalışmasının İçeriği

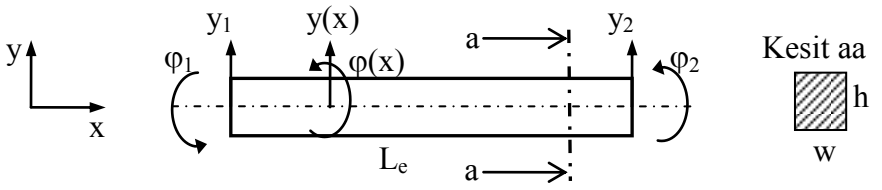
DD temelli HT çalışmaları incelendiğinde genellikle iki yaklaşımın kullanıldığı görülmektedir. Birincisinde sadece hasarlı yapı verisinin DD katsayıları, ikincisinde sağlıklı ve hasarlı yapı verilerinin DD katsayıları farkı HT amacıyla kullanılmaktadır. Referans veriye ihtiyaç duymadan, sadece hasarlı hale ait veriyi kullanmak daha fazla tercih edildiğinden, birinci yaklaşımı kullanan çalışmaların sayıca fazla olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, ikinci yaklaşımın sınır bozulma problemini azaltmak (Castro ve ark. 2006a,b), hasar derecesi az olduğunda duyarlılığı yüksek katsayılar elde etmek (Zhong ve Oyadiji 2007) gibi üstünlükleri vardır. Tez çalışmasında, bu iki yaklaşımın avantajlarına sahip üçüncü bir yöntem geliştirme üzerinde çalışılmıştır. Yapılan çalışmalar incelendiğinde, daha çok kiriş, plak gibi basit parçaların dikkate alındığı görülmektedir. Tez çalışmasında yukarıdaki üç yöntemin karmaşık şekilli sac parçanın titreşim modlarına uygulanabilirliği de araştırılmıştır. Üç yönteme ait hasar indislerinin performansı hem sayısal hem de deneysel titreşim modları ile test edilmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, ilk olarak, sonraki analizlerde kullanmak amacıyla, hasarlı kirişin titreşim modlarının elde edilişinden bahsedilecektir. Daha sonra, DD'nin teorisinden gerektiği kadar bahsedilecek ve geliştirilen yöntemin ayrıntıları verilecektir. Son olarak, yapılan deneylerin içeriği ve dayandığı teorik temeller arz edilecektir.

2.1. Titreşim Modları

Hasar yapıda lokal süreksizliğe sebep olur. Kolaylık açısından bu bir çentik olarak düşünülebilir. Hasarlı kirişin sönümsüz halde serbest titreşim modlarını bulmak için kiriş sonlu sayıda elemana bölünüp ilgili eleman(lar)ın kesit yüksekliğinde azaltma yapılarak hasar etkisi oluşturulabilir. Buna göre, boyu L, kesit ölçüleri w (genişlik) ve h (yükseklik), malzeme özellikleri homojen olan bir kiriş N_e sayıda elemana bölünmüş olsun. Bu durumda bir elemanın uzunluğu $L_e=L/N_e$'dir. Elemanın düğüm noktalarındaki öteleme ve eğilme sebebiyle dönme bileşenleri sırasıyla y_i ve φ_i (i=1,2) olsun (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 Bir kiriş elemanının düğüm noktalarındaki şekil değiştirme bileşenleri.

Timoshenko modeli dikkate alınıp y(x) ve φ(x) ikinci ve birinci dereceden polinomlar olarak kabul edilebilir: $y(x)=c_1x^2+c_2x+c_3$, $\varphi(x)=d_1x+d_2$. x=0 ve $x=L_e$ uçlarında $y(0)=y_1$, $y(L_e)=y_2$, $\varphi(0)=\varphi_1$, $\varphi(L_e)=\varphi_2$ şartlarına ek olarak kayma açısının (

$dy(x)/dx - \varphi(x))$ x'den bağımsız olma şartı (Gören ve Erim 2000) kullanılırsa c ve d katsayıları düğüm noktalarındaki bileşenler cinsinden yazılabilir. Sonlu elemanlar yönteminin bilinen adımları (Meirovitch 1986, p.300) takip edilerek eleman kütle ($\mathbf{m_e}$) ve katılık ($\mathbf{k_e}$) matrisleri aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\mathbf{m_e} = \rho A \int_0^{L_e} \mathbf{L}\mathbf{L}^T dx + \rho I \int_0^{L_e} \mathbf{S}\mathbf{S}^T dx, \quad \mathbf{k_e} = EI \int_0^{L_e} \mathbf{S'}\mathbf{S'}^T dx + kGA\mathbf{V}\mathbf{V}^T \tag{2.1}$$

Burada

$$\mathbf{L} = \left[\left(1 - \frac{x}{L_e}\right) \quad \left(\frac{x}{2} - \frac{x^2}{2L_e}\right) \quad \frac{x}{L_e} \quad \left(\frac{x^2}{2L_e} - \frac{x}{2}\right) \right]^T, \quad \mathbf{S} = \left[0 \quad \left(1 - \frac{x}{L_e}\right) \quad 0 \quad \frac{x}{L_e} \right]^T$$

$$\mathbf{S'} = d\mathbf{S}/dx, \quad \mathbf{V} = \left[\frac{-1}{L_e} \quad \frac{-1}{2} \quad \frac{1}{L_e} \quad \frac{1}{2} \right]^T, \quad \text{T: Transpoz}$$

olarak tanımlıdır. Ayrıca, ρ malzeme yoğunluğu [kg/m^3], A kesit alanı [m^2], I alan atalet momenti [m^4], E elastisite modülü [N/m^2], G kayma modülü [N/m^2], k kesit şekil faktörüdür. N_e sayıda kütle ve katılık matrisleri birleştirilerek, kirişe ait özdeğer eşitliği aşağıdaki gibi oluşturulur:

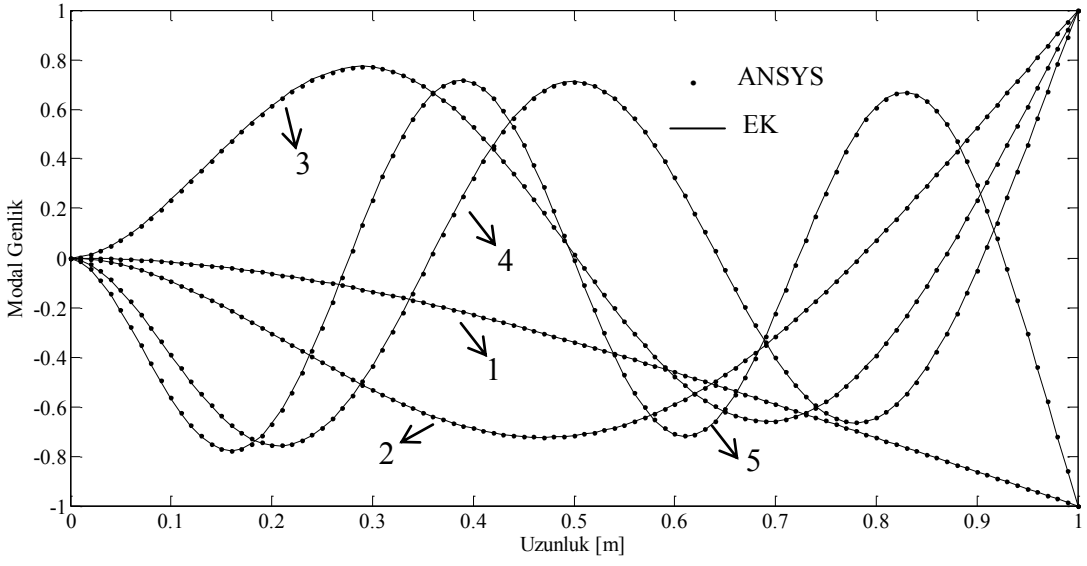
$$\left(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}\right)\mathbf{X} = \mathbf{0} \tag{2.2}$$

Burada **K ve M** tüm yapının sırasıyla katılık ve kütle matrisleridir. Her birinin boyutu $2(N_e+1)x2(N_e+1)$'dir. **X**, elemanları düğüm noktalarındaki şekil değiştirme bileşenleri (y_1, φ_1,…, y_{Ne+1}, φ_{Ne+1}) olan vektör, ω da doğal frekans parametresidir. Sınır şartları kullanılarak (2.2) eşitliğinin ilgili satır ve sütunları silinir (serbest uçla ilgili satır ve sütunlar silinmez), geriye kalan homojen denklem takımı çözülerek kirişin doğal frekansları ve titreşim modları bulunur. EK'de bu hesaplamaları yapan, MATLAB

ortamında yazılmış bir program mevcuttur. Programın doğru sonuç verdiği bir örnekle gösterilebilir (Çizelge 2.1). Görüldüğü gibi sonuçlar arasındaki bağıl hata oldukça küçüktür. Titreşim modlarının da son derece uyumlu olduğu Şekil 2.2'den görülmektedir. Plak ve sac parça türü yapılar ANSYS ortamında SHELL63 elemanıyla modellenmişlerdir.

Çizelge 2.1 EK'de verilen program ve ANSYS sonuçlarının karşılaştırılması.

		ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	ω_5
Sağlıklı	EK	24.52	153.03	425.62	826.06	1349.09
	ANSYS	24.53	153.19	426.66	829.72	1358.40
	Hata (%)	0.04	0.10	0.24	0.44	0.66
Hasarlı	EK	24.39	152.97	423.89	824.66	1348.52
	ANSYS	24.41	153.09	424.88	828.67	1357.20
	Hata (%)	0.08	0.07	0.23	0.48	0.64
Kiriş özellikleri: E=200GPa, ρ=7800kgm^{-3}, υ (Poisson Oranı) =0.33, L=1m, w=20mm, h=30mm (hasarlı kesitte 25mm), hasar yeri 0.3L, eleman sayısı N_e=100, sınır şartları: ankastre-serbest. ANSYS'de BEAM3 adlı eleman kullanılmıştır. Doğal frekanslar Hertz birimindedir. Hata=100|E-A|/A; E: EK, A: ANSYS.						



Şekil 2.2 Titreşim modlarının karşılaştırılması

2.2. Dalgacık Dönüşümü (DD)

2.2.1 SDD ve ADD

$\mathbf{L}^2(\mathbf{R})$ karesi integrallenebilir fonksiyonlar uzayını göstermek üzere [1] $f(x)\in\mathbf{L}^2(\mathbf{R})$ şartını sağlayan reel değerli bir fonksiyonunun sürekli dalgacık dönüşümü (SDD) aşağıdaki gibi tanımlıdır:

$$W(s,b)=\int_{-\infty}^{\infty} f(x)\psi_{s,b}(x)dx\,, \qquad \psi_{s,b}(x)=\frac{1}{\sqrt{s}}\psi\left(\frac{x-b}{s}\right) \tag{2.3}$$

Burada s ve b reel sayılar olup (s>0) sırasıyla ölçek (*scale*) ve kaydırma (*translation*) parametreleridir. $\psi_{s,b}(x)$, bu parametreler yardımıyla, $\psi(x)\in\mathbf{L}^2(\mathbf{R})$ şartını sağlayan bir ana dalgacıktan türetilmiş dalgacık fonksiyonudur. $s^{-1/2}$ çarpanı dalgacığın her ölçekte aynı enerjiye sahip olması içindir. W(s,b); b noktasında s ölçeğindeki SDD katsayısını ifade eder. Ana dalgacık fonksiyonu $\int_0^{\infty}\frac{|\Psi(\omega)|^2}{\omega}d\omega<\infty$ formundaki "kabul edilebilirlik" şartını sağlamalıdır ($\Psi(\omega)$ $\psi(x)$'in FD'sidir: $\Psi(\omega)=\int_{-\infty}^{\infty}\psi(x)e^{-i\omega x}dx$). Kabul edilebilirlik şartına göre $\psi(x)$'in ortalama değeri sıfırdır: $\int_{-\infty}^{\infty}\psi(x)dx=0$ (Addison 2002, p.9). Bu ve sınırlı enerjiye sahip olma özellikleri $\psi(x)$'in x uzayında sınırlı bölgede sıfırdan farklı değerler almasını ve bu bölgede salınım yapmasını gerektirir. "Dalgacık" isminin sebebi budur.

Dalgacık fonksiyonu

[1] Karesi integrallenebilir fonksiyonun enerjisi sınırlıdır. Pratikte ölçülen veriler sınırlı uzunluğa sahip olduğundan bu şartı sağlarlar.

$$\int_{-\infty}^{\infty} x^n \psi(x)dx=0, \quad n=0,1,2,....,N_{VM}-1 \tag{2.4}$$

eşitliğini sağlıyorsa N_{VM} adet sıfıra eşit momenti olduğu söylenir. Böyle bir dalgacık N_{VM} adet türeve sahip $\theta(x)$ gibi düzgün (*smooth*) bir fonksiyondan $\psi(x)=(-1)^{N_{VM}} \frac{d^{N_{VM}}\theta(x)}{dx^{N_{VM}}}$ şeklinde türetilebilir. (2.3) ifadesi f(x) ile s ölçeğindeki dalgacık fonksiyonunun konvolüsyonu olduğundan

$$W(s,b)=s^{N_{VM}} \frac{d^{N_{VM}}}{db^{N_{VM}}}\left(f(x) * s^{-1/2}\theta((x-b)/s)\right) \tag{2.5}$$

olarak yazılabilir (Mallat 1998, p.167). Burada "*" konvolüsyon işlemini temsil eder. $\theta(x)$ ölçek fonksiyonu olup bunun ortalama değeri sıfırdan farklıdır: $\int_{-\infty}^{\infty} \theta(x)dx \neq 0$. s arttıkça θ fonksiyonu x uzayında genişler, buna karşılık frekans uzayındaki spektrumu daralır (ölçek ve frekans ters orantılıdır). Şu halde f(x)'in s ölçeğindeki θ ile konvolüsyonu, frekans ortamında bu fonksiyona ait spektrumla filtrelenmesidir. f(x)'de genişbant parazit olsa, bu işlemle filtre dışındaki bileşenler ayıklanır. Böylece f(x) fonksiyonu "düzgünleştirilir" (*smoothing*). Diğer taraftan, bir x noktasında f(x)'in N_{VM} ve daha düşük mertebeden türevlerinde süreksizlik olsa, (2.17)'deki türev işlemi ile bunlar açığa çıkarılır (bu durumda dalgacık katsayıları süreksizlik noktasında yüksek genlikler edinir). Yani SDD, bünyesinde filtreleme ve türev alma işlemlerini bulunduran bir dönüşümdür (Gentile ve Messina 2003, Rucka ve Wilde 2006b).

f(x) fonksiyonunun bir noktadaki türevlenebilirliği matematikte Lipschitz Üsteli (LÜ) ile ifade edilir. x=b noktasında f(x)'in α LÜ'süne sahip olduğu söylenir, eğer f(x), $f(x) = p_b(x) + \varepsilon_b(x)$ şeklinde m. dereceden bir $p_b(x)$ polinomu ile (m, $m \leq \alpha$ şartını sağlayan en büyük tamsayıdır) $|\varepsilon_b(x)| \leq K|x-b|^{\alpha}$ ($K>0$) olacak tarzda bir $\varepsilon_b(x)$ hatasının toplamı şeklinde yazılabiliyorsa (Hong ve ark. 2002). x=b noktasında f(x)

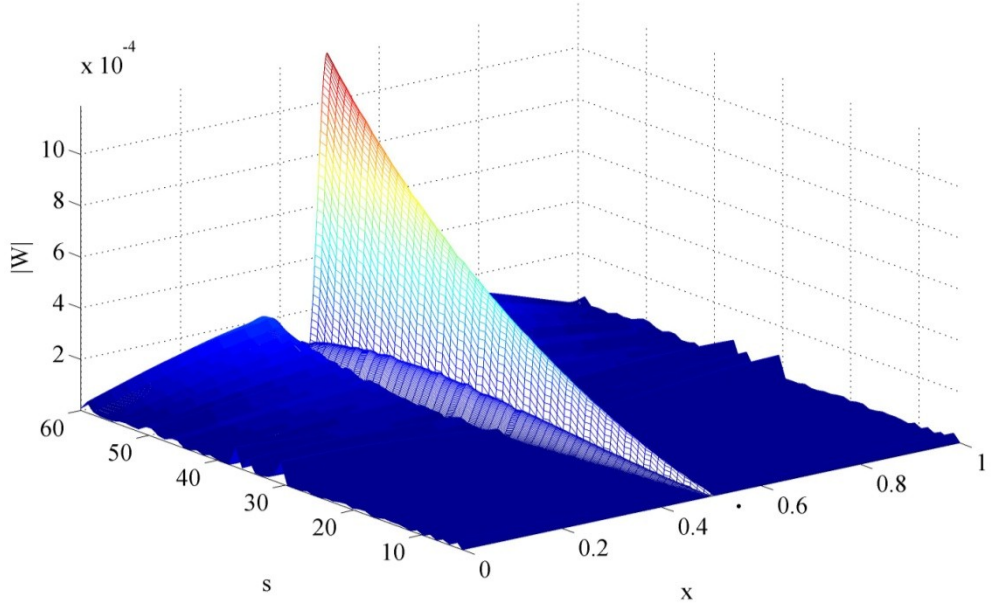
türevlenemezse $0<\alpha<1$ olduğu söylenir, bir kere türevlenebilirse $1<\alpha<2$'dir... $N_{VM}\geq\alpha$ şartını sağlayan bir dalgacıkla f(x) fonksiyonunun SDD'si hesaplanırsa, (2.4) gereği $p_b(x)$ polinomunun SDD katsayıları sıfır olur. Bu durumda fonksiyonun dalgacık katsayıları ile ölçek arasında

$$|W(s,b)| \leq As^{\alpha+1/2}, \quad A>0 \tag{2.6}$$

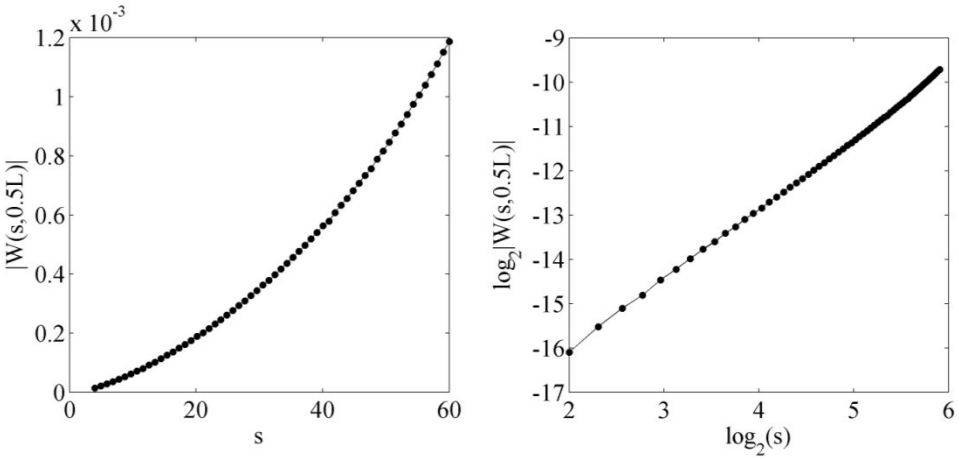
bağıntısı mevcuttur (Mallat 1998, p.169). b noktasındaki SDD katsayılarının ölçekle değişimine bakarak α hakkında bilgi elde edilebilir. Bunun için (2.6) aşağıdaki gibi yazılır:

$$\log_2|W(s,b)| \leq \log_2 A + (\alpha+1/2)\log_2 s \tag{2.7}$$

Eşitlik olduğunda bu ifade bir doğru denklemine benzer. Hesaplanan dalgacık katsayılarının ölçekle logaritmik değişimine doğru uydurarak α ile ilgili tahmini değer elde edilebilir (Hong ve ark. 2002). Örneğin iki ucu basit mesnetli, kesit genişliği w=20mm, yüksekliği h=30mm olan bir kirişin orta noktasında yüksekliği h_c=20mm olacak tarzda bir çentik olsun (sonlu eleman sayısı N_e=1000). Bu halde birinci mod şeklinin SDD katsayılarının ölçek ve konumla değişimi Şekil 2.3'deki gibi olur (katsayılar N_{VM}'si 4 olan *symmlet* (sym4) dalgacığı ile elde edilmiştir). Görüldüğü gibi hasar yerindeki katsayı genlikleri ölçekle parabole benzer bir şekilde değişmektedir. Aynı katsayıların logaritmik eksendeki görüntüsü bir doğruya benzemektedir. Bu veriye en küçük kareler yaklaşımı ile doğru uydurulduğunda α=1.097 bulunur. Beklenildiği gibi bu sayı 1'den büyüktür. Douka ve ark. (2003) çatlak olması halinde α'yı yaklaşık 1.005 olarak bulmuşlardır. Çatlak olduğunda eğim süreksizliği olmasına rağmen α'nın 1'den büyük olması veri çözünürlüğünün azlığından kaynaklanmaktadır. Çözünürlüğün (örnekleme frekansının) az olması süreksizlik noktasında veriyi kısmen düzgünleştirmektedir (*smoothing*). Bu da LÜ'nün beklenenden biraz fazla olmasına yol açar.



a) SDD katsayılarının üç boyutlu grafiği



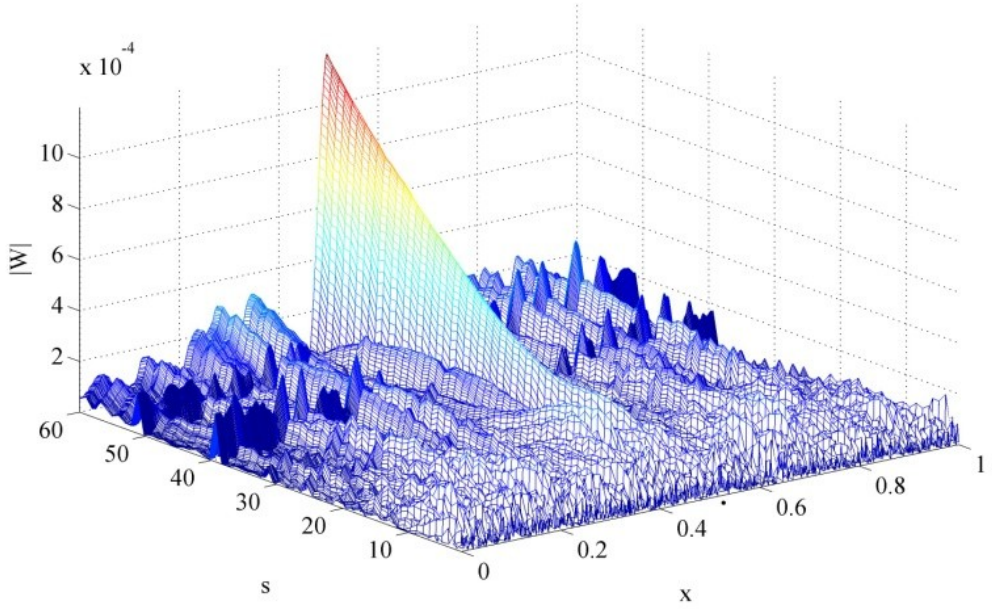
b) Hasar yerindeki (x=0.5L) SDD katsayılarının ölçekle değişimi.
Şekil 2.3 Hasarlı haldeki bir titreşim modunun SDD katsayılarının değişimi.

Pratikte veriye ölçüm hataları, kullanılan ekipmanın yetersizliği, deney yapılan ortam vs kanallardan parazit karışır. Konuyla ilgili çalışmaların çoğunda –genellikle deneysel veri kullanılmadığı zaman– en genel durum dikkate alınarak, veriye beyaz gürültü formunda parazit eklemek suretiyle bu hataların etkisi hesaba katılmıştır (örneğin bkz. Zhong ve Oyadiji 2007, Gentile ve Messina 2003, Castro ve ark. 2006a).

Bu durumda, parazitin miktarına bağlı olarak LÜ azalır. Bununla birlikte, parazit içindeki yüksek frekanslı bileşenler negatif LÜ'ye sahip olduğundan, artan ölçekle bunlara ait SDD katsayılarının genliği azalır (Douka ve ark. 2003). Bu durum parazit olduğunda da hasar kaynaklı değişimlerin algılanmasını mümkün kılmaktadır. Ancak burada parazit kaynaklı tekilliklerin verideki süreksizlik kaynaklı olanları bastırmayacak derecede az olması esastır (Mallat ve Hwang 1992). Aksi halde hasar etkisi algılanamaz. Veriye karışan parazit miktarını sinyalin parazite oranı SNR (*signal to noise ratio*) ile aşağıdaki gibi ifade etmek mümkündür (Castro ve ark. 2006a):

$$\mathrm{SNR}=10\log_{10}\frac{\sum_i^N f(k)^2}{\sum_i^N p(k)^2} \qquad [\mathrm{dB}] \tag{2.8}$$

Burada p(k) Gauss dağılımlı parazittir. Gerçekte ölçülen veriler ayrık değerli olduğundan eşitlik (2.8)'de toplam sembolü kullanılmıştır. Şekil 2.3'deki grafikleri elde etmede kullanılan mod verisine SNR=80dB olacak tarzda parazit eklendiğinde SDD katsayıları Şekil 2.4'deki gibi olur. Görüldüğü gibi küçük ölçeklerde hasar etkisi artık görünmemektedir; yüksek frekanslı parazit bileşenleri tarafından bastırılmıştır. Yaklaşık s=27'den itibaren hasar kaynaklı katsayılar belirgin bir biçimde artmaktadır. HT amacıyla çok küçük ölçeklerden kaçınılması tavsiyesi (Gentile ve Messina 2003) bu sebeptendir. Parazit miktarı fazlalaştıkça (SNR azaldıkça) hasar etkisi görünmez hale gelir. Hasar etkisinin algılanabildiği en küçük SNR değeri hasar yeri ve derecesine bağlı olarak değişir.



Şekil 2.4 Şekil 2.3'deki grafiğin SNR=80dB olması halinde görünümü.

SDD işleminde ölçek (s) ve kaydırma (b) parametreleri reel sayılar olduğundan, dönüşüm sonunda başlangıçtaki veri uzunluğundan çok fazla sayıda katsayı elde edilir. Örneğin, uzunluğu 1000 olan yukarıdaki titreşim modunun s=1:60 arasındaki tamsayı ölçeklerde dönüşümü hesaplandığında SDD katsayıları matrisinin boyutu 60x1000 olur. Bu durum SDD'nin fazladanlık (*redundancy*) özelliğinden kaynaklanır. Ters dönüşümle başlangıçtaki veriyi inşa etmek için bu katsayıların hepsini kullanmak gerekmez. Ortonormal bir dalgacık ailesi ile uygun s ve b değerlerine karşılık gelen dalgacık katsayılarını kullanarak başlangıçtaki veriyi oluşturmak mümkündür. Bunun için ölçek ve kaydırma parametreleri $s=2^m$, $b=n2^m$ şeklinde ayrıklaştırılır[1]. m ve n tamsayı olup, bu ayrıklaştırmaya "diyadik örnekleme" denir. Bu tarz bir örnekleme ortogonal DD'nin teorisini oluşturan çok-çözünürlüklü (*multiresolution*) analiz ile de uyumludur (Mallat 1989). Bu halde (2.3) eşitliği aşağıdaki gibi olur:

[1] Gerçekte ölçülen veriler ayrık değerli olduğundan (2.13)'deki integral de ayrık değerler üzerinden hesaplanır. Ama bu çalışmada ayrık dönüşüm (ADD) ile ortogonal DD kastedilmektedir.

$$W_{m,n}=\int_{-\infty}^{\infty} f(x)\psi_{m,n}(x)dx, \quad \psi_{m,n}(x)=2^{-m/2}\psi\left(\frac{x-n2^m}{2^m}\right) \tag{2.9}$$

Kompakt[1] yapılı ortonormal dalgacıkların analitik ifadesi yoktur. Bunun yerine, belli özelliğe sahip filtre katsayılarından "ölçek eşitliği" ile elde edilmiş ölçek fonksiyonuna ((2.5) eşitliğindeki θ(x) fonksiyonu) sahiptirler. Ölçek fonksiyonuna "baba dalgacık" da denmektedir. Bunun ortalama değeri 1'dir: $\int_{-\infty}^{\infty}\theta(x)dx=1$. Bu da dalgacık fonksiyonu gibi m ve n parametreleri ile ayrıklaştırılabilir: $\theta_{m,n}(x)=2^{-m/2}\theta(2^{-m/2}x-n)$. Bu durumda bir m düzeyinde

$$S_{m,n}=\int_{-\infty}^{\infty} f(x)\theta_{m,n}(x)dx \tag{2.10}$$

biçiminde elde edilen $S_{m,n}$ katsayılarına "yaklaşım katsayıları" denir. (2.9) ile hesaplanan $W_{m,n}$ katsayılarına da "ayrıntı katsayıları" denir. Dalgacık fonksiyonu yüksek geçirgen (*highpass*) filtre gibi davrandığından $W_{m,n}$ katsayıları f(x)'in yüksek frekanslı bileşenlerine ait katsayıları temsil eder. $S_{m,n}$ katsayıları da fonksiyondaki düşük frekanslı bileşenlere ait bilgiyi içerir. Çok-çözünürlüklü analize göre f(x) fonksiyonu bir M düzeyindeki yaklaşım fonksiyonu (A_M) ile bu düzeye kadarki ayrıntı (D_M) fonksiyonlarının toplamı cinsinden aşağıdaki gibi yazılabilir (Addison 2002, p.70):

$$f(x)=A_M+\sum_{m=-\infty}^{M} D_m, \quad A_M=\sum_{n=-\infty}^{\infty} S_{M,n}\theta_{M,n}(x), \quad D_m=\sum_{n=-\infty}^{\infty} W_{m,n}\psi_{m,n}(x) \tag{2.11}$$

Yaklaşım ve ayrıntı katsayılarının her m ve n için eşitlik (2.9) ve (2.10)'daki gibi integral ile hesaplanması zaman alıcı bir işlemdir. Bunun yerine, kompakt yapılı

[1] Sınırları $\pm\infty$ a uzanmayan, sınırlı aralıkta değer alan dalgacıklar kastedilmektedir.

ortonormal dalgacıkların filtre katsayıları (c_k) ile dalgacık katsayıları arasındaki ilişkiden yararlanılır. Bu amaçla aşağıdaki "ölçek eşitliği" kullanılır:

$$\theta(x)=2\sum_{k=0}^{N_k-1} c_k\theta(2x-k) \qquad (2.12)$$

Burada N_k filtre katsayılarının sayısıdır. Ölçek eşitliği, bilinen filtre katsayılarından dalgacıkla ilgili ölçek fonksiyonunu elde etmeyi sağlar. Bu işlem "şelale (*cascade*) algoritması" denilen, yakınsak bir iteratif yöntemle gerçekleştirilir (Daubechies 1992, p.205). (2.12)'nin her iki tarafı integre edilir ve ölçek fonksiyonunun ortalama değerinin 1 olduğu hatırlanırsa $\sum_k^{N_k-1} c_k=1$ olduğu görülür. Örneğin Daubechies dalgacık ailesinden db2 dalgacığının filtre katsayıları [0.3415 0.5915 0.1585 -0.0915] olup toplamları 1'dir. Benzer şekilde "dalgacık eşitliği" de yazılır:

$$\psi(x)=2\sum_{k=0}^{N_k-1} b_k\theta(2x-k), \quad b_k=(-1)^k c_{N_k-1-k} \qquad (2.13)$$

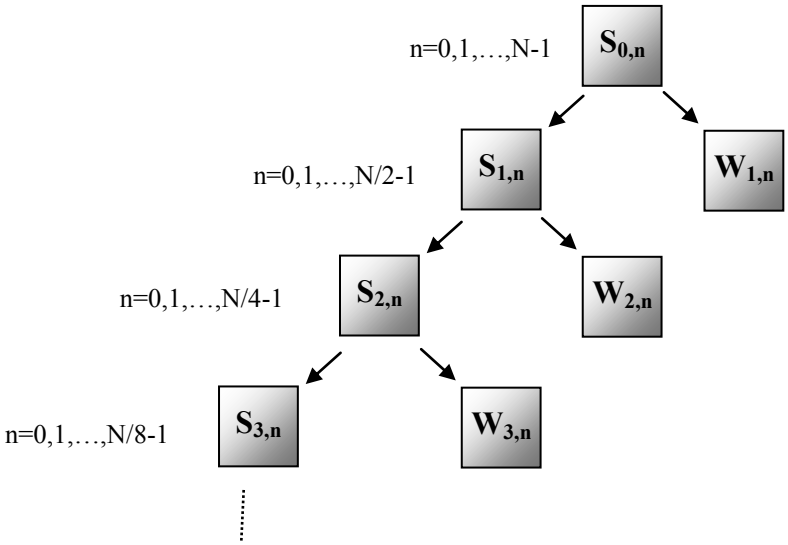
b_k katsayıları dalgacık ve ölçek fonksiyonları ortogonal olacak şekilde (yani $\int_{-\infty}^{\infty}\theta(x)\psi(x)dx=0$ olacak tarzda) filtre katsayılarından elde edilmiştir. m ve n ayrık parametreleri cinsinden dalgacık ve ölçek eşitlikleri aşağıdaki gibidir:

$$\theta_{m+1,n}(x)=\sqrt{2}\sum_{k=0}^{N_k-1} c_k\theta_{m,2n+k}(x), \quad \psi_{m+1,n}(x)=\sqrt{2}\sum_{k=0}^{N_k-1} b_k\theta_{m,2n+k}(x) \qquad (2.14)$$

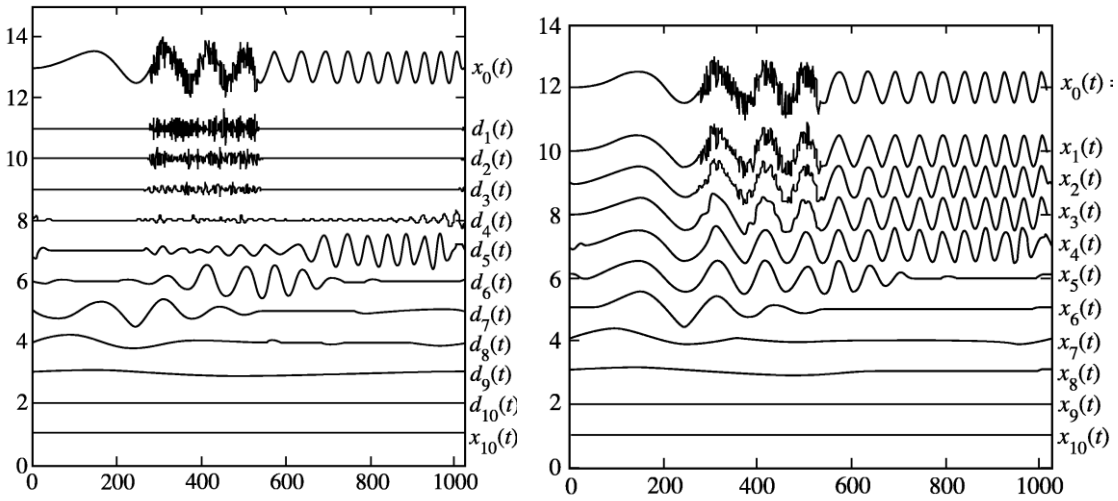
Bu durumda (m+1). düzeydeki yaklaşım ve ayrıntı katsayıları

$$S_{m+1,n} = \sqrt{2}\sum_{k=0}^{N_k-1} c_{k-2n} S_{m,k}, \quad W_{m+1,n} = \sqrt{2}\sum_{k=0}^{N_k-1} b_{k-2n} S_{m,k} \tag{2.15}$$

olarak bulunur. m=0 düzeyindeki katsayılar (2.10) ile hesaplanırsa, daha yüksek mertebeden katsayılar filtre katsayıları ile basit konvolüsyon işlemlerinden elde edilir. Buna hızlı dalgacık dönüşümü (*fast wavelet transform*) denir. Bu işlemin görüntüsü Şekil 2.5'deki gibidir. Her düzeyde toplam veri uzunluğunu korumak üzere seyreltme (*downsampling*) yapılır. Bu işlem, her düzeyde filtre katsayıları ile konvolüsyondan elde edilen sayılardan tek indislilerin tutulması şeklinde gerçekleştirilir. Örneğin bir düzeyde filtreleme sonucu 10 elemanlı bir katsayı vektörü elde edilmişse, bunun 1,3,5,7 ve 9. elemanları tutulur, diğerleri atılır. Bu şekilde, başlangıçta N elemanı olan bir yaklaşım katsayıları vektörü ($\mathbf{S_{0,n}}$) birinci düzeyde N/2 elemanlı yaklaşım ($\mathbf{S_{1,n}}$) ve N/2 elemanlı ayrıntı ($\mathbf{W_{1,n}}$) katsayıları vektörüne ayrılır. Uzunluğu N/2 olan $\mathbf{S_{1,n}}$ tekrar filtrelenerek ikinci düzeyde uzunluğu N/4 olan $\mathbf{S_{2,n}}$ ve $\mathbf{W_{2,n}}$ vektörleri elde edilir. Ayrışım bu şekilde devam eder. *Sonuçta N kadar katsayı elde edilir*. $\mathbf{S_{0,n}}$ katsayılar vektörünün frekans aralığı (0–ω) ise, birinci düzeydeki $\mathbf{S_{1,n}}$ ve $\mathbf{W_{1,n}}$'nin frekans aralıkları sırasıyla (0 – 0.5ω) ve (0.5ω – ω) olur. İkinci düzeydeki yaklaşım ve ayrıntı katsayılarının frekans aralıkları da sırasıyla (0 – 0.25ω) ve (0.25ω – 0.5ω)'dir. Yani düzey arttıkça yaklaşım katsayılarının frekans spektrumu daralır. Başka bir ifadeyle, bir önceki düzeyde hesaplanan yaklaşım katsayılarından daha kaba ayrıntılar ayıklanır. (2.11)'den yararlanarak herhangi bir düzeydeki yaklaşım ve ayrıntı fonksiyonları hesaplanabilir. Örneğin, Şekil 2.6'daki gibi belli aralıkta parazit içeren, değişken frekanslı bir sinüs sinyali (*chirp*) db20 dalgacığı ile farklı düzeylerde yaklaşım ve ayrıntı fonksiyonlarına ayrıldığında, düzey arttıkça ayrıntı ve yaklaşım fonksiyonlarının parazitten arındığı ve daha düzgün (*smooth*) değiştiği görülmektedir.



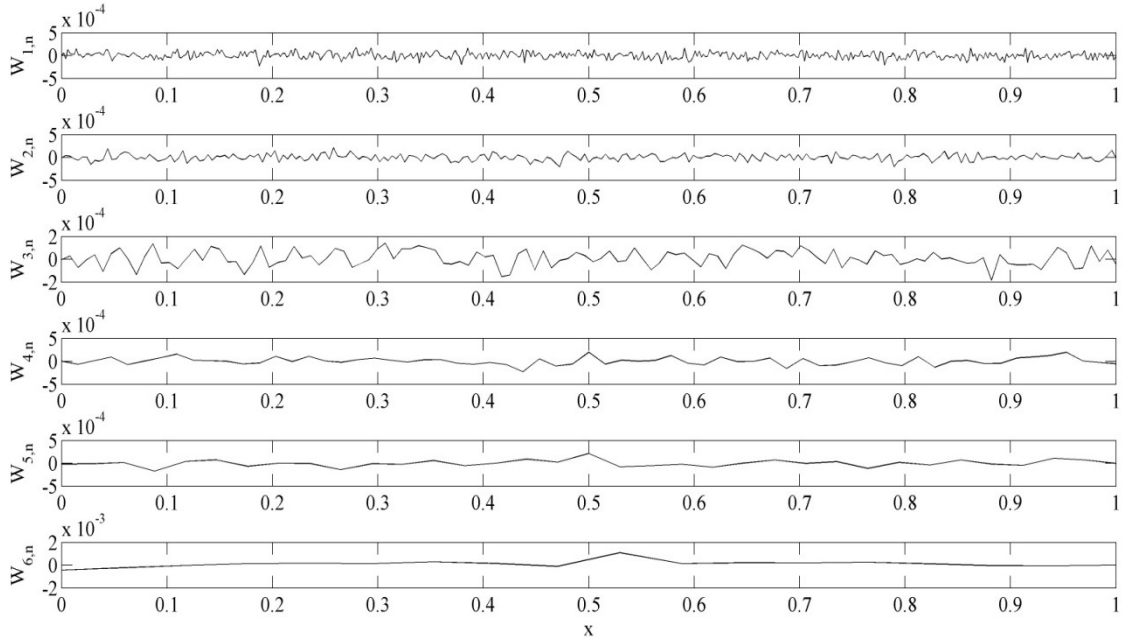
Şekil 2.5 ADD katsayıları ve ayrışım düzeyi ilişkisi.



Şekil 2.6 Bir sinyalin farklı düzeylerdeki ayrıntı ve yaklaşım fonksiyonları. $d_i(t)$ ayrıntı fonksiyonları, $x_i(t)$: yaklaşım fonksiyonları olup sırasıyla (2.11) eşitliğindeki D_M ve A_M'ye karşılık gelmektedir. **Kaynak**: Addison 2002, p.80.

Şekil 2.4'deki grafiği elde etmede kullanılan mod verisinin ADD ile ilk 6 düzeyde hesaplanan ADD katsayılarına ($W_{i,n}$, i=1,2,..,6) bakıldığında (Şekil 2.7), hasar etkisinin Şekil 2.4'deki kadar belirgin olmadığı görülmektedir. Bunun sebebi, ADD katsayılarının her ölçekte değil 2'nin kuvvetleri şeklinde değişen ölçeklerde katsayı üretmesidir. Ayrıca, SDD halinde b parametresi (bkz. eşitlik (2.3)) birer birer artıp

konum eksenindeki tüm noktaları taradığı halde, ADD'de konum ekseninde her m düzeyinde kaydırma miktarı 2^m'dir. Yani düzey arttıkça konum eksenindeki adım genişliği de artmaktadır. Böyle olunca hasar noktasını tam yakalayamama durumu söz konusudur. Bu sebeple, düzey arttıkça hasar noktası (x=0.5) civarında belirgin bir değişim olsa da SDD grafiğindeki gibi açık değildir ve iyi bir lokalizasyon söz konusu değildir.



Şekil 2.7 Şekil 2.4'ü elde etmede kullanılan titreşim modunun ilk 6 düzeydeki ADD katsayıları.

Yapılmış çalışmalarda da hasar kaynaklı tekillikleri açığa çıkarmak bakımından SDD'nin daha iyi olduğu belirtilmiştir. Çünkü SDD katsayıları –fazladanlık özelliğinden ötürü– ADD katsayılarına göre hasar hakkında daha fazla bilgiye sahiptir (Robertson ve ark. 2003, Loutridis ve ark. 2004). Başka bir ifadeyle, ADD katsayıları her ölçekte değil belli ölçeklerde ve sınırlı konumsal çözünürlükte katsayı hesaplamaya izin verdiğinden, hesaplanan katsayıların hasar kaynaklı tekilliğe duyarsız olma ihtimali vardır (Gentile ve Messina 2003). Ayrıca, HT uygulamalarında SDD yöntemlerinin daha doğru sonuç verdiği de ifade edilmektedir (Castro ve ark.2006b). ADD'nin asıl

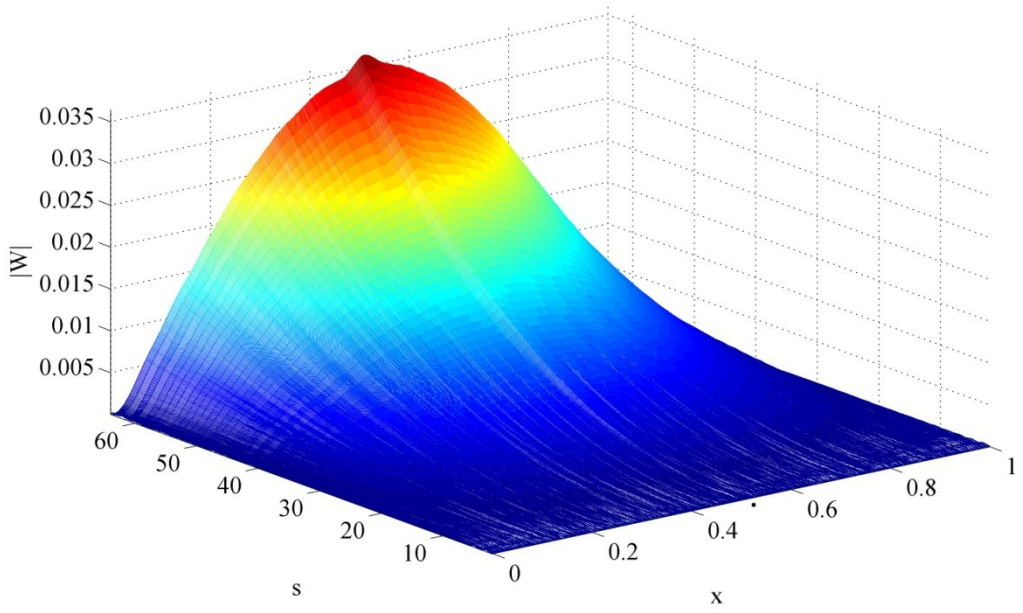
kullanım alanı veri sıkıştırma ve parazit ayıklamadır. Bu çalışmada, ADD'nin özellikle veri sıkıştırma özelliğinden yararlanılacaktır.

2.2.2 Dalgacık seçimi

DD temelli HT uygulamalarında dalgacık seçimi önemlidir. İlk başta SDD veya ADD kullanımına göre tercih yapılır. Çünkü her dalgacık hem SDD hem de ADD işleminde kullanılamaz. Örneğin *Gauss*, *Mexican Hat*, *Morlet*, *Shannon* gibi analitik forma sahip ama ortogonal olmayan dalgacıklar ADD'de kullanılamaz. *Meyer* dalgacığı ortogonal bir aile oluştursa da, ayrıntıları yukarıda verilen hızlı dalgacık dönüşümünde kullanılamaz. Çünkü sınırları $\pm\infty$'a uzanmaktadır; kompakt yapılı değildir. Her iki dönüşüme de izin veren dalgacıklar arasında *Haar*, *Daubechies*, *symmlet*, *Coiflet*, *biorthogonal* gibi adlarla anılan dalgacıklar mevcuttur (Ovanesova ve Suárez 2004). Bu çalışmada, ayrıntıları bir sonraki başlıkta verilecek yöntemde SDD ve ADD birlikte kullanıldığından, bu ikisine izin veren dalgacıklar arasından seçim yapılacaktır.

Seçimde belirleyici ikinci husus N_{VM} sayısıdır. Dalgacık fonksiyonu (2.4) eşitliğini sağlarsa N_{VM} adet sıfırlanan momenti olduğu söylenir. Yani (N_{VM}-1). dereceye kadarki polinomlara diktir (ortogonaldir). HT uygulamasında amaç sadece hasar kaynaklı tekilliği açığa çıkarmak olduğundan, verinin düzgün kısımlarındaki dalgacık katsayılarının sıfırlanması, sadece hasar bölgesindeki katsayıların belirgin genlikler alması istenir. Bu durumda, kullanılacak dalgacığın N_{VM} değeri yeterince yüksek olmalıdır. Yapılan çalışmalarda, titreşim modları gibi polinom türü değişim gösteren verilerle HT için N_{VM}'nin en az 2 olması gerektiği ifade edilmiştir (Hong ve ark. 2002). Bununla birlikte, deneysel modlara parazit karıştığından tekillik etkisini algılamak biraz zorlaşır. Bu sebeple 4 veya 5 gibi N_{VM} değerleri önerilmektedir (Rucka ve Wilde 2006b). Örneğin, Şekil 2.4 için kullanılan titreşim modunun SDD katsayıları sym2 dalgacığı (bunun için N_{VM}=2'dir) ile Şekil 2.8'deki gibi bulunur. Görüldüğü gibi bu halde de x=0.5 konumundaki SDD katsayıları ölçekle belirgin bir değişim yapmaktadır. Ama bu değişim Şekil 2.4'deki kadar açık değildir. Çünkü orada sym4 dalgacığı

(N_{VM}=4) kullanılmıştır. Ayrıca, yüksek mertebeden titreşim modları hasara daha duyarlıdır. Fakat bunlar yüksek dereceli polinomlara benzediğinden, hasar dışı değişimleri bastırmak için daha yüksek N_{VM} değerleri kullanılır (Okafor ve Dutta 2000). Öte yandan, aşırı N_{VM} değerlerinden kaçınılmalıdır. Çünkü bu halde yüksek frekanslı parazitler güçlenir ve sınırlardaki bozulmalar artarak hasar etkisinin algılanması güçleşir (Fan ve Qiao 2009). Ayrıca, N_{VM} arttıkça dalgacığın konum eksenindeki uzunluğu artar ve lokalizasyonu azalır. Buna bağlı olarak tekillikleri izole etme yeteneği azalır (Addison 2000, p. 112). Ek olarak, sayısal işlemlerin stabilitesi de kötüleşir (Douka ve ark. 2003). Yukarıdaki gerekçelerden ötürü bu çalışmada SDD katsayıları hesaplanırken N_{VM}'si 4 veya 6 olan dalgacıklar kullanılacaktır.



Şekil 2.8 sym2 dalgacığı kullanılması halinde SDD katsayıları.

N_{VM} arttıkça dalgacığın filtre uzunluğu ve buna bağlı olarak dalgacık fonksiyonunun taban (*support*) genişliği (sıfırdan farklı değerler aldığı aralık) artar. Bu da konum ekseninde lokalizasyonun azalması demektir. Bu durumda, yeterince yüksek N_{VM} ile birlikte dalgacık genişliğinin de fazla olmaması istenir. Kompakt yapılı ortonormal dalgacıklar içinde bir N_{VM} değeri için en az genişliğe sahip olanlar

Daubechies tarafından geliştirilen dalgacıklardır (Černá ve Finěk 2004). Bu ailenin herhangi bir ferdi "dbN" şeklinde gösterilir ($N=N_{VM}$). Bir dbN dalgacığının $N_k=2N$ adet filtre katsayısı olup, dalgacık genişliği 2N-1'dir (Misiti ve ark. 2007). Bu dalgacıklar, aşağıdaki özellikleri sağlayan FIR (*finite impulse response*) filtrelerden (2.12) ve (2.13) yardımıyla elde edilir:

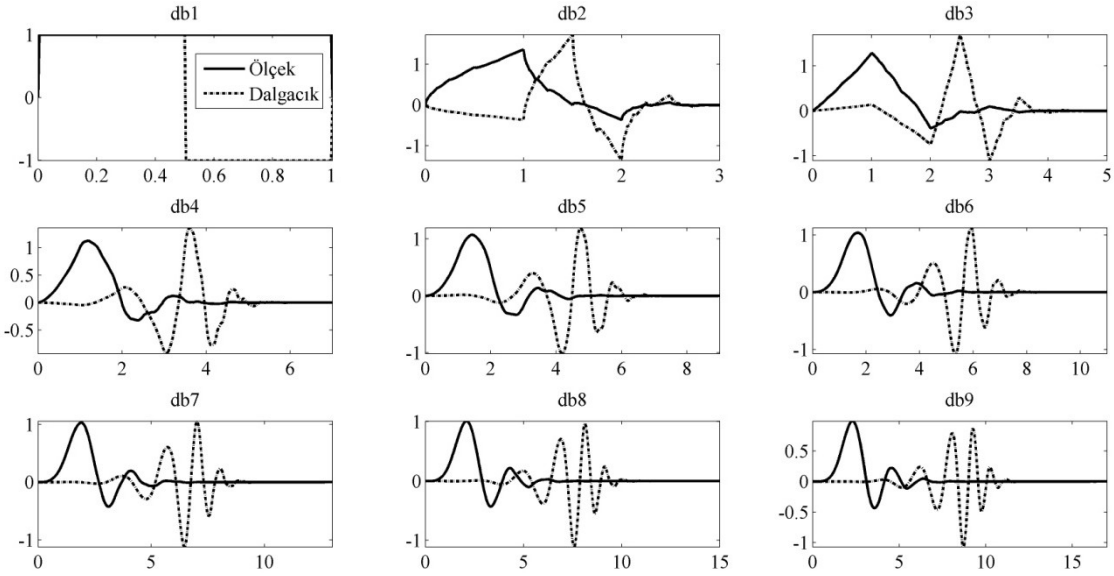
$$\forall k \notin \{0,1,...,N_k-1\} \text{ için } c_k=0 \tag{2.16a}$$

$$2\sum_{k=0}^{N_k-1} c_k c_{2m+k}=\delta_{m,0}, \quad 1-0.5N_k \le m \le 0.5N_k-1 \tag{2.16b}$$

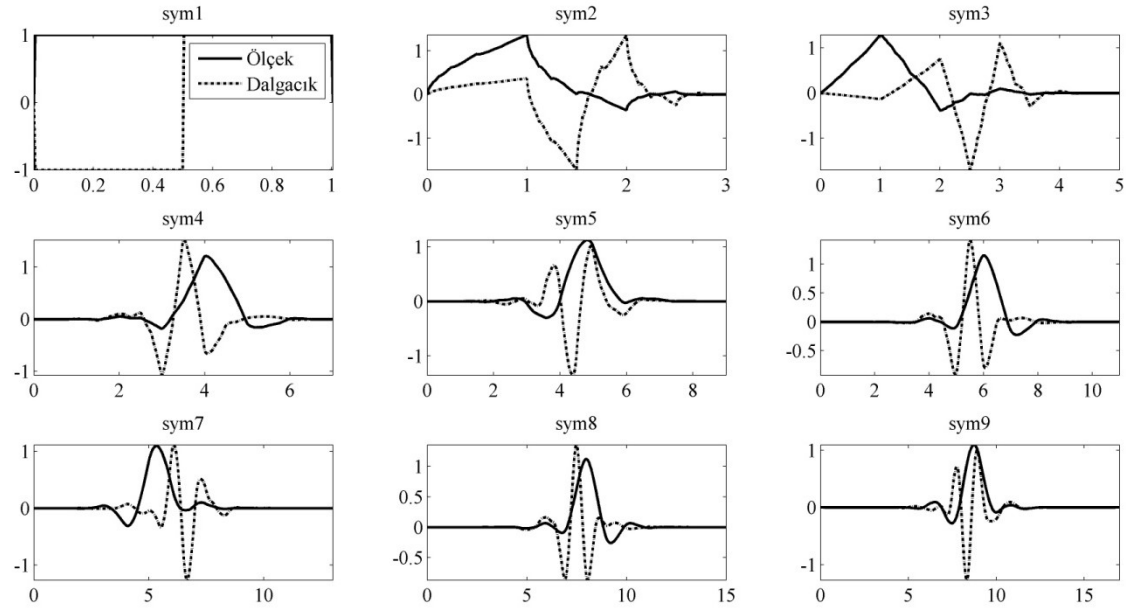
$$\sum_{k=0}^{N_k-1} c_k=1 \tag{2.16c}$$

$$\sum_{k=0}^{N_k-1} (-1)^k c_k k^n=0, \quad 0 \le n \le 0.5N_k-1 \tag{2.16d}$$

c_k filtre katsayıları frekans ortamında "polinomun çarpanlarına ayrılması" (*polynomial factorization*) işlemi ile hesaplanırlar (Daubechies 1992, pp:167-195). dbN dalgacıkları simetrik değildirler (Şekil 2.9a). Simetri SDD grafiklerinin görselliğini iyileştirmenin yanında sınır bozulmasını azaltmada da etkilidir (Daubechies 1992, p.254). Bu sebeple, mevcut çalışmada, yine db dalgacıkları ile aynı özelliklere sahip, tam anlamıyla simetrik olmasa da simetri bakımından dbN dalgacıklarından daha iyi olan symmlet (symN) dalgacıkları (Şekil 2.9b) kullanılacaktır. Görüldüğü gibi symN dalgacıkları özellikle çift N değerlerinde simetri bakımından dbN'den daha iyidir ve artan N ile simetrisi de artmaktadır. Titreşim modları ile DD temelli HT çalışmalarında sym4 (Zhong ve Oyadiji 2007, Douka ve ark. 2003) ve sym6 (Loutridis ve ark. 2005) dalgacıklarının kullanıldığı bilinmektedir.



a)



b)

Şekil 2.9 dbN ve symN dalgacık ailelerinin ilk birkaç ferdi.
Ölçek: θ(x) fonksiyonu, Dalgacık: ψ(x) fonksiyonu.

2.2.3 DD temelli HT yöntemi

Bu çalışmada önerilen SDD temelli HT yöntemi hasarlı haldeki titreşim modunun (M_h) hasarsız haldeki titreşim modu (M_{hz}) ve lokal hasar etkilerinin (H) toplamından oluşması kabulüne (Zhong ve Oyadiji, 2007) dayanmaktadır:

$$M_h = M_{hz} + H \tag{2.17}$$

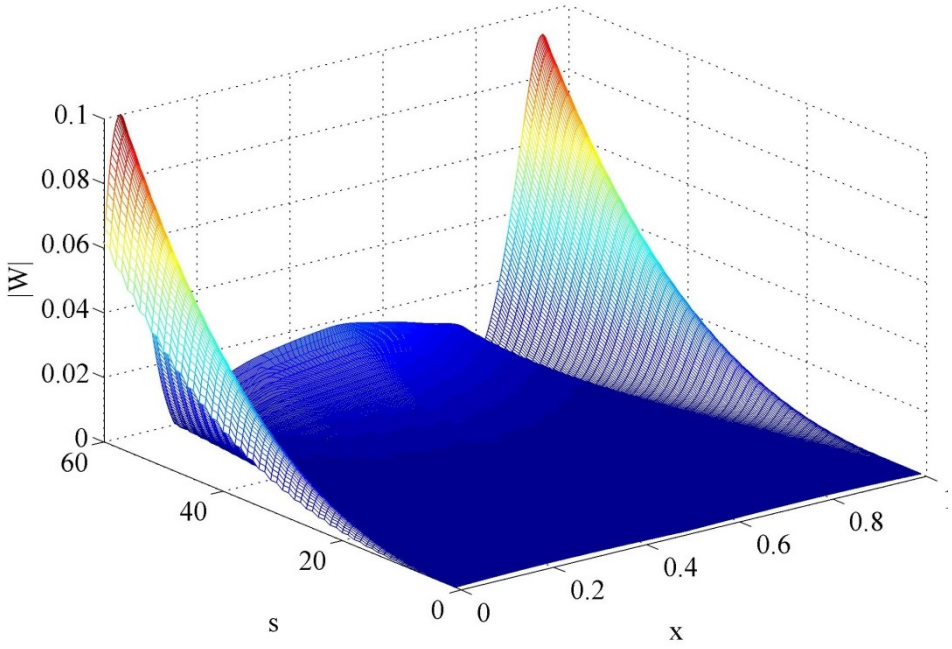
Hasar lokal katılık değişimi olduğundan H'nin yüksek frekanslı bileşenlere sahip olduğu düşünülebilir. Bu durumda H ile ilgili bileşenler ADD ayrıntı katsayıları içinde yer alırlar (Basu 2005, Zhong ve Oyadiji 2007). Öte yandan, veriye karışan parazit, mod şekli sayısal yöntemle elde edilmişse işlem hatalarından, deneysel yöntemle belirlenmişse deneysel ölçüm hatalarından kaynaklanır. Fakat her iki halde de M_h ve M_{hz}'de parazit bulunur. Bunlar aynı şartlarda elde edilmişse iki verideki parazit düzeyi de aynı seviyede olur. Söz konusu parazitlerin en genel halde beyaz gürültü formunda olduğu varsayılmıştır (Zhong ve Oyadiji, 2007). Böyle bir M_h uygun bir dalgacık ve ayrışım düzeyi dikkate alınarak ADD ile analiz edildiğinde, bulunan yaklaşım fonksiyonunun (A_M) M_{hz}'e benzemesi beklenir. Çünkü M_{hz} H'ye göre çok daha düşük frekanslı bileşenlerden oluşur. Daha doğrusu, M_{hz}'i oluşturan küçük frekanslı bileşenler parazit kaynaklı yüksek frekanslı bileşenlere göre daha baskındır. A_M'de de düşük frekanslı bileşenler baskındır. Ancak, veriye karışan parazitler ve ADD işleminin tabiatı[1] dikkate alındığında A_M ve M_{hz}'nin frekans bileşiminin birebir aynı olması beklenemez. Bununla birlikte, uygun dalgacık ve ayrışım düzeyi seçerek A_M ve M_{hz} arasındaki şekil benzerliğini arttırmak mümkündür. *Bu çalışmada amaç; M_{hz} gibi M_h ile korelasyonu yüksek, hasar kaynaklı bileşenlerden arındırılmış bir A_M elde edip bunu referans olarak kullanmaktır*. Bunun için öncelikle verinin uçlarda en az bozulma olacak şekilde genişletilmesi gerekmektedir. Aksi halde, ADD sırasında hasar kaynaklı tekilliklere ek olarak sınırlardaki aşırı genlikli katsayılar da ayıklanır. Bu durumda A_M ve M_h arasındaki şekil benzerliği azalır. Benzer bir durum M_h'nin ölçüldüğü aralıkta ani kesit değişimi, delik, kanal vs hasar dışı yapısal değişimler olması için de geçerlidir. Bu halde ölçülen veride hasar kaynaklı değişimlere ek olarak bu tür form değişimlerine ait

[1] ADD işleminde ölçek (s) ve ayrışım düzeyi (M) arasındaki ilişki $s=2^M$ şeklindedir.

etkiler de bulunur. Bunlar da, hasar gibi, M_h'de lokal süreksizliklere sebep olurlar. Bu bileşenler M_{hz}'de olduğu halde ADD ile M_h'den elde edilen A_M'de olmayacağından A_M ve M_h şekil olarak yeterince uyumlu olmaz. Başka bir deyişle, M_{hz} ve M_h'nin SDD katsayıları farkında bu değişimlere ait pikler bulunmadığı halde A_M ve M_h'nin katsayıları farkında bulunur. Dolayısıyla, ölçüm bölgesinde hasar dışında ani kesit değişimi, delik, kanal vs başka bir süreksizlik olmamalıdır.

2.2.3.1. M_h'nin genişletilmesi

SDD $\pm\infty$ aralığında tanımlı bir dönüşümdür. Fakat gerçekte veri uzunluğu sınırlıdır. Uçlarda verinin kendisi ve türevlerindeki süreksizlikten ötürü SDD katsayıları aşırı genliklere sahip olurlar. Bu durum, hasar bölgesindeki süreksizliği algılamayı güçleştirir. Örneğin, Şekil 2.3a)'daki grafiği elde etmede kullanılan verinin, sınır bozulmasını azaltma ile ilgili hiç bir önlem alınmadan, doğrudan SDD katsayıları hesaplanırsa, sınırlardaki aşırı genliklerden ötürü hasar yerindeki değişim algılanamaz (Şekil 2.10). Hasar sınıra yakın bir konumda olursa bununla ilgili değişimi fark etmek daha da zorlaşır. Bu sebeple, analizden önce, bozulmayı azaltmak için simetrik, asimetrik, periyodik, sıfır ekleyerek (*zeropadding*), spline ekstrapolasyonu ile, polinom uydurarak, n. mertebeden türev sürekliliği sağlayacak şekilde genişletme gibi yaklaşımlar kullanılmaktadır. MATLAB *Wavelet Toolbox*'daki `wextend` komutuyla tek ya da iki boyutlu bir veriyi simetrik, peryodik, asimetrik, sıfır ekleyerek, 0. veya 1. mertebeden türev sürekliliği sağlayacak şekilde genişletmek mümkündür (Misiti ve ark. 2007, p.8-329). Rucka ve Wilde (2006a,b) kübik spline ekstrapolasyonu ile genişletme yaklaşımını kullanmışlardır. Bu şekilde, herhangi bir uçta ikinci mertebeye kadar türev sürekliliği sağlanmıştır. Loutridis ve ark. (2005) kenarları basit mesnetli plak için periyodik genişletmenin bozulmayı azaltmada etkili olduğunu ifade etmişlerdir.



Şekil 2.10 Bozulma azaltma ile ilgili bir önlem alınmaması halinde SDD katsayıları. (Şekil 2.3a ile karşılaştırınız)

Messina (2008) simetrik ve asimetrik genişletme yaklaşımlarını kıyaslamıştır. "Yetersiz", "iyi", "mükemmel" şeklinde derecelendirme yaparak, simetrik genişletmenin 2., 3. ve 4. türev sürekliliğini sağlamak noktasında serbest ve basit mesnetler için "yetersiz" olduğunu, ankastre mesnet halinde 2. türev için "iyi", 3. ve 4. türevler için "yetersiz" olduğunu göstermiştir. Asimetrik genişletmenin basit mesnet halinde ilgili türevler için "mükemmel", ankastre mesnet için "yetersiz" olduğunu bildirmiştir. Serbest mesnet halinde 2., 3. ve 4. türevler için sırasıyla "mükemmel", "iyi" ve "yetersiz" sonuçlarını elde etmiştir. Bunların dışında, bozulmayı azaltmak için pencereleme (*windowing*) yaklaşımı da uygulanmaktadır (Gentile ve Messina 2003). Bu yöntemde veriyi genişletmek söz konusu değildir. Bunun yerine, analizden önce uygun bir pencere fonksiyonu ile veriyi çarparak uçların asimtotik olarak sıfıra gitmesi sağlanır. Fakat pencereleme işlemi hasar kaynaklı tekilliğin etkisini de zayıflatır. Hasar sınıra yakın bir yerde olduğunda bu zayıflama daha fazla olur. Bu durumda, hasar etkisini açığa çıkarmak için N_{VM} değeri daha yüksek bir dalgacık kullanmak gerekir (Gentile ve Messina 2003). Yüksek N_{VM}'nin sakıncası yukarıda izah edilmişti. Dolayısıyla, bu çalışmada pencereleme yaklaşımı göz ardı edilmiştir. Messina (2008)

yukarıdaki genişletme yöntemlerinin her durumda uygun sonuç veremeyeceğini ifade etmiştir. En genel halde sınır şartları belirsiz olabilir. Örneğin bir kirişin tamamı değil de belli bir bölgesi üzerinden mod ölçümü yapılırsa sınır şartları belirsiz olur. Ayrıca, LDV (*laser doppler vibrometer*) ile yüksek çözünürlüklü ölçümlerde veriye beyaz gürültü benzeri parazit karışır (Trentadue ve ark. 2007). Bu durumda ekstrapolasyon temelli yöntemler –sayısal türev hesaplamaya dayandıkları için– bozulmayı azaltmada yetersiz kalırlar. Bu sebeple Messina (2008) optimizasyon temelli yeni bir yöntem geliştirmiştir. Buna göre, önce tüm veri noktaları kullanılarak veriye en küçük kareler yaklaşımı ile polinom uydurulur (çalışmada bu "global eğri uydurma" olarak adlandırılmıştır). Bu polinoma birinci yaklaşım denir. Bu yaklaşım sınırlardaki bozulmayı azaltmak için yeterli değildir. Müteakip optimizasyon işlemi ile polinomun katsayıları sınırlarda bozulma minimum olacak şekilde ayarlanır. Bu yöntem, bozulmayı azaltmak konusunda çalışmada dikkate alınan simetrik ve asimetrik genişletme[1] yaklaşımlarından daha iyi olup sınır şartından bağımsızdır. Fakat işlem süresi açısından bunların gerisindedir.

Mevcut çalışmada, Messina'nın (2008) optimizasyon yöntemindeki gibi, veriyi polinomla genişletme yaklaşımı kullanılacaktır. Fakat referans çalışmadan farklı olarak, polinom uydurma işleminden sonra ikinci bir optimizasyon yöntemi uygulanmayacaktır. Bunun yerine, polinom uydurma sırasında farklı iki parametreyi doğru bir şekilde seçerek bozulmayı azaltma yolu tercih edilmiştir. Önerilen yönteme göre, sınırlardaki bozulmaya etki eden parametrelerden ilki genişletme polinomunun derecesidir (P_d). Diğeri de polinom uydururken dikkate alınan veri noktalarının sayısıdır (N_{cf}). Herhangi bir uçtaki bozulmanın derecesi bozulmadan etkilenen aralık içindeki SDD katsayılarının normu ile ifade edilebilir:

$$B_{L,R} = \left(\sum_{i=N_{L,R}-R(0.25sN_{sp})}^{N_{L,R}+R(0.25sN_{sp})} W(s,i)^2 \right)^{0.5} \tag{2.18}$$

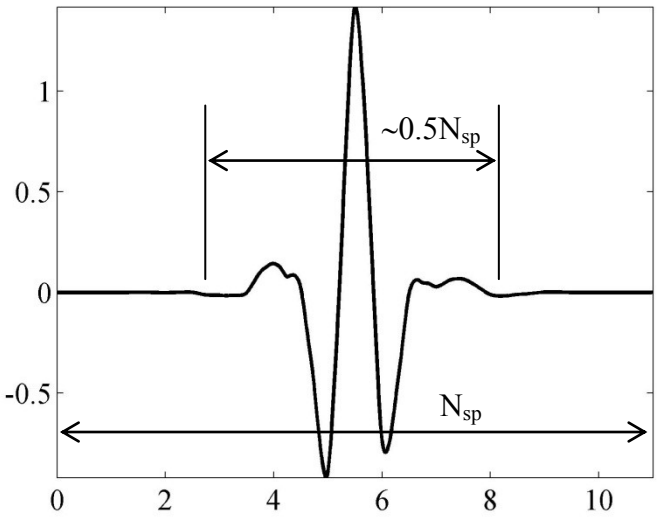
[1] Referans çalışmada simetrik genişletme için *turnover*, asimetrik genişletme için de *rotation* tabirleri kullanılmıştır.

burada L ve R indisleri sol ve sağ tarafı ifade eder. Uzunluğu N_M olan ayrık değerli verinin her iki tarafına N_g terim ekleyerek genişletme yapılırsa $N_L=N_g$ ve $N_R=N_g+N_M$ olur. Ayrık veri noktalarından ötürü "i" indisinin tamsayı olması gerekir, bu sebeple R(●) en yakın tamsayıya yuvarlatma anlamındadır. symN dalgacığının sıfırdan önemli derecede farklı değerler aldığı aralığın genişliği yaklaşık $0.5N_{sp}$'dir (örneğin sym6 için bkz. Şekil 2.11). Bir s ölçeğinde dalgacığın genişliği sN_{sp} ve SDD işlemi fonksiyonun dalgacık fonksiyonu ile konvolüsyonu olduğundan, örneğin sol uçta bozulmadan etkilenen aralığın genişliği $0.5sN_{sp}$ olarak kabul edilebilir (Şekil 2.12). Sağ taraf için de aynı kabul geçerlidir.

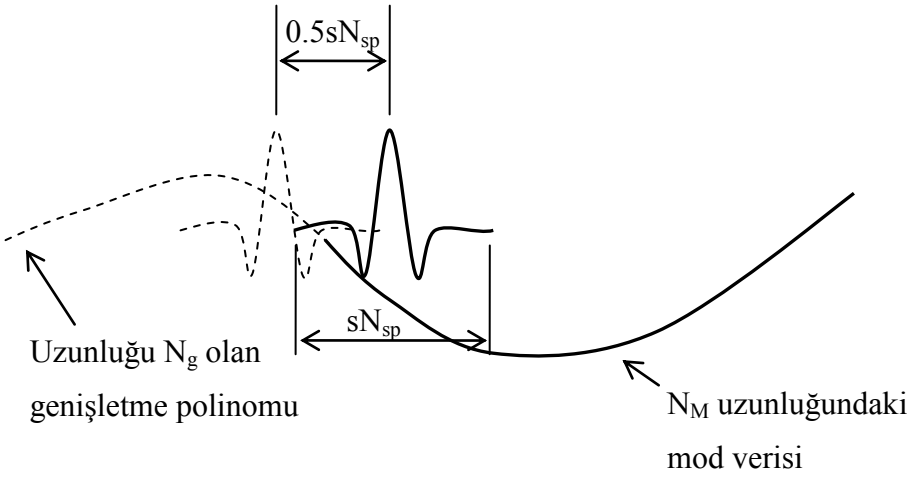
Genişletme polinomunun derecesi eşitlik (2.18)'deki bozulmayı hesaplamak için kullanılan symN dalgacığının N_{VM}'sine göre seçilmelidir. Bu çalışmada $P_d=N_{VM}-1$ alınması önerilmiştir. Çünkü dalgacık en fazla (N_{VM}-1). dereceye kadarki polinomlara diktir. Dolayısıyla, bu dereceye kadarki türev süreksizliklerini algılayabilmektedir. Eğer $P_d<N_{VM}-1$ olursa polinomun derecesinden yüksek mertebeli türevlerde süreksizlik oluşur. Bu durumda bozulma miktarı artar. $Pd>N_{VM}-1$ halinde (2.4) eşitliğindeki ortgonallik şartı sağlanmayacağı için bozulmalar artabilir. Öte yandan, uygun N_{cf} için kesin bir şey söylemek zordur. Fakat bozulma üzerinde sınıra yakın belli bir aralıktaki veri parçası etkilidir. Bu sebeple $N_{cf}<N_M$ olmalıdır. Bunun anlamı, tüm veriyi en uygun temsil eden polinomun bozulmayı en az yapan polinom olmamasıdır. Bu durumda, belli bir uç için $[P_d+1,N_M]$ [1] aralığındaki tüm N_{cf} değerleri denenerek polinom uydurulur ve bunların içinden eşitlik (2.18)'de tanımlanan bozulmayı en az yapan N_{cf} değeri seçilebilir. Bu işlemleri yaparken, genişletme ölçeği s'nin çok küçük seçilmemesi gerekir. Çünkü küçük ölçeklerde parazit baskın olduğundan, sayısal işlemlerin stabilitesi bozulur (Messina 2008).

[1] Derecesi P_d olan bir polinomda P_d+1 adet belirsiz katsayı vardır. En küçük kareler anlamında en uygun polinom uydurulurken bilinmeyen sayısı kadar eşitlik elde etmek için en az P_d+1 adet nokta kullanılmalıdır.

Önerilen genişletmenin optimum çözüme yakınlığını kontrol amacıyla yine veriye P_d. dereceden polinom uydurulacak, fakat bu kez polinomun katsayıları amaç fonksiyonu eşitlik (2.18) olan bir optimizasyon probleminin çözümü ile bulunacaktır. Bu durumda lokal minimuma yakalanma riski söz konusudur. Bunu aşmak için global optimizasyon temelli bir yöntem olan *Shuffled Complex Evolution* (Duan ve ark. 1993) algoritmasına göre yazılmış programdan yararlanılacaktır.



Şekil 2.11 sym6 dalgacığı. N_{sp} = 2x6-1=11.



Şekil 2.12 Sol uçta bozulmadan etkilenen aralık.

2.2.3.2. Uygun yaklaşım fonksiyonunun elde edilmesi

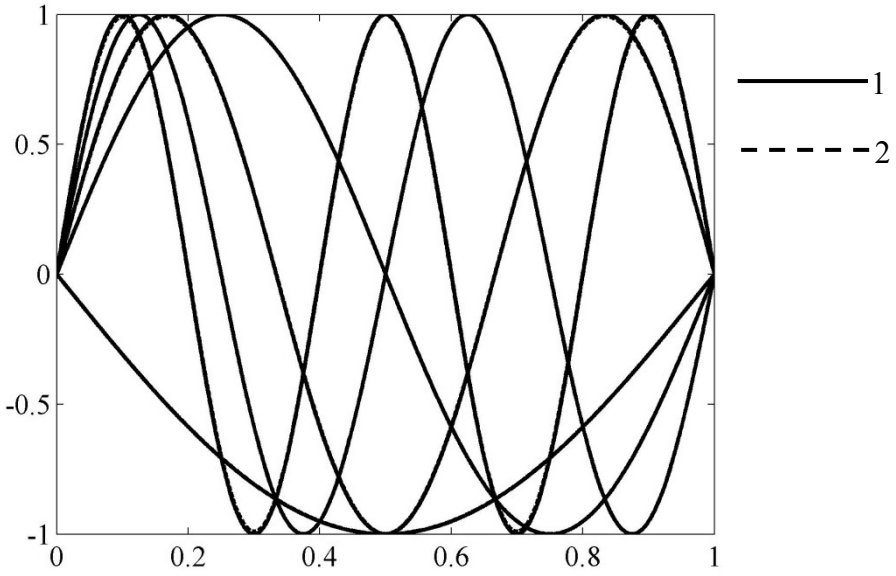
Bu adımda, M_h ile korelasyonu yüksek bir A_M elde etmek için ADD'de kullanılacak symN dalgacığının N_{VM} değeri ve uygun ayrışım düzeyi (M) belirlenir. Herhangi bir düzeydeki A_M ile M_h arasındaki korelasyonu sayısal olarak göstermek üzere deneysel modal analizde iki titreşim modunun (M_1 ve M_2)[1] benzerliğini ifade etmede kullanılan MAC (*modal assurance criterion*) indisinden yararlanılacaktır (Ewins 2000, p.424):

$$\mathrm{MAC}(M_1, M_2) = \frac{\left(M_1^T M_2^*\right)^2}{\left(M_1^T M_1^*\right)\left(M_2^T M_2^*\right)} \tag{2.19}$$

Titreşim modları en genel halde karmaşık sayı dizileri olduğundan, eşitlikteki * sembolü karmaşık eşlenik anlamındadır. MAC indisi 1'e ne kadar yakınsa M_1 ve M_2 arasındaki benzerlik o kadar fazladır.

A_M ve M_h arasındaki benzerliği ölçmek üzere MAC(A_M,M_h) indisi önerilmiştir. Çünkü hasar lokal bir etki olduğundan, hasar derecesi ve parazit miktarı çok fazla olmamak kaydı ile M_h ve M_{hz} birbirine form olarak çok benzer. Örneğin, Şekil 2.3a)'daki yüzey grafiğini elde etmede kullanılan kirişin sağlıklı ve hasarlı haldeki ilk beş titreşim modu Şekil 2.13'deki gibidir. Görüldüğü gibi hasar sebebiyle titreşim modlarında meydana gelen değişiklik fark edilemeyecek derecede küçüktür.

[1] M_1 ve M_2 sütun vektörlerdir.



Şekil 2.13 Sağlıklı (1) ve hasarlı (2) haldeki kirişin ilk 5 titreşim modu.

$MAC(A_M,M_h)$ indisinden başka, bunların eğim ve eğrilikleri arasındaki yakınlığı ifade eden $MAC(A_M',M_h')$ ve $MAC(A_M'',M_h'')$ indisleri de A_M ve M_h'nin yakınlığı hakkında bilgi içerir ($' = d/dx$). Çünkü ADD ayrışım düzeyi M arttıkça ayrıntı fonksiyonu daha düzgün hale gelir ve lokal tekilliklerden arınır. Dolayısıyla bu indisler düşmeye başlar. İndislerin düşmesi A_M ve M_{hz} arasındaki benzerliğin arttığına işaret eder. Daha yüksek mertebeden türevler parazitten fazla etkilendiğinden bunlar göz ardı edilmiştir. Ayrıca, parazit türev hesaplama işleminde hatalara sebep olduğundan $MAC(A_M',M_h')$ ve $MAC(A_M'',M_h'')$ indisleri de yetersiz kalabilir. Bu durumda, bir düzeydeki yaklaşım enerjisinin toplam enerjiye oranı da iki verinin yakınlığını anlamada yardımcı olabilir:

$$E_A = \frac{\mathbf{S}_M^T \mathbf{S}_M}{\mathbf{S}_M^T \mathbf{S}_M + \sum_{m=1}^{M} \mathbf{W}_m^T \mathbf{W}_m} \tag{2.20}$$

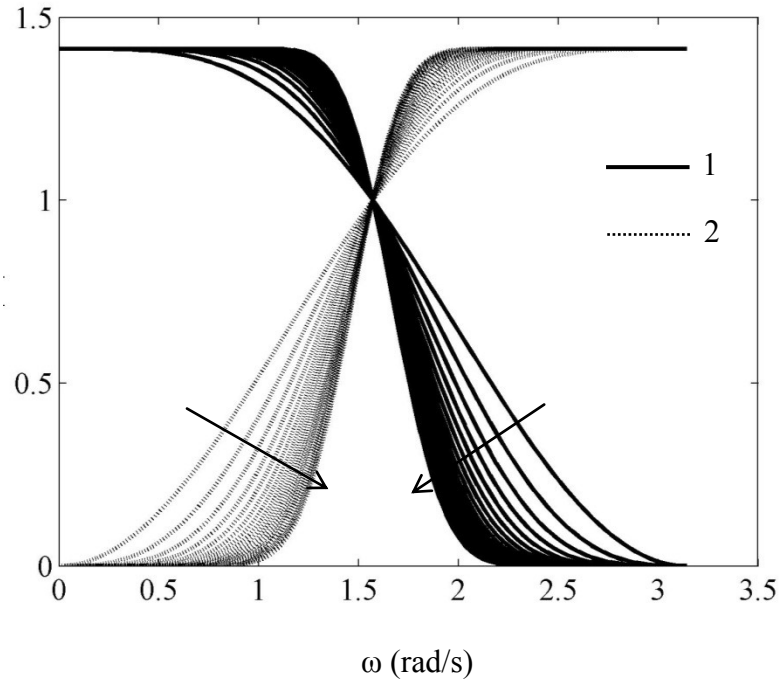
Burada $\mathbf{S}_M$ M. düzeydeki yaklaşım katsayıları vektörü, $\mathbf{W}_m$ de m. düzeydeki ayrıntı katsayıları vektörüdür (bkz. Şekil 2.5). Düzey arttıkça yaklaşım katsayıları içindeki

yüksek frekanslı bileşenler ayıklanır, böylece yaklaşım katsayılarının enerjisi azalır. Dolayısıyla, E_A da MAC indisleri gibi değişir.

Bu çalışmada, herhangi bir düzeydeki A_M'nin M_h ile korelasyonunu arttırmak üzere ADD'de N_{VM}'si yüksek bir dalgacık kullanmak önerilmiştir. Çünkü N_{VM} arttıkça dalgacığın ölçek ve dalgacık filtrelerine ait frekans spektrumları daralır (Stark 2005, p.60). Örneğin symN dalgacığı için N=2,3,…,20 değerlerinde ölçek ve dalgacık filtrelerinin spektrumları Şekil 2.14'deki gibi değişir. Görüldüğü gibi N arttıkça filtre özellikleri iyileşmektedir. Filtre özelliklerindeki bu değişim ölçek ve dalgacık fonksiyonlarına da yansır; artan N ile ölçek ve dalgacık fonksiyonlarının frekans spektrumları daralır (Addison 2002, p.105). Başka bir deyişle, dalgacığın frekans ortamındaki lokalizasyonu N_{VM} ile artar (Debnath 2002, p.374). Yüksek N_{VM} kullanıldığında sıfırdan farklı dalgacık katsayılarının sayısı azalır (Walnut 2002, p.373). Yani dalgacığın veri sıkıştırma kabiliyeti artar. Bu durumda, bir M düzeyinde daha yüksek N_{VM}'li dalgacıkla elde edilmiş A_M'nin M_h ile korelasyonunun daha fazla olması beklenir. Çünkü bu halde ölçek fonksiyonunun düşük frekanslı bileşenlere duyarlılığı artar. M_h de düşük frekanslı bileşenlerin baskın olduğu bir veridir. Dolayısıyla, A_M ve M_h'nin form olarak benzerliğini arttırmak üzere N_{VM}'si yüksek bir dalgacık kullanmak uygun görünmektedir.

Uygun yaklaşım fonksiyonunu belirlemede ayrışım düzeyinin (yani M sayısının) de etkisi vardır. N_{VM}'si yüksek bir dalgacık seçilip M 1'den başlayarak arttırılırsa, yukarıdaki MAC ve E_A indisleri azalmaya başlar. Bunun sebebi, A_M'deki hasar ve yüksek parazit kaynaklı bileşenlerin ayıklanmasıdır. Böylece A_M'nin M_{hz}'ye benzerliği artar. Çünkü ikisinde de düşük frekanslı bileşenler baskındır. ADD'de ölçek ve düzey arasındaki ilişki $s=2^M$ şeklinde olduğundan, artan M ile indislerdeki düşüş de fazlalaşır. Belli bir düzeye gelindiğinde indislerdeki azalma kabul edilemez hale gelir. Bu durumda A_M ve M_h form olarak benzerliğini kaybeder. *Hâlbuki ideal A_M form olarak M_h ile çok uyumlu olmalı ve hasar kaynaklı bileşenler A_M'de bulunmamalıdır*. $MAC(A_M,M_h)$ indisinin önemli derecede düşmesi ikisi arasındaki benzerliğin azaldığına işaret eder. İşte bu önemli düşüşün görüldüğü düzeyden bir önceki düzeydeki A_M uygun

yaklaşım fonksiyonu olarak kullanılabilir[1]. Daha yüksek düzeylerde A_M'den sadece hasar ve yüksek frekanslı parazitler değil, A_M'ye şeklini veren temel bileşenler de ayrılır. Dolayısıyla bu düzeyler kabul edilemez. Uygun düzey veri uzunluğuna bağlıdır; yüksek çözünürlüklü veride bu değer daha yüksek olur. Ek olarak, yüksek mertebeden titreşim modlarının temel frekansı daha yüksek olduğundan, uygun ayrışım düzeyi mod indisi ile ters orantılıdır.



Şekil 2.14 symN (N=2,3,…,20) dalgacığının filtre katsayılarının frekans spektrumları. Ok yönünde N artmaktadır. 1: Ölçek filtresi, 2: Dalgacık filtresi.

Uygun yaklaşım fonksiyonu elde edildikten sonra HT için aşağıdaki indisler hesaplanır:

$$I_I = W_{M_h}(s,x) - W_{M_{hz}}(s,x) \tag{2.21a}$$

$$I_{II} = W_{M_h}(s,x) - W_{A_M}(s,x) \tag{2.21b}$$

[1] Bu A_M ideal değildir ama alternatifler içerisinde en iyisidir. Çünkü hem içindeki hasar kaynaklı tekillikler olabildiğince ayıklanmıştır hem de M_h ile şekil benzerliği hala yüksektir.

$$I_{III}=W_{M_h}(s,x) \qquad (2.21c)$$

burada W(s,b) s ölçeğinde x noktasında hesaplanan SDD katsayılarıdır. M_h, A_M, M_{hz} alt indisleri bu katsayıların sırasıyla M_h, A_M ve M_{hz} verileri ile hesaplandığını gösterir. I_I ve I_{III} indisleri kullanılagelen iki yaklaşımı ifade eder; birincisinde hasarlı yapı verisine ek olarak sağlıklı haldeki verinin katsayıları da referans olarak kullanılır. İkincisinde ise sadece hasarlı yapı verisine ihtiyaç duyulur. I_{II} de sadece hasarlı yapı verisini (M_h) kullanır. Fakat hasar teşhisini kolaylaştıran referans veriyi ADD'nin çok-çözünürlüklü analiz özelliğinden yararlanarak M_h'den elde eder.

2.3. Titreşim Modlarının Deneysel Ölçümü

(2.21)'de verilen hasar indislerini gerçek veriyle test etmek üzere kiriş, plak, sac parça gibi yapıların serbest titreşim modları ölçülmüştür. Bu deneylerde aynı donanım ve ölçülen veriden titreşim modlarını elde etmede aynı yöntem kullanılmıştır. Dolayısıyla, deneysel prosedürün dayandığı teori ve başlıca uygulama adımları verilecek, parçaya göre farklılık arz eden durumlardan yeri geldikçe bahsedilecektir.

2.3.1. Teorik temeller

Tek serbestlik dereceli, viskoz sönümlü bir kütle-yay sistemi (Şekil 2.15a) için hareket denklemi $m\ddot{\quad}\ \dot{\quad}\ )=f(t)$ biçimindedir. $\omega_n=\sqrt{k/m}$ ve $\xi=c/(2\sqrt{km})$ olarak tanımlanır ve eşitliğin her iki tarafının FD'si hesaplanırsa, reseptans ($\alpha(\omega)$) biçimindeki FCF

$$\alpha(\omega)=\frac{X(\omega)}{F(\omega)}=\frac{1/k}{1-(\omega/\omega_n)^2+2i\xi(\omega/\omega_n)}, \qquad i=\sqrt{-1} \qquad (2.22)$$

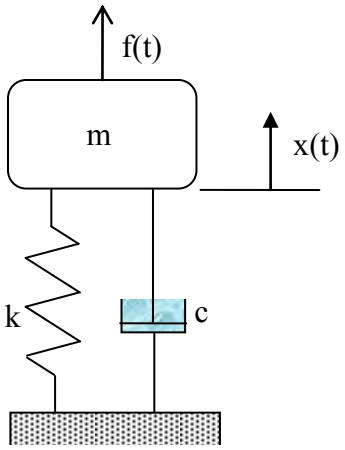
şeklinde bulunur (Ewins 2000, p.32). Burada X(ω) ve F(ω) sırasıyla yer değiştirme (x(t)) ve kuvvetin (f(t)) FD'sidir. Reseptansın reel ve sanal kısımlarının farklı ξ değerleri için değişimi Şekil 2.15b'deki gibidir. Görüldüğü gibi doğal frekansta (ω_n=10 rad/s) reel kısım sıfırlanmakta, FCF üzerinde sanal kısım etkili olmaktadır. Sönüm oranı azaldıkça sanal kısmın etkisi fazlalaşmaktadır. N serbestlik dereceli bir yapı için genelleme yapılarak reseptans matrisinin bir elemanı

$$\alpha_{jn}(\omega)=\frac{X_j(\omega)}{F_n(\omega)}=\sum_{r=1}^{N}\frac{\phi_{jr}\phi_{nr}/k_r}{1-(\omega/\omega_r)^2+2i\xi_r(\omega/\omega_r)} \tag{2.23}$$

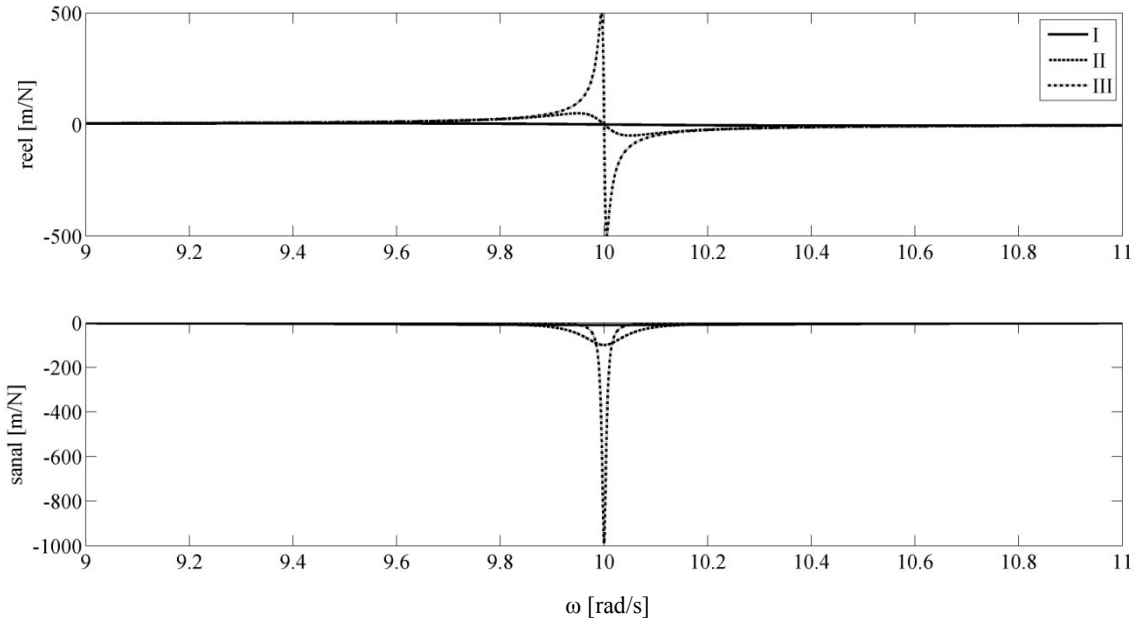
şeklinde yazılabilir. Bu sayı n. serbestlik noktasına uygulanan birim kuvvete karşılık j. serbestliğin hareket miktarını ifade eder. "r" titreşim modlarının sayısını gösteren indistir. Bu durumda r indisli terimler ilgili moda ait parametreleri gösterir: ω_r: r. doğal frekans, k_r: r. modal katılık, ξ_r: r. modal sönüm oranı, ϕ_{jr}: r. modda j. serbestliğin hareket miktarı. Elemanları α_{jn} olan FCF matrisi simetriktir; $\alpha_{jn} = \alpha_{nj}$ (He ve Fu 2001, p.101). Bu sebeple, titreşim modlarını elde etmek için FCF matrisinin tek bir satır ya da sütununu ölçmek yeterlidir. Hafif sönümlü (ξ<%1)[1] ve ayrık modlu yapılarda α_{jn}'nın da sanal kısmı doğal frekanslarda tepe yapar ve reel kısmı sıfır olur. Bu durumda, doğal frekanslarda yapının aldığı şekli ifade eden $\boldsymbol{\phi}_r$ [2] vektörü reseptans terimlerinin sanal kısımları ile belirlenebilir; sanal kısmın genliği ilgili noktanın modal genliğini, işareti de hareket yönünü tayin eder. Bu şekilde modların belirlenmesine *quadrature picking* denir (Gade ve ark. 1999). Uygulamada genellikle yer değiştirme yerine ivme ölçülür. Bu durumda FCF'nin akselerans ($a_{jn}(\omega)$) formu elde edilir. Bununla reseptans arasındaki ilişki $a_{jn}(\omega)=(i\omega)^2\alpha_{jn}(\omega)$ şeklinde olup, doğal frekans civarında reel ve sanal kısımların değişimi benzerdir. Dolayısıyla, akseleransın sanal kısmının doğal frekanslardaki değerleri ile de titreşim modları belirlenebilir.

[1] Örneğin çelikte sönüm oranı yaklaşık %0.5'dir (Yan ve ark. 2004).

[2] Bu vektörün elemanları olan ϕ_{jr} sayıları boyutsuz olup serbestlik noktalarındaki modal genliklerin oranlarını içerirler.



a)



b)

Şekil 2.15 Tek serbestlik dereceli, viskoz sönümlü kütle-yay sistemi ve bunun reseptans formundaki FCF'sinin reel ve sanal kısımları. I:ξ=0.05, II=ξ=0.005, III: ξ=0.0005. k=1 N/m ve ω_n=10 rad/s olarak seçilmiştir.

2.3.2. Deneysel çalışma

Ölçümler Brüel&Kjaer (B&K) markalı iki kanallı bir titreşim ölçüm seti (*PULSE Lite Vibration Package*) ile gerçekleştirilmiştir. Setin temel elemanları Şekil 2.16a)'da gösterilmiş, öne çıkan teknik özellikleri Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2 Titreşim ölçüm setindeki elemanların temel özellikleri.

No	Adı	Özellikler
1	Bağlantı kablosu	4-6 ve 2-6 arasındaki bağlantıyı sağlar, uzunluğu 5m'dir.
2	Modal Çekiç	Tip numarası B&K8206-003, ucundaki kuvvet transdüserinin duyarlılığı 1.08mV/N ve ölçüm aralığı ± 5V için 4448 N'dur. Toplam kütlesi 230 gr, vuruş sırasındaki etkin kütle 100 gr.
3	Çekiç uçları	Biri alüminyum, biri plastik ve diğeri kauçuk olmak üzere toplam 3 adet çekiç ucu vardır. Bunların kesim frekansları sırasıyla 1000 Hz, 310Hz ve 40Hz'dir.
4	İvmeölçer	Tip numarası B&K 4514, rezonans frekansı 27.5 kHz, frekans aralığı 1Hz-10kHz, ölçüm aralığı ±500g, duyarlılığı 1mV/ms^{-2} ve kütlesi 8.69 gr'dır. Yüksekliği 23mm ve en büyük çapı 12 mm'dir.
5	İvmeölçer altlığı	Kütlesi 17.15 gr, çapı 24 mm ve kalınlığı 5 mm'dir. Manyetik özelliği çelik türü parçalara yapışmasını sağlar.
6	PC Card Front End	Alt ve üst örnekleme frekans aralıkları sırasıyla 7Hz ve 20kHz'dir. 16 bitlik ADC sağlayan cihazda 2 tane analog giriş, 2 tane de takometre girişi bulunmaktadır. Cihaz bilgisayara 68 pinli PCMCI Type II slot üzerinden bağlanmaktadır.

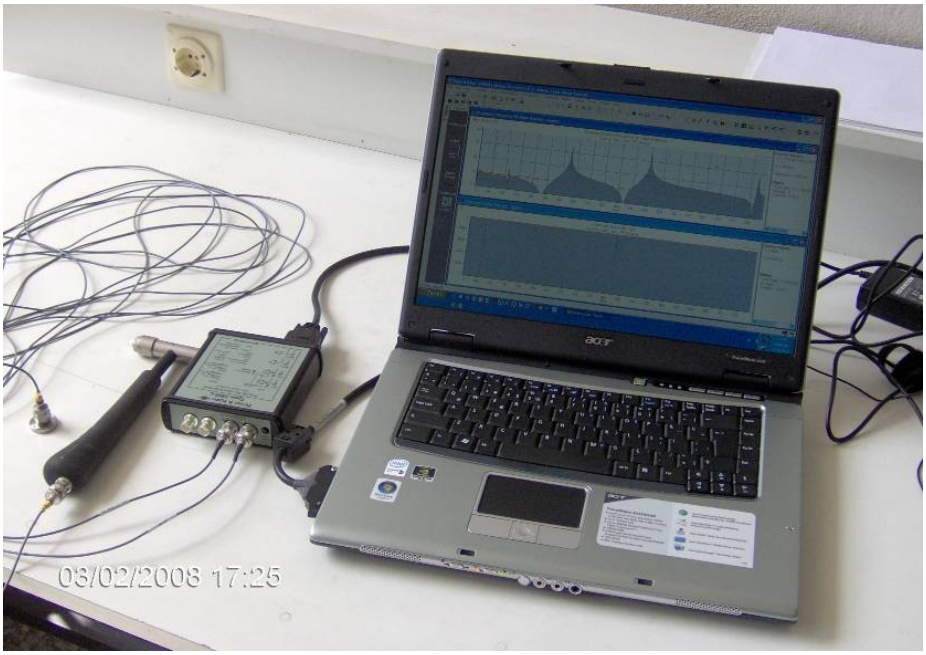
Bu setle "Acer TravelMate TM4233WLMİ"[1] marka bir dizüstü bilgisayar kullanılmıştır. Bilgisayar ve ölçüm elemanlarının montajı Şekil 2.16b)'deki gibidir. Plak ve sac parça deneylerinde lokal kütle etkisini azaltmak üzere B&K 4394 kodlu minyatür ivmeölçer kullanılmıştır. Bunun kendine has yüzeye yapıştırma adaptörü vardır.

[1] Bilgisayarın öne çıkan özellikleri: 1.66 GHz Core^{TM} 2 Duo işlemci, 1GB DDR2, 120 GB HDD, 1 adet PCMCI Type II kart girişi.

Adaptörle birlikte toplam kütlesi yaklaşık 3 gramdır [1]. Ölçülen veriden FCF'leri elde etmek üzere titreşim ölçüm seti ile birlikte gelen B&K PULSE v13.1 yazılımı kullanılmıştır.



a)



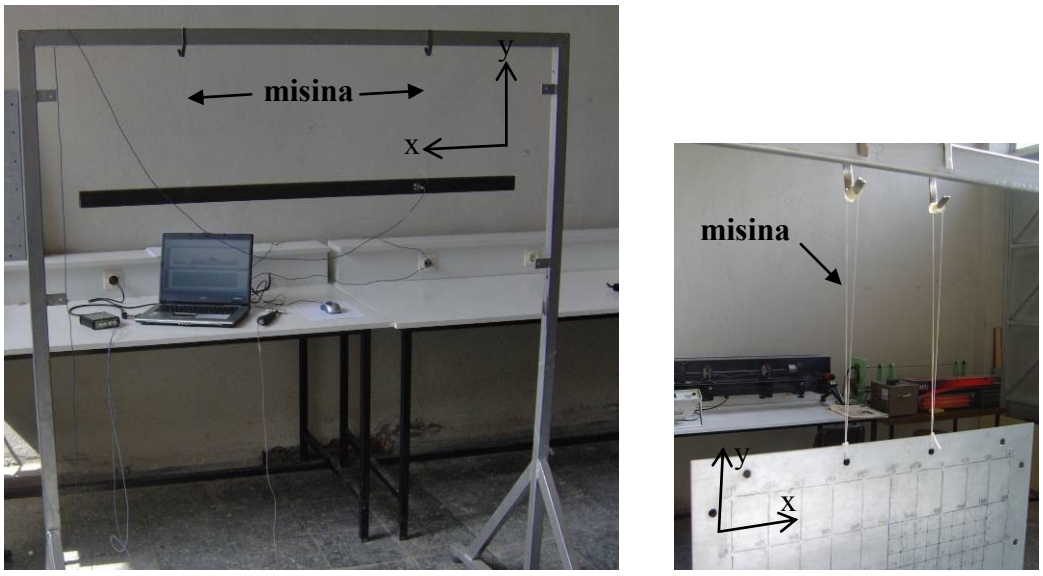
b)

Şekil 2.16 Titreşim ölçüm setinin temel elemanları ve bilgisayarla bağlantısı.

[1] Diğer özellikleri: frekans aralığı 1-25 kHz, rezonans frekansı 52.9 kHz, dinamik aralığı (T<100°C için) ±700x9.81 ms^{-2}, yüksek geçiş kesim frekansı 0.037 Hz, alçak geçiş kesim frekansı 40 kHz, çapı 7.3mm, boyu 14.1 mm.

2.3.2.1 Donanımla ilgili ayarlar

Deney için ilk olarak parçanın uygun bir şekilde mesnetlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, kolaylık açısından **serbest mesnetleme** dikkate alınmıştır. Bu amaçla parçalar uygun yerlerden misina ile asılmıştır. Darbe ve ivme ölçümü askılama düzlemine dik doğrultudadır. Bir titreşim modunun askılamadan en az etkilenmesi için askı elemanının titreşim doğrultusundaki hareketi olabildiğince az kısıtlaması istenir. Kural olarak, askılama, rijit cisim mod frekansının en düşük elastik mod frekansının 10'da 1'i veya daha az olmasını sağlıyorsa yeterlidir (Anonim 1997). Kirişle yapılan deneylerde askılama birinci mod şeklinin düğüm noktalarına yakın yerlerden yapılmıştır. Plak ve sac parça deneylerinde test parçası kenara yakın yerlerden açılan deliklerden asılmıştır (Şekil 2.17).



Şekil 2.17 Kiriş ve plakta misina ile askılama. Darbe ve ölçüm doğrultuları xy düzlemine dik doğrultudadır.

İkinci husus uygun bir **ivmeölçer konumu** belirlemektir. Bir mod şeklinin düzgün bir şekilde ölçülebilmesi için ivmeölçer ilgili modun düğüm noktalarından uzağa konumlandırılmalıdır. Çünkü buralarda modal genlik sıfıra yakındır, dolayısıyla ölçüm kalitesi yeterli değildir. Bununla birlikte, modal genliğin maksimum olduğu noktaya yerleştirmek de sorun oluşturabilir; bu halde ivmeölçer kütlesi lokal kütle ekleme etkisi

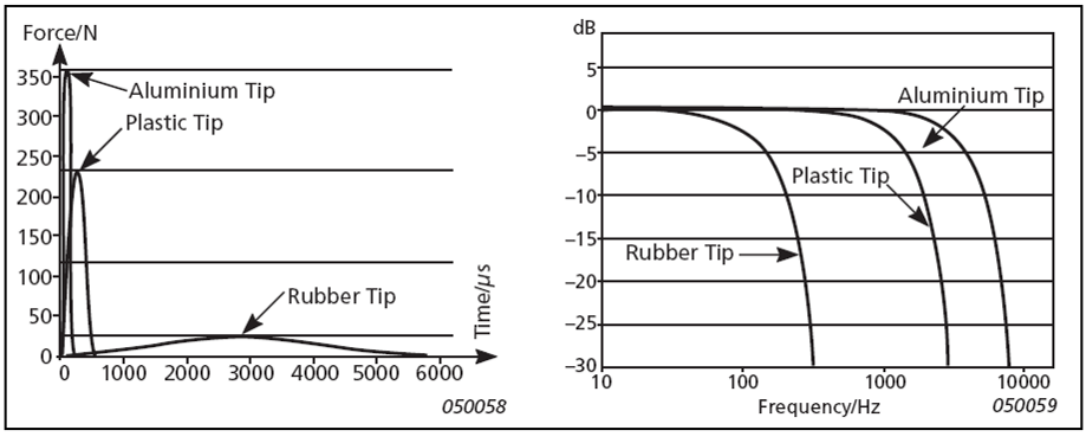
yaparak parçanın dinamik davranışını değiştirebilir. Bu durumda yine kural olarak (Anonim 1997), bir noktaya ivmeölçer takılıp bir FCF ölçülür. Aynı noktaya ivmeölçer kütlesine eşit bir kütle daha ekleyerek ikinci bir FCF ölçülür. İkinci FCF'de rezonans frekanslarındaki genliklerin yeri frekans ekseninde birincisine göre önemli derecede sola kaymamalıdır. Aksi halde, ivmeölçerin lokal kütle ekleme yapması söz konusudur. Bahsedilen değişim %1'den az oluyorsa sorun yoktur. Aksi halde başka bir konuma bağlanmalı veya kütlesi daha az bir ivmeölçer kullanılmalıdır. Bu çalışmada kirişle yapılan deneylerde B&K4514 nolu ivmeölçer kullanılmıştır. Bu eleman 1. mod şeklinin düğüm noktasına yakın bir yere konumlandırılmıştır. Bu nokta 1.modu ölçmeyi engelleyecek kadar düğüm noktasına yakın değildir. Sac parça ve plak deneylerinde lokal kütle ekleme etkisini en aza indirmek amacıyla B&K4394 nolu "minyatür ivmeölçer" kullanılmıştır. Farklı konumlardan ölçülen FCF'ler karşılaştırılarak ölçüm aralığındaki modlara en duyarlı nokta belirlenmeye çalışılmıştır.

İvmeölçerin yapı ile bağlantısı da ölçümün kalitesini etkiler. Bağlantı yeterince rijit olmalıdır. B&K4514 ivmeölçerin kendine has mıknatıs altlığı vardır (Şekil 2.16a)'da 5 nolu parça). Bununla çelik parçalara yeterli sıkılıkta bağlantı sağlanmaktadır. B&K4394 ivmeölçer yüzeye yapıştırıcı ile bağlanmaktadır. Bunun için Japon yapıştırıcısı kullanılmıştır.

DD temelli HT uygulamalarında **veri çözünürlüğü**nün yüksek olması istenir. Fakat çekiç testi ile bunu sağlamak zordur. Çekiç testinde, veriye karışan paraziti azaltmak amacıyla bir ölçüm noktasından birden fazla FCF ölçülerek ortalaması alınır. Ardışık darbeleri her defasında aynı noktadan aynı doğrultuda yapmak zordur. Dolayısıyla konumsal örnekleme mesafesini 1-2mm gibi küçük değerlerde almaya çalışmak, pratik olarak zor olmakla birlikte, hatalı ölçüme sebep olur. Bu nedenle, testlerde örnekleme mesafesi 10mm'den büyük seçilmiştir.

Ölçmek istenilen frekans aralığına göre **çekiç ucu** seçilir. Doğal frekansları yüksek yapılar için sert uç kullanmak gerekir. B&K8206-003 nolu çekiç için üç farklı uç seçeneği mevcut olup, ürün kataloğunda bunların spektrum özellikleri Şekil

2.18'deki gibi gösterilmiştir. Sağlıklı bir şekilde tahrik edilen frekans aralığı spektrum grafiğinde 10 dB düşüş olan noktaya kadardır (Anonim 1997). Buna göre kauçuk, plastik ve aluminyum uçlarla sırasıyla yaklaşık 0.4, 4 ve 8 kHz'e kadarki modlar tahrik edilebilir. Deneylerde kiriş gibi eğilme direnci yüksek parçalar için plastik uç; plak ve karmaşık şekilli sac parça için kauçuk uç kullanmanın uygun olduğu görülmüştür.



Şekil 2.18 B&K8206-003 nolu modal çekiç için uç seçenekleri ve spektral özellikleri.

2.3.2.2 Yazılımla ilgili ayarlar

Yukarıdaki hazırlıklardan sonra, ölçülen verilerin bilgisayar ortamında işlenmesiyle ilgili çeşitli ayarlar yapılır. Bunlardan ilki kuvvet ve ivme sinyallerine **pencereleme** uygulamakla ilgilidir. FD'de analiz edilen sinyal peryodik olmazsa sızıntı (*leakage*) denen durum ortaya çıkar; sinyalin gerçek spektrumu sinyal enerjisinin doğal frekanslar dışındaki diğer frekanstaki harmoniklere bölünmesiyle bozulur (Ewins 2000). Sinyalin periyodik olması sınırlarda sinyal değeri ve türevlerinde süreklilik sağlar, dolayısıyla FD daha az bileşenle yakınsar. Hafif sönümlü parçalarda kayıt süresi genellikle cevap sinyalinin sıfırlanmasına yetecek kadar uzun olmaz. Bu durumda sinyal periyodiklik şartını sağlamadığından ya da peryodik veri elde etmek için ne kadarlık bir sinyal parçasını dikkate almak gerektiği bilinmediğinden doğrudan FD hesaplanması sızıntı problemine neden olur. Bunu önlemenin bir yolu kayıt süresini (ve dolayısıyla frekans çözünürlüğünü) sinyalin sıfırlanmasını sağlayacak derecede arttırmaktır. Bu

durumda ölçüme karışan parazit miktarı da artar. Dolayısıyla FCF eğrisini düzgünleştirmek (*smoothing*) için daha fazla sayıda ortalama almak gerekir. Ayrıca, kayıt süresi arttıkça frekans çözünürlüğü de arttığından analizörün kapasitesi yeterli olmayabilir. Bu durumda sıklıkla başvurulan diğer bir yöntem sinyali analizöre göndermeden önce bir pencere fonksiyonuyla çarpmaktır. Çekiç-darbe testinde geçici türde sinyaller söz konusu olduğundan eksponensiyel pencere tavsiye edilmektedir. Bu pencerenin frekans spektrumu incelendiğinde düşük frekanslarda kazancın daha fazla olduğu, frekans arttıkça azaldığı görülür. Yani eksponansiyel pencere düşük frekanslı bileşenleri kuvvetlendiren, buna karşılık yüksek frekanslı bileşenleri zayıflatan bir filtre gibi davranır (Ewins 2000). Sinyali bu pencere ile çarpmanın pratik sonucu test parçasına sönüm eklemektir. FCF bir oran olduğundan kuvvet ve ivme sinyallerine farklı pencereler uygulanırsa FCF'nin faz bilgisi bozulur. Bu durumda kuvvet verisine de aynı pencere tatbik edilir. Zaman verisine uygulanacak eksponansiyel pencerenin tanımı

$$w(t)=\begin{cases} 0, & 0<t<t_0 \\ e^{-(t-t_0)/\tau}, & t_0<t<T \end{cases} \tag{2.24}$$

şeklindedir (McConnell 1995). Burada t_0 ve T sırasıyla zaman eksenindeki kaydırma miktarını ve kayıt süresini temsil ederler. Sinyallerin sıfırdan başlaması istendiği için zaman ekseninde bir miktar kaydırma yapılır. Bu kaydırma aşırı derecede olursa veri kaybı meydana gelir. Bu sebeple, deneylerde kaydırma miktarı 10 milisaniye civarında alınmıştır. τ pencere sabitini gösterir. Hafif sönümlü yapılarda zaman verisi kayıt süresi sonunda sönmüyorsa $\tau=0.25T$ alınması tavsiye edilmektedir (Anonim 1997). Deneyde kullanılan çelik kirişte ve plakta sönüm çok az olduğundan bu öneriye uyulmuştur. Fakat karmaşık şekilli sac parçada, bu da hafif sönümlü olmasına rağmen, sönüm biraz daha fazla olduğundan McConnell (1995)'in yaklaşımıyla τ belirlenmiştir. Buna göre, bir ivme verisi ölçülerek başlangıçtaki genliğin kayıt süresi sonundaki değere oranı belirlenir. Pencere sabiti bu oranı %2 yapacak tarzda seçilir.

Yazılımla ilgili bir diğer ayarlama **ortalama sayısı**yla ilgilidir. Ölçüme karışan parazitleri azaltıp FCF'yi düzgünleştirmek üzere bir noktadan ardışık birkaç FCF ölçülerek ortalaması alınır. Çekiç-darbe testinde önerilen ortalama sayısı 4-8 arasındadır (Anonim 2005).

Yazılım ortamında **frekans çözünürlüğü** de belirlenir. Kiriş gibi hafif sönümlü parçalarda rezonans civarında sivri tepeler oluşur. Bu durumda, sızıntı kayıplarını azaltmak için ölçümün daha yüksek çözünürlükte yapılması tavsiye edilir. Bu maksatla "zoom analizi" yapılır. Böylece, analizörün en iyi frekans çözünürlüğü (maksimum frekans çizgilerinin sayısı) ilgilenilen frekansı içine alan sınırlı bir aralıkta yüksek frekans çözünürlüğü elde etmek için kullanılır. Fakat bunun için tahrik sinyali kontrollü olmalıdır; ilgilenilen aralık dışındaki frekanslara olabildiğince az enerji vermek gerekir. Bu ise çekiç-darbe testinde sağlanması güç bir şarttır (Ewins 2000). Bunun yerine, bu çalışmada, sadece ilk birkaç modu ölçmek amacıyla kiriş testinde 0-800 Hz arası 0.5 Hz çözünürlükle (1600 frekans çizgisi), plak ve sac parça deneylerinde 0-100 Hz arası 0.25 Hz çözünürlükle ölçülmüştür. Çözünürlüğü daha fazla arttırmak kayıt süresini, bu da ölçüm zamanını ve veriye karışan parazit miktarını arttırdığından daha fazla çözünürlükten kaçınılmıştır.

Donanım ve yazılımla ilgili bu düzenlemelerden sonra ölçüme geçilir. Bir noktadan FCF ölçülürken bu sırada elde edilen **tutarlılık (*coherence*) fonksiyonu**nun değişimi ölçümün doğruluğu hakkında bilgi verir. Tutarlılık fonksiyonu $\gamma(\omega)$

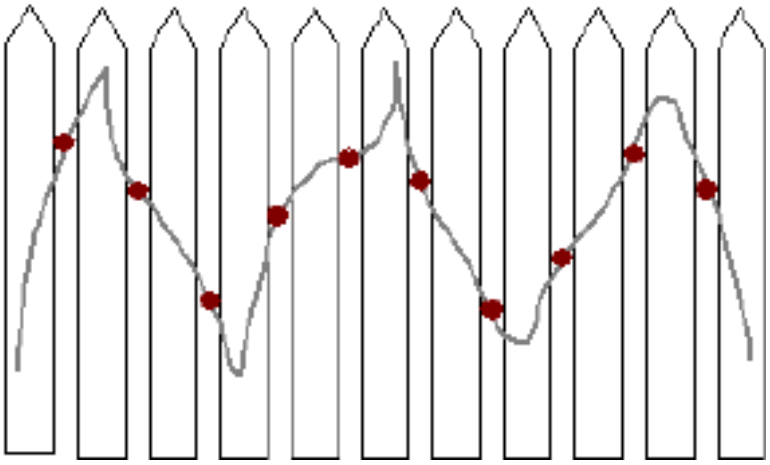
$$\gamma^2(\omega)=\frac{|S_{XF}(\omega)|^2}{S_{XX}(\omega)S_{FF}(\omega)} \tag{2.25}$$

şeklinde tanımlıdır (McConnell 1995). Burada $S_{XF}(\omega)=X(\omega)F(\omega)^*$, $S_{XX}(\omega)=X(\omega)X(\omega)^*$, $S_{FF}(\omega)=F(\omega)F(\omega)^*$ olarak tanımlı korelasyon fonksiyonlarıdırlar (*: karmaşık eşlenik). Çapraz spektrum eşitsizliğine göre $|S_{XF}(\omega)|^2 \le S_{XX}(\omega)S_{FF}(\omega)$ 'dir. Bu durumda

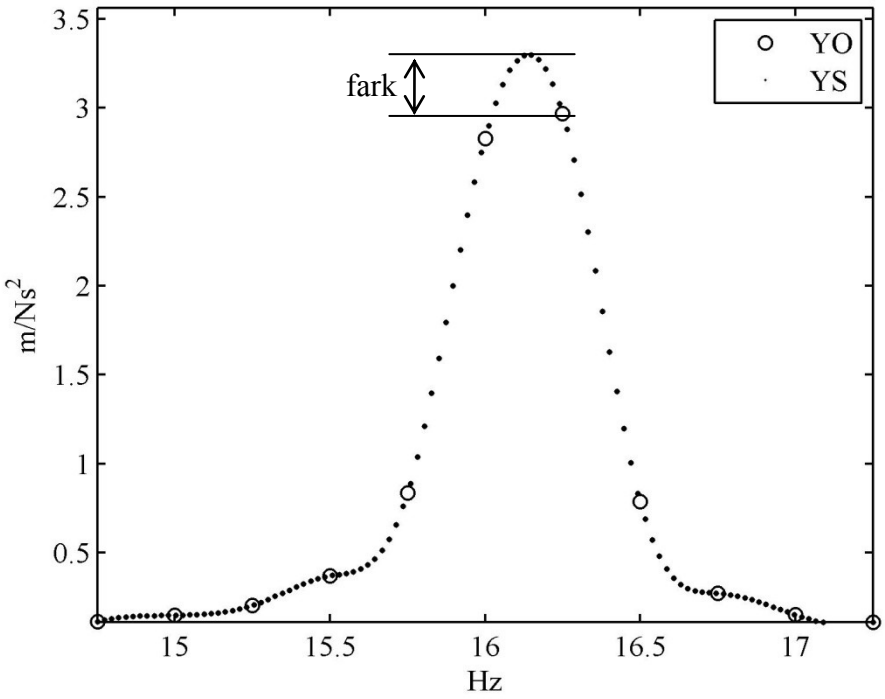
$0 \le \gamma(\omega) \le 1$'dir. Tutarlılık fonksiyonu frekans ortamında bir nevi korelasyon katsayısıdır. Tekrarlı ölçümlerde, ölçümlerin tekrar edilebilirliği sayının 1'e yakınlığı ile orantılıdır. Genellikle $\gamma(\omega)$'nın 1'e yakın olması istenir. Ancak şu hallerde 1'den küçük değerler alır (Døssing 1988): 1) Antirezonans noktalarında cevap genliği çok küçük olduğu için ölçümler arasındaki korelasyon az olur. 2) Tahrik noktası bir düğüm noktası veya buraya çok yakın ise tutarlılık azalır. 3) Çekiç testinde ardışık darbelerin yeri ve doğrultusu farklı ise, bu farklılıkla orantılı olarak tutarlılık fonksiyonu düşer. Ayrıca, darbe şiddeti şekil değiştirmenin lineer sınırları aşmasına sebep oluyorsa da tutarlılık düşer. Rezonans frekanslarında tutarlılığın 0.95 ve üzerinde olması tavsiye edilmektedir. Deneylerde buna uygun ölçüm yapılmıştır.

2.3.2.3 FCF'lerden titreşim modlarının elde edilmesi

FCF'nin çözünürlüğü analizörün kapasitesine bağlıdır. FCF eğrisi analizörün izin verdiği ve gerçek rezonans frekansına en yakın frekansta tepe yapar. Dolayısıyla, rezonans frekansındaki genlik hatalı elde edilir. Bu hatanın kaynağına "çit etkisi" (*picket fence effect*) denir. Şekil 2.19a) bu durumu görsel olarak ifade etmektedir. Resimde çitler arasındaki boşluklar analizörün izin verdiği frekans bantlarını temsil ederler. Deneyde ölçülen veri çitin ön tarafından bakıldığında görülen kısımda yer alır. Gerçekte rezonans frekansları çitin arkasında kalan ve ölçüm yapılamayan bantlara rastlayabilir. Bu sebeple, rezonans piklerini belirlerken bir miktar hata oluşur. Bunu azaltmak için frekans çözünürlüğünü arttırmak düşünülebilir. Fakat bu durumda deney süresi ve bununla orantılı olarak ölçüme karışan parazit miktarı artar. Bu çalışmada, söz konusu hatayı azaltmak için ölçülen veriyi kübik spline interpolasyonuyla yoğunlaştırmak tercih edilmiştir. Böylece, rezonans frekansı civarında modal genliğin tahmininde yapılan hata nispeten azalır. Şekil 2.19b)'de bu duruma bir örnek gösterilmiştir. FCF verisi 10 katına yoğunlaştırıldığında (bu halde frekans eksenindeki örnekleme mesafesi başlangıçtakinin 1/10'u olur) SANAL(FCF)'nin maksimum değeri yoğunlaştırma yapılmadığı haldeki değerden %11 fazla olmaktadır.



a)



b)

Şekil 2.19 Çit etkisi ve azaltılması

a) Çit etkisinin görselleştirilmiş hali[1] b) FCF'yi spline interpolasyonu ile yoğunlaştırmanın SANAL(FCF) üzerindeki etkisi (FCF'nin bir doğal frekans civarındaki kısmı ele alınmıştır) YO: Yoğunlaştırmadan Önce, YS: Yoğunlaştırmadan Sonra. fark: ~%11 (referans YO değeri).

[1]Kaynak: http://www.dliengineering.com/vibman/thepicketfenceeffect.htm, erişim tarihi: 03.06.2010.

Ölçülen FCF'ler bu şekilde yoğunlaştırıldıktan sonra, bunların sanal kısımlarının doğal frekanslardaki değerleri ile titreşim modları 2.3.1 başlığında izah edildiği gibi belirlenir.

3. ARAŞTIRMA SONUÇLARI ve TARTIŞMA

Bu bölümde, öncelikle, önerilen "polinomla genişletme" yaklaşımının performansı test edilecektir. Ardından, (2.21) eşitliğindeki hasar indisleri kiriş, plak ve sac parça gibi yapıların sayısal ve deneysel titreşim modları ile test edilerek karşılaştırılacaktır.

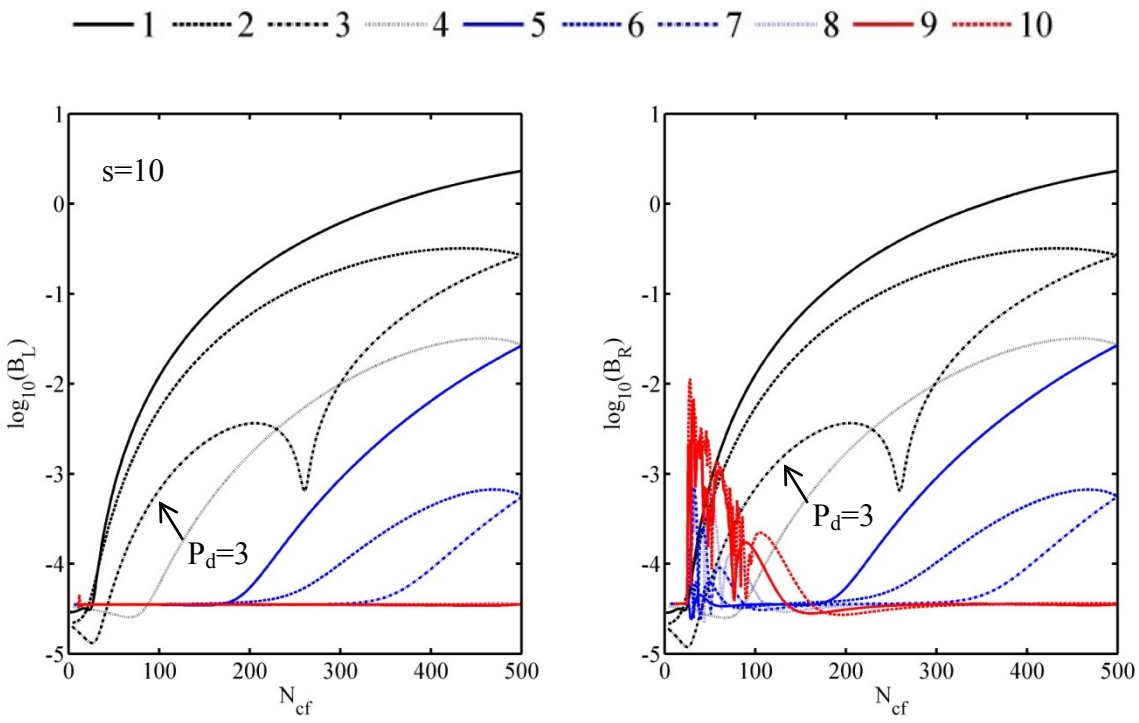
3.1. Genişletme Yönteminin Test Edilmesi

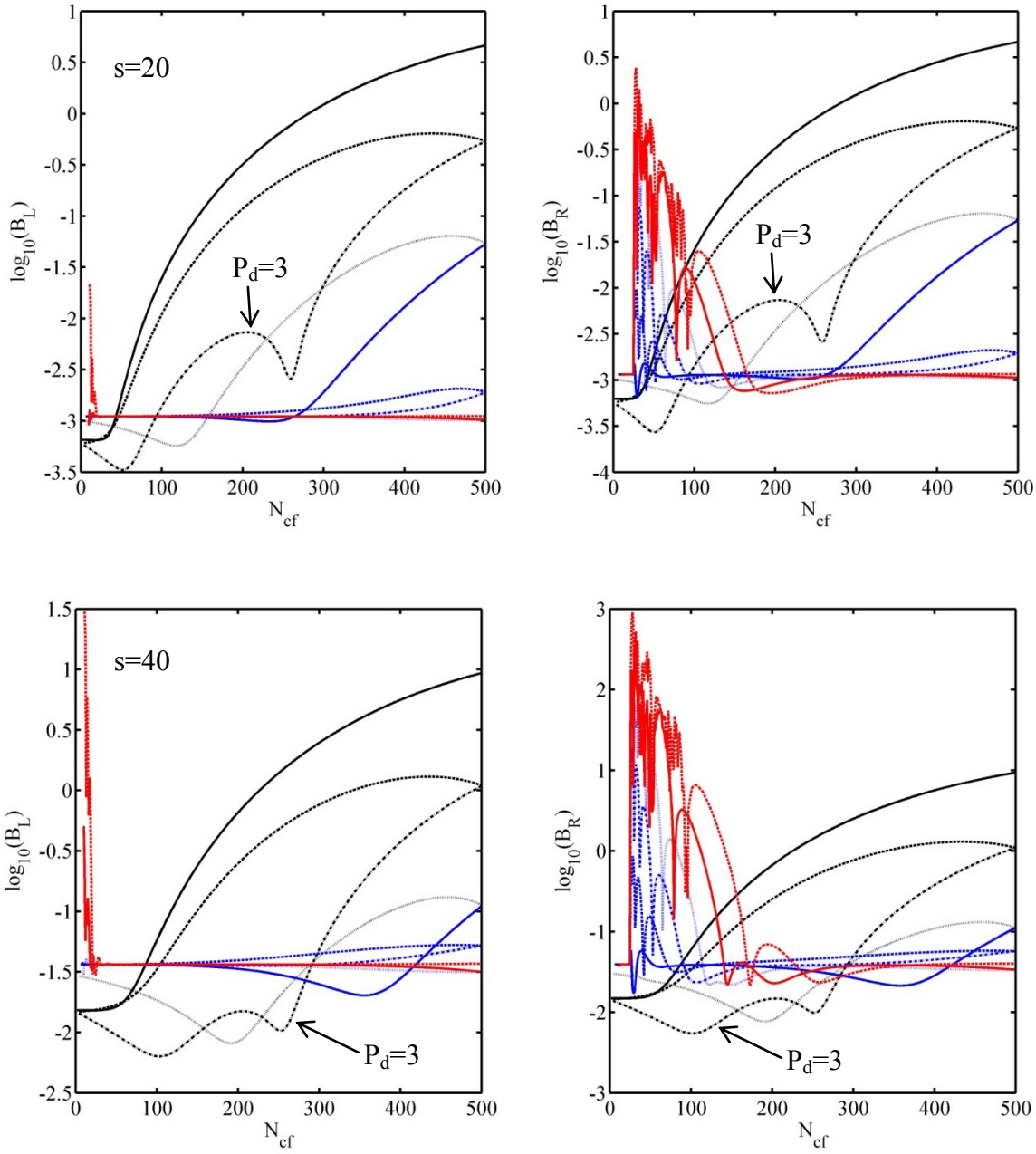
3.1.1. P_d, N_{cf} ve s arasındaki ilişki

Kesit ölçüleri (bkz. Şekil 2.1) w=20mm, h=30mm, boyu L=1m, malzeme özellikleri E=200GPa, ρ=7800kgm^{-3}, ν (Poisson oranı)=0.33 olan bir kirişin sağ uca yakın x_c=0.95L noktasında derinliği 1mm (h_c=29mm) olacak tarzda bir çentik bulunmaktadır. Eleman sayısı N_e=500 alınarak bu kirişin titreşim modları hesaplanmıştır. Bu durumda bir titreşim modu, uzunluğu N_M=501 olan bir vektördür. İlk olarak, bir mod şekline polinom uydurarak genişletme yapıldığında sınırlarda oluşacak bozulmanın polinom derecesi (P_d) ve polinom uydururken kullanılan nokta sayısına (N_{cf}) bağlılığı gösterilecektir.

Şekil 3.1 iki ucu serbest (SS) kirişin 1. elastik mod şekli sym4 dalgacığı ile işlendiğinde (2.18) eşitliğindeki bozulmaların s=10, 20 ve 40 ölçeklerinde P_d ve N_{cf}'ye bağlı olarak değişimini göstermektedir. Bozulma aralıkları geniş olduğundan düşey eksende logaritmik gösterge kullanılmıştır. Eğriler 1'den 10'a kadar polinom derecelerine karşılık gelmektedir. sym4 dalgacığı için N_{VM}=4 olduğundan, önerilen polinomla genişletme yöntemine göre her iki uçta minimum bozulma P_d=3 için elde edilmelidir. Şekil 3.1 bu beklentiyi doğrulamaktadır; 3. dereceden polinom kullanılması halinde minimum bozulmalar elde edilmekte, bunun için örneğin s=20 ölçeğinde sol uçta N_{cf}=52, sağ uçta da N_{cf}=51 nokta kullanmak gerektiği anlaşılmaktadır. Bu değerler

ölçekle doğru orantılı değişmektedir. Optimum N_{cf}'nin ölçekle doğru orantılı artması da öngörülen bir durumdur. Çünkü bozulma sınıra yakın veri parçasını ilgilendirir. Ölçek arttıkça bozulmadan etkilenen aralık genişler. Dolayısıyla, daha fazla sayıda veri noktasını temsil eden bir polinoma ihtiyaç duyulur. Bu durumda N_{cf} artmalıdır. Öte yandan, Messina (2008) önerdiği optimizasyon yönteminde ilk olarak veriye tüm noktaları kullanarak polinom uydurmakta ve buna birinci yaklaşım demektedir. Bu polinomun derecesi arttıkça birinci yaklaşımla elde edilen bozulmaların azaldığını, böylece müteakip optimizasyon işleminin daha kısa sürede tamamlandığını bildirmiştir. Şekil 3.1 bunu doğrulamaktadır; N_{cf}=500 için P_d arttıkça bozulmaların azaldığı görülmektedir. *Fakat bu çalışmada önerilen yöntemle daha düşük dereceli bir polinom ve daha az sayıda veri noktasını kullanarak bozulmaları daha fazla azaltmanın mümkün olduğu görülmektedir. Başka bir deyişle, bozulmayı azaltmak için tüm veri noktalarını kullanıp yüksek dereceden bir polinom uydurmaya gerek yoktur*.

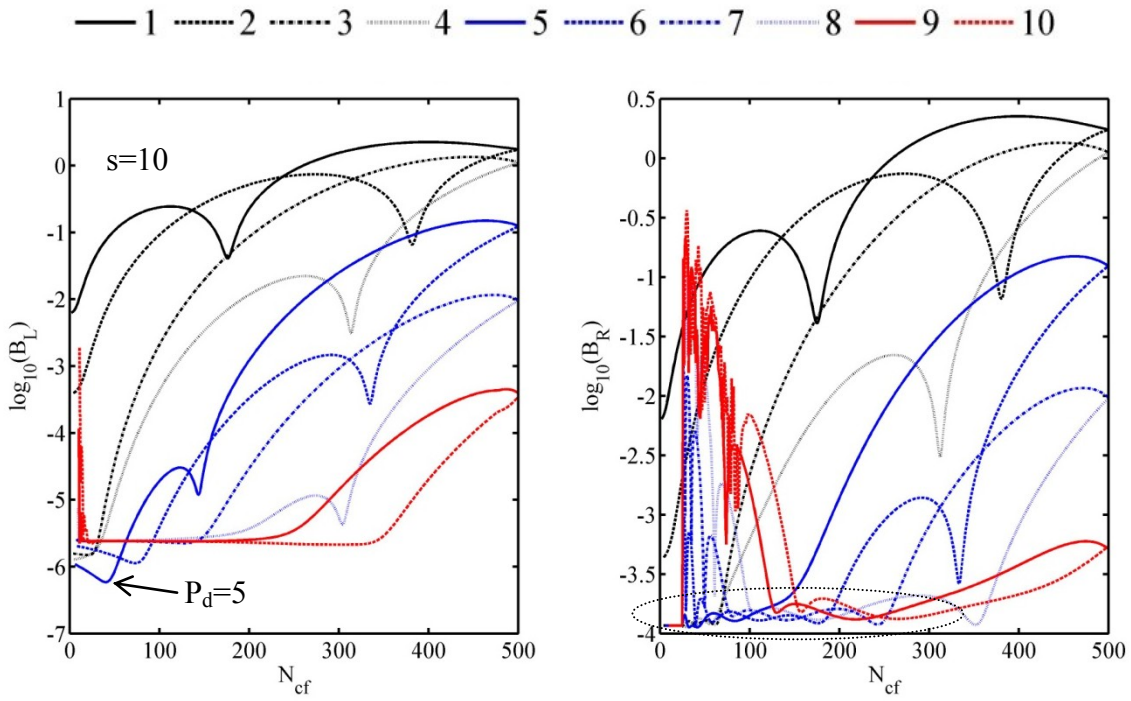


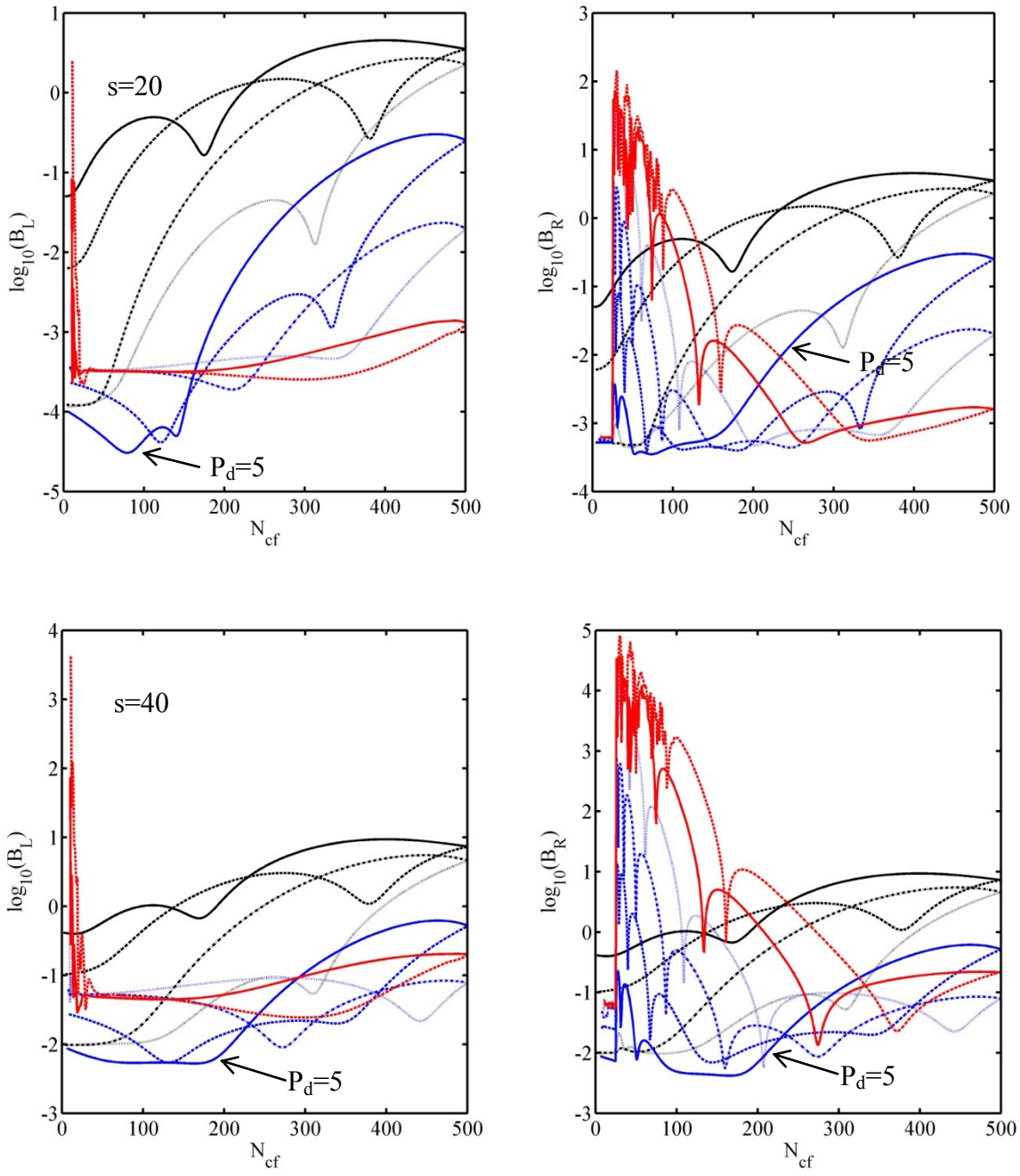


Şekil 3.1 1. mod şekli için sol ve sağ uçtaki bozulmalar.
Sınır şartları: SS, dalgacık: sym4.

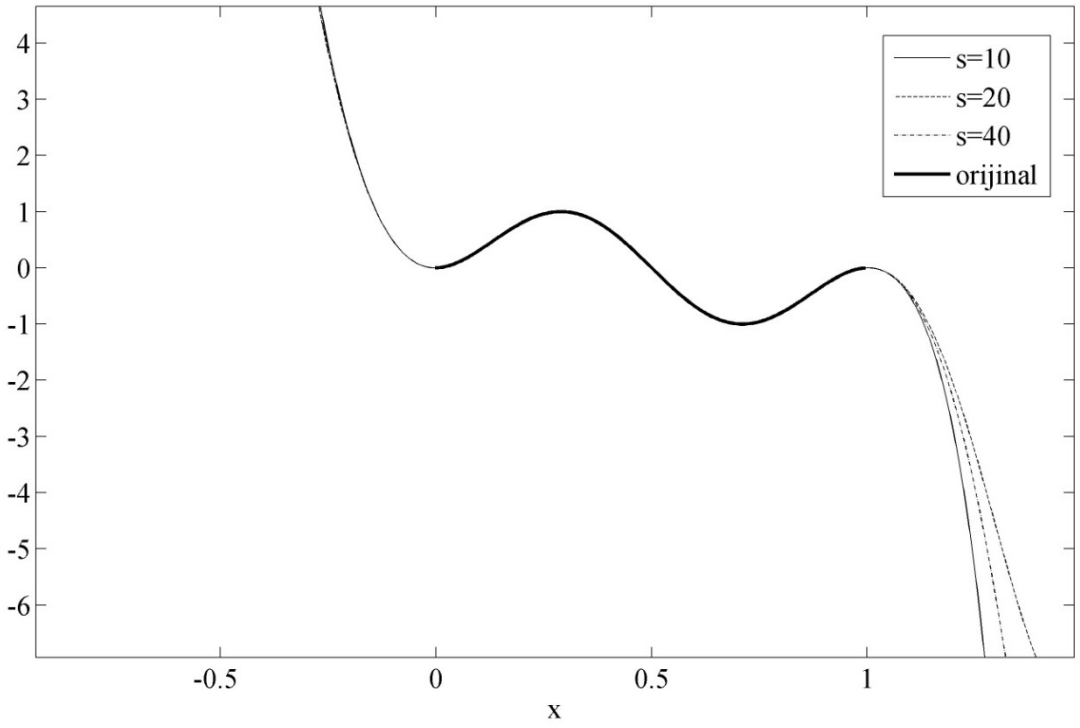
Benzer analizler aynı kirişin 2.mod şekli ile de yapılmış, bu kez sym6 dalgacığı kullanılmıştır. Ayrıca sınır şartları da farklı olup iki ucu ankastredir (AA). Bu halde bozulmaların P_d, N_{cf} ve s ile değişimi Şekil 3.2'deki gibidir. Eğrilerin değişimi Şekil 3.1 ile ilgili sonuçları pekiştirmektedir. sym6 dalgacığı kullanıldığından en az bozulma bu kez P_d=5 için beklenir. Şekil 3.2 bu beklentiyi doğrulamaktadır. Sol taraftaki şekillerde bu açıkça görüldüğü halde sağ tarafta minimumun 5. dereceden polinomla elde edildiği,

s=10 ölçeğine ait grafikte çok belirgin değildir (şekildeki eliptik bölgeye bakınız). Bunun sebebi, sağ tarafta x_c=0.95L konumunda hasar kaynaklı değişimin olmasıdır. Ankastre uçta eğrilik serbest uca göre yüksek ve eğriliğin yüksek olduğu yerde hasara ait dalgacık katsayıları daha yüksek genlikli olduğundan (Trentadue ve ark.2007), sağ uçta bozulma kaynaklı genliklerin hasar kaynaklı olana göre değişimi küçük ölçeklerde daha az olmaktadır. Dolayısıyla, s=10 ölçeğinde sağ uçta minimum bozulma civarında eğrilerin değişimi birbirine yakındır. Ancak, o bölgeye yakından bakıldığında minimumun yine P_d=5'le elde edildiği görülebilir. Ayrıca, ölçek arttıkça dalgacığın uzunluğu ve buna bağlı olarak bozulmadan etkilenen aralığın genişliği arttığından bozulma kaynaklı genlikler de artar. Böylece, sağ uçta da P_d=5 ile minimum bozulma sağlandığı açıkça görülmektedir. Şekil 3.3a)'da minimum bozulmaya ait N_{cf} değerleri kullanılması halinde P_d=5. mertebeden polinomlarla genişletmeler farklı ölçeklerde gösterilmiştir. Bu halde SDD katsayılarının değişimi de Şekil 3.3b)'deki gibidir. Ölçek arttıkça dalgacığın konum eksenindeki lokalizasyonu azaldığından x=0.95L'deki çentik etkisi kaybolmaktadır.

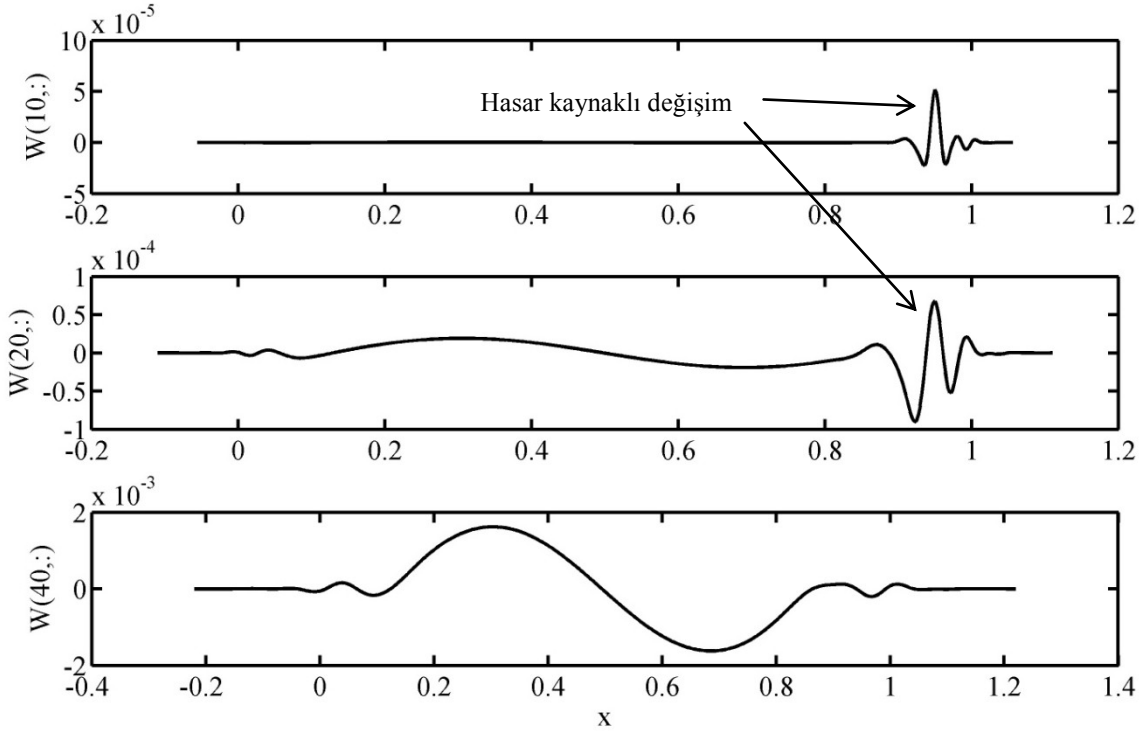




Şekil 3.2 2. mod şekli için sol ve sağ uçtaki bozulmalar.
Sınır şartları: AA, dalgacık: sym6.



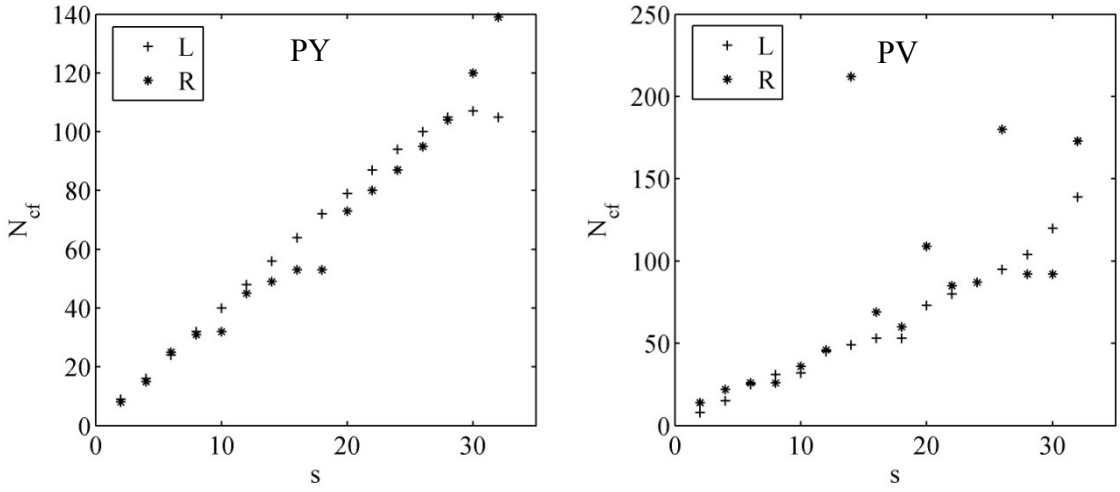
a)



b)

Şekil 3.3 2.mod şeklinin farklı ölçeklerde polinomla genişletilmesi ve bu halde SDD katsayılarının değişimi.

Parazit olması ve olmaması halinde sol ve sağ uçlarda en uygun N_{cf} değerlerinin ölçekle değişimi de araştırılmıştır. Trentadue ve ark. (2007) basit bir LDV sisteminde çeşitli önlemler alınması halinde SNR'nin 60dB civarında olabileceğini ifade etmişlerdir. Şekil 3.4'de sağdaki grafik oluşturulurken titreşim moduna SNR=60dB düzeyinde parazit eklenmiştir. Bu halde optimum N_{cf} değerleri parazitsiz hale göre daha düzensiz değişmektedir. Parazitsiz halde, uygun N_{cf} değerleri ölçekle düzenli bir şekilde artmaktadır. Fakat aşırı ölçeklerde (s>30) düzenin yine bozulduğu görülüyor. Bunun sebebi dalgacığın lokal değişimlere duyarlılığının zayıflaması olabilir. Bununla birlikte, parazit olsa da olmasa da en uygun N_{cf} değerleri her durumda toplam veri uzunluğundan (501) oldukça azdır. Bu durum, analizlerde tüm veri noktaları yerine belli bir aralıkta (mesela bu örnek için Ncf ≤ 250) uygun N_{cf} arama olanağı vermektedir. Böylece işlem zamanı açısından yarı yarıya kazanç elde etmek mümkündür. Zamandan tasarruf etmenin başka bir yolu N_{cf} sayısını birer birer değil de ikişer ikişer arttırmaktır. Çünkü uygun P_d için bozulmalar Şekil 3.1 ve 3.2'de görüldüğü gibi düzgün değişmektedir; ani sıçramalar vs söz konusu değildir. Dolayısıyla, en az bozulmayı sağlayan N_{cf}'nin bir eksik ya da fazlası da bozulmayı yeterince azaltır.



Şekil 3.4 Parazit olması ve olmaması halinde en uygun N_{cf} değerlerinin değişimi. L: sol uç, R: sağ uç. 2.mod verisi kullanılmıştır. PY: Parazit yok, PV: Parazit var (SNR=60dB). Sınır şartları: AA, dalgacık: sym6, P_d=5.

Yukarıdaki analizlerden elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Polinomla genişletme yönteminin performansı genişletme polinomunun derecesine (P_d) ve eğri uydurma sırasında kullanılan nokta sayısına (N_{cf}) bağlıdır.
- En uygun P_d, seçilen dalgacığın N_{VM} değerinden 1 eksiktir; $P_d=N_{VM}-1$. Bu halde en uygun N_{cf} veri noktaları sayısından (N_M) oldukça küçüktür. Dolayısıyla, bozulmayı azaltmak için yüksek dereceli bir polinom ve tüm veri noktalarını kullanmaya gerek yoktur.
- En uygun N_{cf} genellikle ölçekle belli bir düzende artar, ama parazit olması halinde bu düzen biraz bozulur. Bununla birlikte en uygun N_{cf} N_M'den oldukça küçüktür.

3.1.2. Diğer yöntemlerle karşılaştırılması

Polinomla genişletme yöntemi sıkça kullanılan diğer yöntemlerle (asimetrik, simetrik, peryodik, kübik spline ekstrapolasyonu (KSE)) de karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma, hasar etkisinin belirginleştiği belli bir ölçekte (2.18) eşitliği ile hesaplanan bozulmaları kıyaslamak şeklinde gerçekleştirilmiştir. Önerilen polinomla genişletme yönteminin optimum çözüme yakınlığını kontrol amacıyla, aynı dereceden polinomla genişletme yapılıp, polinomun katsayıları (2.18) eşitliğini amaç fonksiyonu olarak kullanan bir optimizasyon probleminin çözümünden bulunmuştur. Bunun için, daha önce de ifade edildiği gibi, *Shuffled Complex Evolution* algoritmasını kullanan, MATLAB ortamında yazılmış bir programdan yararlanılmıştır[1]. Polinom katsayılarının başlangıç değerleri sıfır alınarak optimizasyon süreci başlatılmıştır.

Çizelge 3.1 iki ucu ankastre kirişin 3. titreşim modu kullanılarak hazırlanmıştır. Bu halde farklı yöntemlere ait genişletmeler Şekil 3.5'de, bu verilerle elde edilen SDD katsayıları da Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Şekil 3.5 ve 3.6'daki veriler parazitsiz hale karşılık gelmektedir. Bozulmalara ait sayısal sonuçlar için Çizelge 3.1'e bakıldığında

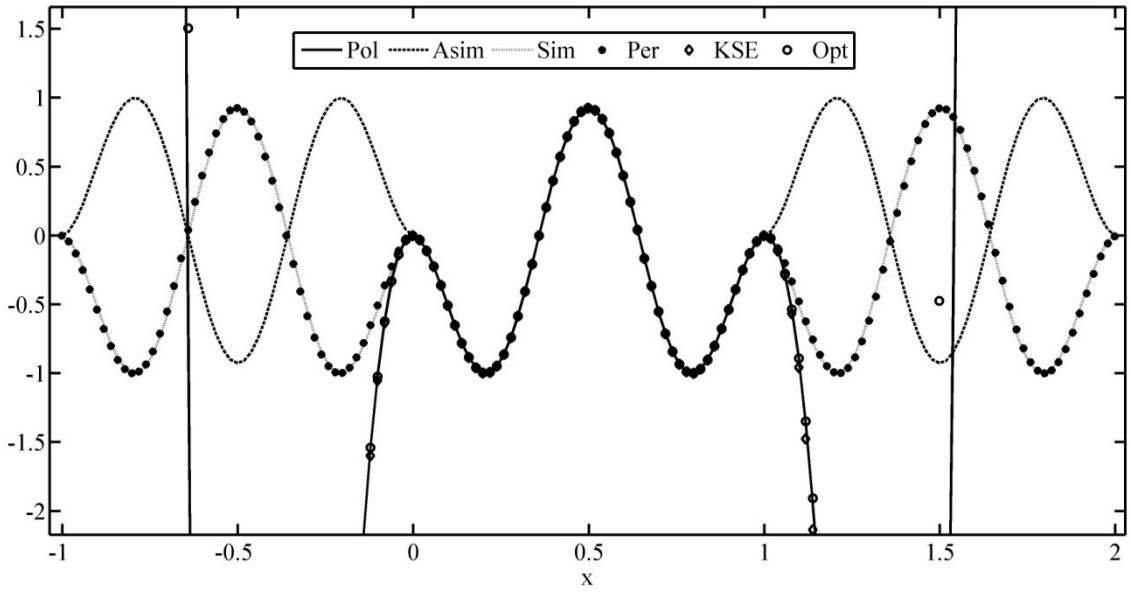
[1] Programa ait MATLAB kodu "http://biomath.ugent.be/~brecht/downloads.html" adresinden indirilmiştir. Bağlantı adresinin çalışır vaziyette olduğu 23.08.2010 tarihinde kontrol edilmiştir.

optimum çözüme en yakın değerlerin bu çalışmada önerilen polinomla genişletme yaklaşımı ile elde edildiği görülmektedir. Diğer yöntemlerde bozulma çok fazla olup sadece KSE ile parazitsiz halde sağ taraftaki bozulma kabul edilebilir derecededir. Fakat parazit olması halinde optimum çözümden en fazla sapma da KSE iledir. Bunun sebebi, Messina'nın da (2008) belirttiği gibi, ekstrapolasyon yaklaşımlarının sayısal türev hesaplamaya dayanmasıdır. Parazitli veride sayısal türev yanlış sonuçlara sevk eder. Dolayısyıla, KSE ancak, Rucka ve Wilde'in (2006a,b) çalışmalarındaki gibi, çözünürlüğü düşük veriler için uygun bir yaklaşımdır. Aksi halde, Çizelge'de görüldüğü gibi, parazitli veri halinde son derece yanlış sonuçlara sevk edebilir. Şekil 3.6 polinomla genişletme yönteminin optimum çözüme yakınlığını görsel olarak ifade etmektedir. Diğer yöntemlerle sınırlarda bozulma çok yüksektir. Bu sebeple x=0.95L'deki hasar etkisi algılanamamaktadır. Fakat polinomla genişletme yaklaşımı hasar etkisini açığa çıkarırken bozulmaları da gayet iyi bir şekilde azaltmaktadır. Şekilde KSE'nin de optimuma yakın sonuç vermesi verinin parazitsiz olmasındandır. Çizelgedeki işlem zamanı ile ilgili sayılara bakıldığında, polinomla genişletme yönteminin global optimizasyon yöntemine göre çok daha avantajlı olduğu görülmektedir: Polinom yöntemi yaklaşık 4 saniyede genişletme işlemini tamamladığı halde optimizasyon süreci bir buçuk dakika kadar sürmektedir. Diğer yöntemlerde genişletme işlemi basit matematiksel işlemlerle gerçekleştirildiğinden işlem zamanı olarak kayda değer bir süre söz konusu değildir; 1 saniyeden çok az bir zaman yeterlidir (bu sebeple tabloda bunlara ait hesap süreleri verilmemiştir). Polinomla genişletmede en küçük kareler anlamında en uygun eğri uydurma söz konusudur. Bunun arka planında temel matris işlemleri vardır. Bunlar da fazla zaman gerektirmezler, ama polinom uydurma işlemi aralıktaki nokta sayısı kadar tekrarlandığından toplamda birkaç saniye de olsa belli bir süre gerekir. Ele alınan örnekte mod verisinin uzunluğu N_M=501'dir. Bu durumda bir uç için 5. derece polinom uydurulacağı zaman 501-6=495 kez eğri uydurma işlemi tekrarlanır. Diğer uç için de bu sayıda işlem gerçekleştirilir. Toplamda işlem sayısı bine yakındır. Dolayısıyla bin defa polinom uydurmak birkaç saniye sürebilir. Bu süreyi yarı yarıya azaltmak üzere nokta sayıları $[P_d+1,N_M]$ aralığında ikişer ikişer arttırılmıştır. Buna rağmen bozulmalar optimum çözüme oldukça yakındır.

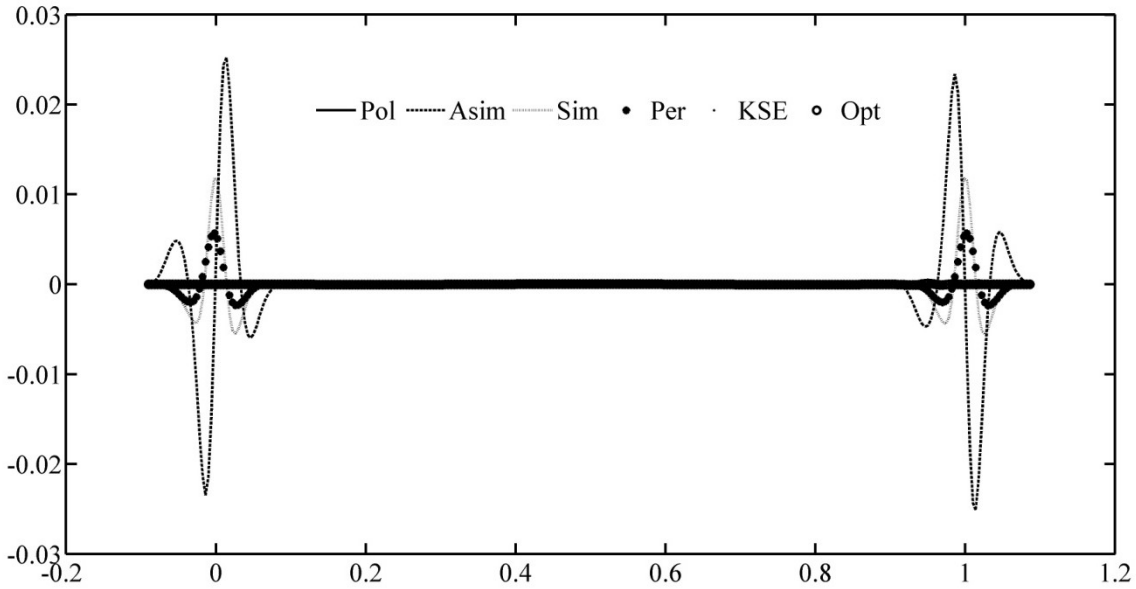
Çizelge 3.1 AA mesnetli kirişin 3. titreşim modu için bozulmaların karşılaştırılması.

	PY					**PV**				
Yöntem	B_L	Hata	B_R	Hata	TS	B_L	Hata	B_R	H	TS
Pol.	3.16E-5	**15**	3.68E-5	**7.5**	3.65	2.34E-3	**6.6**	7.58E-3	**7.7**	3.62
Asim.	9.86E-2	>>100	9.82E-2	>>100	---	9.94E-2	>>100	1.00E-1	>>100	---
Sim.	3.75E-2	>>100	3.76E-2	>>100	---	3.93E-2	>>100	4.10E-2	>>100	---
Per.	1.86E-2	>>100	1.86E-2	>>100	---	2.10E-2	>>100	2.10E-2	>>100	---
KSE	1.87E-4	>100	4.89E-4	**43**	---	4.56E-1	>>100	4.39E-1	>>100	---
Opt.	2.74E-5	---	3.42E-4	---	100	2.19E-3	---	7.03E-3	---	90

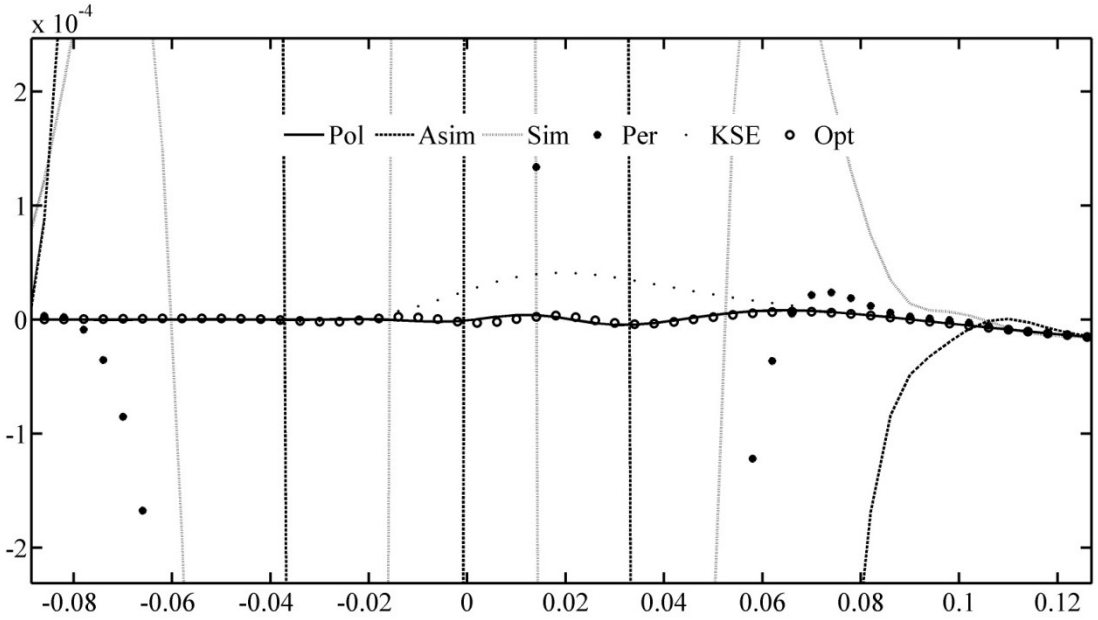
Dalgacık: sym6, genişletme ölçeği s=16. Pol.: Önerilen polinomla genişletme yöntemi, Asim: Asimetrik genişletme, Sim.: Simetrik genişletme, Per.: Peryodik genişletme.
Opt.: Optimizasyonla genişletme. Hata (%) = 100|X-Opt|/Opt, X: Optimizasyon dışındaki yöntemlerden herhangi biri. **PY**: Parazit Yok, **PV**: Parazit Var. TS: Toplam Süre [saniye]. ">100": 100'den büyük, ">>100": 100'den çok büyük



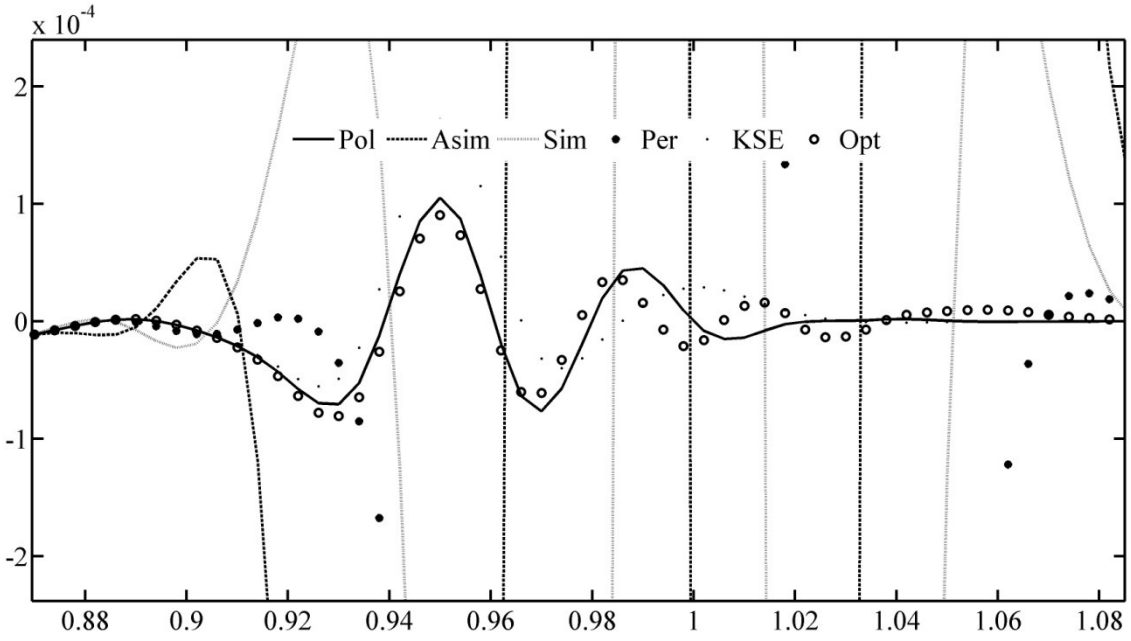
Şekil 3.5 3. titreşim modunun farklı yöntemlerle genişletilmesi.


Pol
Asim
Sim
Per
KSE
Opt
0.03
0.02
0.01
0
-0.01
-0.02
-0.03
-0.2
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
1.2

a)


x 10^-4
Pol
Asim
Sim
Per
KSE
Opt
2
1
0
-1
-2
-0.08
-0.06
-0.04
-0.02
0
0.02
0.04
0.06
0.08
0.1
0.12

b)



c)

Şekil 3.6 Farklı yöntemlerle elde edilen SDD katsayılarının karşılaştırılması. b) ve c)'deki grafikler a)'dakinin sol ve sağ taraflarının büyütülmüş halidir.

Değişik sınır şartları ve titreşim modları dikkate alınarak Çizelgeler 3.2-4 oluşturulmuştur. Çizelge 3.4'de, farklı olarak, belirsiz sınır şartı için sonuçlar mevcuttur. Bu, ankastre-serbest (AS) uçlu kirişin titreşim modunun baş ve sondan 0.1L kadarlık bölümlerinin çıkarılması ile sağlanmıştır. Bu şekilde uç noktalarda sehim, eğim, kesme kuvveti ve eğilme momenti belirsiz olur. Dolayısıyla, yukarıdaki temel sınır şartlarından farklı bir durum söz konusudur. Sonuçlar genel olarak Çizelge 3.1'dekilerle paraleldir; optimum çözüme en yakın bozulma önerilen polinomla genişletme yaklaşımı ile sağlanmıştır. KSE yine parazitsiz halde bazı durumlarda iyi sonuç vermektedir. Optimizasyon ve polinomla genişletmeden başka, diğer yöntemler içinde asimetrik genişletme bazı hallerde üçüncü alternatif olarak durmaktadır. Messina' da (2008) en genel halde asimetrik genişletmeyi salık vermekte, fakat belirsiz sınır şartı, parazitli veri, sınıra yakın yerde küçük dereceli hasar gibi özel durumlarda asimetrik genişletmenin yetersiz olabilmesi ihtimaliyle kendi geliştirdiği optimizasyon yöntemini önermektedir.

Çizelge 3.2 BB kirişin 5. titreşim modu için bozulmaların karşılaştırılması

	PY					**PV**				
Yöntem	B_L	Hata	B_R	Hata	TS	B_L	Hata	B_R	H	TS
Pol.	1.11E-3	**4.2**	1.25E-3	**15**	6.6	3.74E-3	**7.8**	2.39E-3	**8.1**	7.03
Asim.	2.01E-3	**88**	2.54E-3	>100	---	6.02E-3	**73.5**	5.38E-3	>100	---
Sim.	1.02E0	>>100	1.02E0	>>100	---	1.02E0	>>100	1.02E0	>>100	---
Per.	9.95E-1	>>100	9.95E-1	>>100	---	9.94E-1	>>100	9.94E-1	>>100	---
KSE	2.05E-3	**92**	2.38E-3	>100	---	1.35E0	>>100	8.97E-1	>>100	---
Opt.	1.06E-3	---	1.08E-3	---	226	3.47E-3	---	2.21E-3	---	220
Dalgacık: sym6, genişletme ölçeği s=16. BB: basit-basit										

Çizelge 3.3 SS kirişin 8. titreşim modu için bozulmaların karşılaştırılması

	PY					**PV**				
Yöntem	B_L	Hata	B_R	Hata	TS	B_L	Hata	B_R	H	TS
Pol.	1.97E-2	**4**	1.82E-2	**1**	6.4	1.98E-2	**3.4**	1.94E-2	**0.9**	6.3
Asim.	1.15E-1	**>>**100	1.17E-1	>>100	---	1.17E-1	>>100	1.16E-1	>>100	---
Sim.	1.64E0	>>100	1.65E0	>>100	---	1.64E0	>>100	1.65E0	>>100	---
Per.	7.78E0	>>100	7.78E0	>>100	---	7.78E0	>>100	7.78E0	>>100	---
KSE	3.71E-2	**95**	3.71E-2	>100	---	3.32E0	>>100	2.89E0	>>100	---
Opt.	1.90E-2	---	1.84E-2	---	270	1.19E-2	---	1.96E-2	---	210
Dalgacık: sym6, genişletme ölçeği s=16. SS: serbest-serbest										

Çizelge 3.4 Sınır şartları belirsiz kirişin 4. titreşim modu için bozulmaların karşılaştırılması

	PY					**PV**				
Yöntem	B_L	Hata	B_R	Hata	TS	B_L	Hata	B_R	H	TS
Pol.	8.29E-5	**4.1**	3.72E-5	**7.25**	2.7	4.44E-3	**0.6**	2.60E-3	**9**	2.8
Asim.	4.59E-3	>>100	3.03E-2	>>100	---	7.72E-3	**80**	2.24E-2	>>100	---
Sim.	3.62E-1	>>100	5.86E-1	>>100	---	3.65E-1	>>100	5.86E-1	>>100	---
Per.	1.32E0	>>100	1.32E0	>>100	---	1.32E0	>>100	1.32E0	>>100	---
KSE	4.41E-4	>>100	5.84E-4	**68**	---	1.18E0	>>100	2.64E0	>>100	---
Opt.	7.96E-5	---	3.47E-4	---	100	4.42E-3	---	2.39E-3	---	104
Dalgacık: sym6, genişletme ölçeği s=16.										

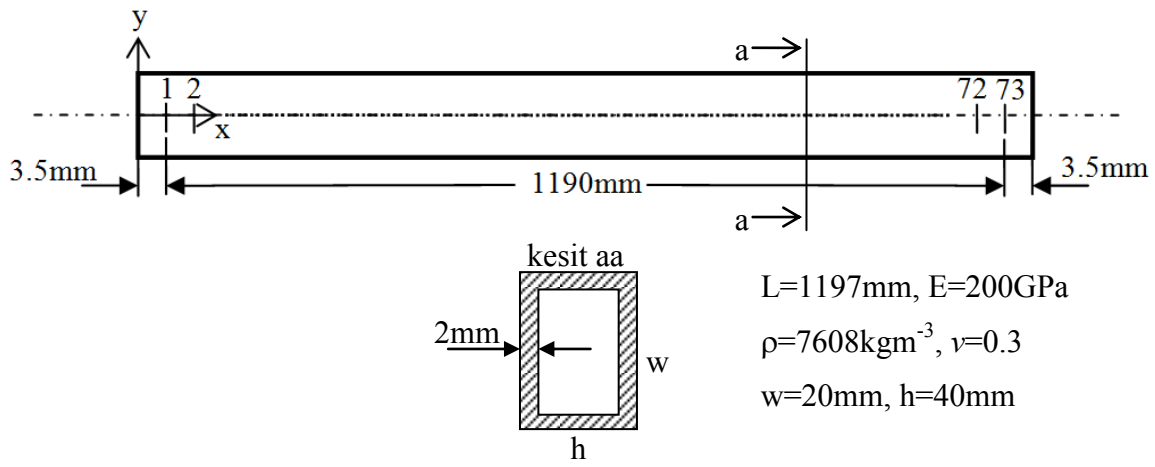
Bu başlıktaki sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Polinomla genişletme yöntemi, optimizasyon dışındaki diğer yöntemlerden performans bakımından üstündür: Değişik sınır şartlarında (hatta en genel halde sınır şartlarının belirsiz olması halinde) veriye parazit karışması durumunda ve farklı titreşim modları için optimum çözüme en yakın sonucu vermektedir.
- Polinomla genişletme yöntemi optimum çözüme çok yakın sonuç vermektedir. Bu sebeple, Messina'nın (2008) çalışmasındaki gibi ilave bir optimizasyon işlemine gerek yoktur. Ayrıca, işlem zamanı açısından optimizasyon yöntemine göre de oldukça avantajlıdır: seçilen örneklerde, optimizasyon süreci yaklaşık 2 dakika sürdüğü halde, önerilen yöntemle, performans bakımından buna çok yakın sonuçlar 4-5 saniye gibi çok kısa sürede elde edilmiştir.

3.1.3. Deneysel veriye uygulama

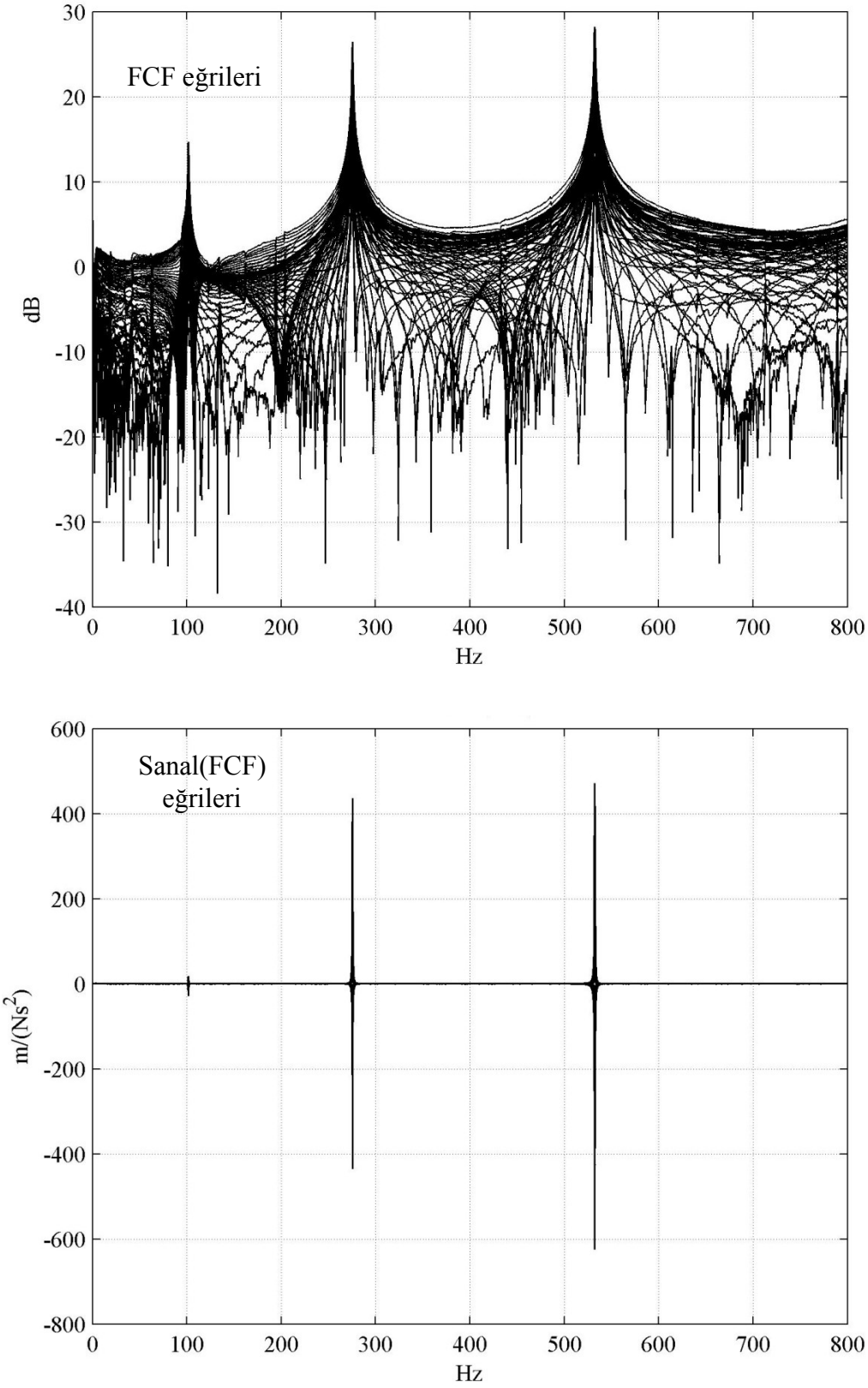
Geometrik ve fiziksel özellikleri Şekil 3.7'de gösterilen çeliğin[1] xz düzlemi içindeki eğilme titreşim modları ölçülmüştür. Bunun için toplam 73 adet ölçüm noktası belirlenmiştir. İlk ve son ölçüm noktaları kiriş ucundan yaklaşık 3mm içeride, ardışık ölçüm noktaları arası mesafe yaklaşık 16mm'dir. İvmeölçer 19 nolu ölçüm noktasına bağlanmıştır. Askılama 17-18 noktalarının ortasından ve 56-57 noktalarının ortasından yapılmıştır. Kayıt süresi 2 saniye, eksponensiyel pencere sabiti τ=0.51s (kayıt süresinin yaklaşık ¼'ü), frekans çözünürlüğü 0.5Hz, frekans aralığı 0-800 Hz olarak ayarlanmıştır. Veriye karışan paraziti azaltmak üzere bir noktadan altı kere FCF ölçülüp ortalaması alınmıştır. Ölçülen 73 adet akselerans formundaki FCF ve bunların sanal kısımları Şekil 3.8'de gösterilmiştir. Beklenildiği gibi sanal kısımlar doğal frekanslarda sivri tepe yapmaktadır. Buna göre, ilk üç elastik doğal frekans sırasıyla 101.5Hz, 275.5Hz ve 532 Hz'dir. Ölçümlerin sağlıklı olduğunu göstermek üzere 19 nolu noktaya ait FCF ve tutarlılık fonksiyonu ($\gamma(\omega)$) grafikleri de verilmiştir (Şekil 3.9). Görüldüğü gibi tutarlılık fonksiyonu rezonanslarda 1'e çok yakındır. Sadece 1. doğal frekans civarında 0.85' e yakın değer almıştır. Bunun sebebi 19 nolu ölçüm noktasının 1. modun düğüm noktasına yakın olmasıdır. Bu noktadan tahrik uygulandığında mod şekline yeterli enerji verilemediğinden tutarlılık fonksiyonu 0.95'in altına düşmüştür. Fakat bu durum, birazdan görüleceği üzere, 1.modu doğru bir şekilde ölçmeyi engellememiştir.

[1] Yoğunluk ölçülerek bulunmuştur, elastisite modülü çelik için standart değer alınmıştır.

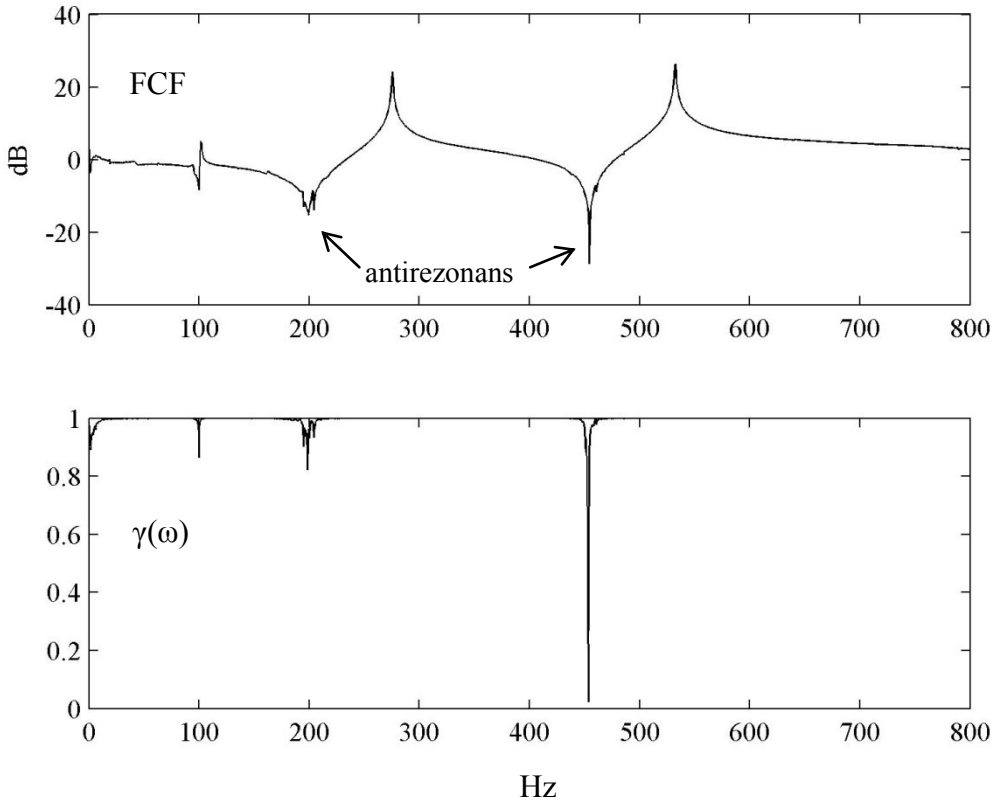


Şekil 3.7 Deneysel çalışmada kullanılan kiriş

EK'de verilen programla da ilk üç sayısal doğal frekans ve titreşim modu bulunmuştur. Programda "k" ile gösterilen kesit şekil faktörü önceden ANSYS ortamında k=0.2248 olarak hesaplanmıştır. Bu halde deneysel ve sayısal doğal frekanslar Çizelge 3.5'de, titreşim modları da Şekil 3.10'da karşılaştırılmıştır. Görüldüğü gibi doğal frekanslar birbirine çok yakın olup bağıl hata %1'den küçüktür. Şekil 3.10'un altındaki MAC matrisi mod şekilleri arasındaki korelasyonu göstermektedir. Matrisin bir (i,j) elemanı i. sayısal titreşim modu ile j. deneysel titreşim modu arasındaki uyumu ifade eder. Herhangi bir eleman 90 veya üzeri ise ilgili modların iyi korelasyonlu olduğu söylenir. 5 ya da daha küçük olduğunda ilgili modlar arasında korelasyon yok denecek kadar azdır (Ewins 2000). Buna göre, ölçülen ve hesaplanan titreşim modları gayet iyi korelasyonludur. Dolayısıyla, yapılan deneylerin güvenilir ve modal analiz açısından yeterli doğruluğa sahip olduğu söylenebilir.



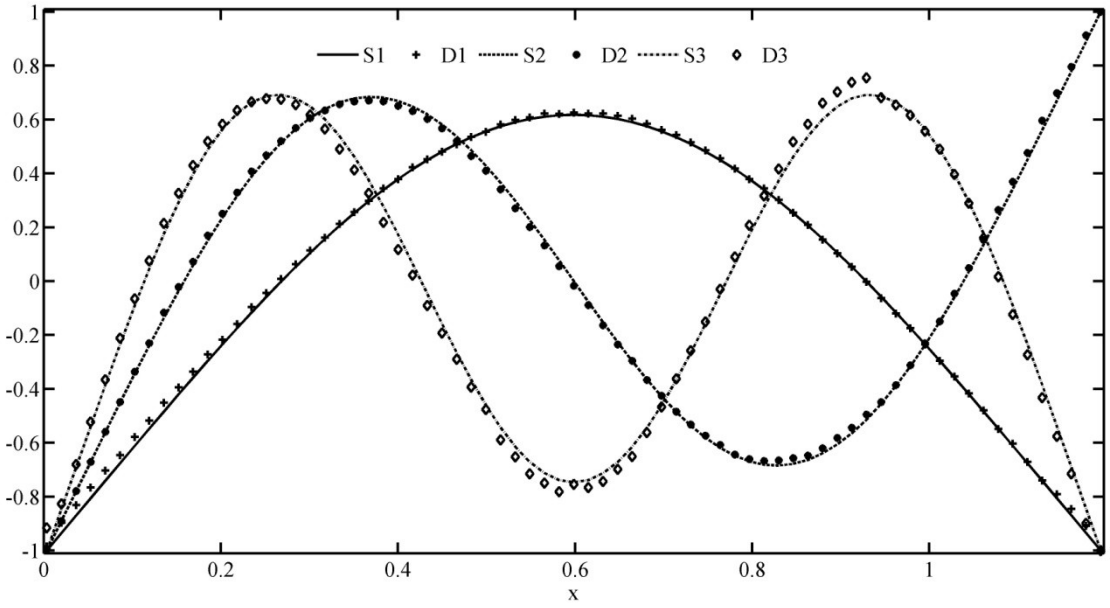
Şekil 3.8 Deneysel FCF eğrileri ve bunların sanal kısımlarının grafiği. Ref. 1m/(Ns^2)



Şekil 3.9 19. Ölçüm noktasındaki FCF ve tutarlılık fonksiyonları.

Çizelge 3.5 Deneysel ve sayısal doğal frekansların karşılaştırılması

Mod numarası	**Deney (Hz)**	**Sayısal (Hz)**	**Hata (%)**
1	101.5	101.65	0.15
2	275.5	277.46	0.71
3	532	536.02	0.76
Hata:=100|D-S|/D, D: Deneysel, S: Sayısal			



100xMAC matrisi

$$\begin{array}{c} \\ S \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{ccc} D & & \end{array} \\ \begin{pmatrix} \mathbf{99.93} & 0.00 & 0.05 \\ 0.03 & \mathbf{99.92} & 0.01 \\ 0.02 & 0.23 & \mathbf{99.62} \end{pmatrix} \end{array}$$

Şekil 3.10 Deneysel (D) ve sayısal (S) titreşim modlarının karşılaştırılması.

Çizelge 3.6-8 ilk üç deneysel titreşim modu için farklı yöntemlerle hesaplanan bozulmaları listelemektedir. Bir titreşim modu 73 elemanlı bir vektördür. Böyle seyrek veriyi analizden önce kübik spline interpolasyonu ile yoğunlaştırmak uygulanagelen bir yaklaşımdır (Loutridis ve ark. 2004, Rucka ve Wilde 2006a,b). Dolayısıyla, konumsal çözünürlüğü arttırmak için kübik spline interpolasyonu ile uzunluğu 500 olacak şekilde yoğunlaştırılmıştır. Yine sym6 dalgacığı kullanılıp iki farklı ölçekte bozulmalar hesaplanmıştır. Çizelgelerde görüldüğü gibi her durumda optimum çözüme en yakın sonuç, önerilen polinomla genişletme yaklaşımı ile elde edilmiştir. Bu yöntemle en kötü sonuçlar 3.mod şekli için s=20 ölçeğinde bulunmuştur. Bu halde genişletme 3.11'deki gibidir, dalgacık katsayıları da Şekil 3.12'de gösterilmiştir. Buna rağmen bozulmaların optimuma yakınlığı (bkz. Şekil 3.12 b) ve c)) dikkat çekicidir. Bazı durumlarda KSE'nin de bozulmayı azaltmada etkili olduğu görülmektedir. Bunun sebebi yine

verideki yüksek frekanslı parazitlerin az olmasıdır. Başlangıçtaki veride örnekleme mesafesi 1190/72 ≅ 16mm'dir. Veri spline interpolasyonu ile yoğunlaştırılsa da yeterince düzgündür. Çünkü bu tarz yoğunlaştırma kübik polinomlarla aradaki noktalar için değer hesaplamaktır; bu noktalar için yeni ölçüm verisi bulmak değildir. Dolayısıyla yoğunlaştırma veride ilave yüksek frekanslı parazitler oluşturmaz. Bu durumda, KSE'nin gerektirdiği sayısal türevler parazitten fazla etkilenmez.

Çizelge 3.6 Deneysel 1. titreşim modu için bozulmaların karşılaştırılması

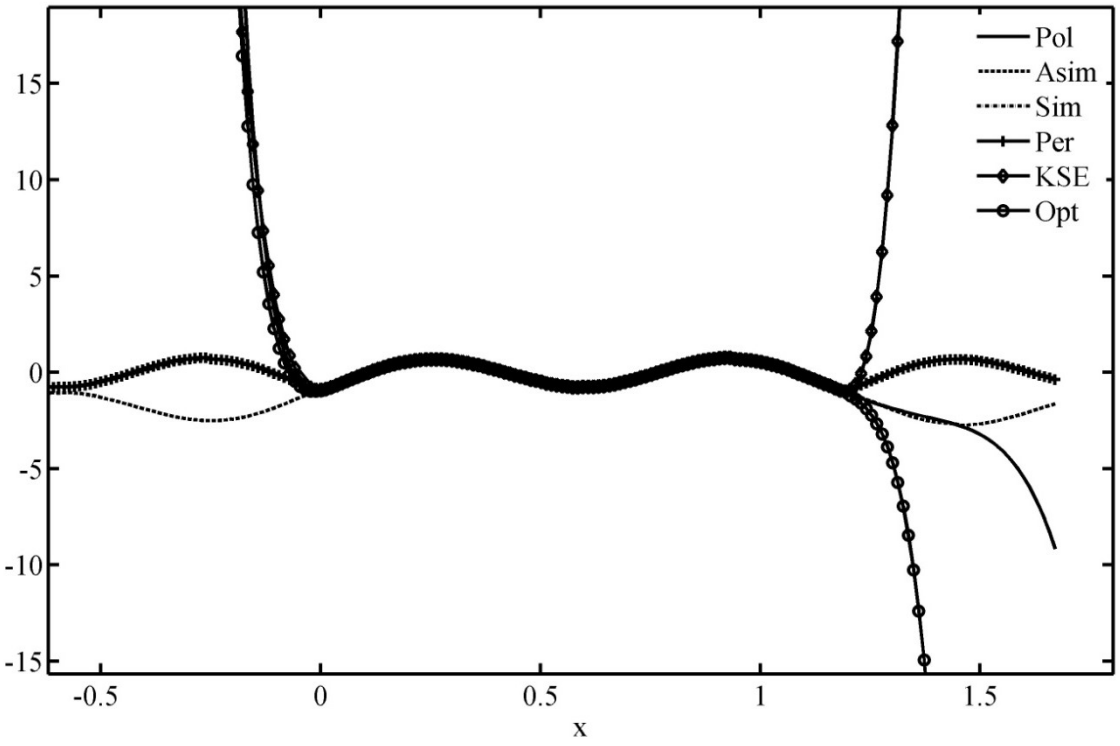
	s=10					s=20				
Yöntem	B_L	Hata	B_R	Hata	TS	B_L	Hata	B_R	H	TS
Pol.	1.27E-2	**0.5**	1.79E-2	**1.1**	3.88	3.44E-2	**7.2**	9.70E-2	**0.45**	3.54
Asim.	5.06E-2	**>>**100	4.82E-2	>100	---	1.77E-1	**>>**100	3.21E-1	>>100	---
Sim.	1.87E-1	>>100	1.94E-1	>>100	---	5.97E-1	>>100	6.52E-1	>>100	---
Per.	1.94E-1	>>100	1.94E-1	>>100	---	6.25E-1	>>100	6.25E-1	>>100	---
KSE	1.51E-2	**1.9**	1.84E-2	**3.6**	---	1.05E-1	**>>**100	1.20E-1	**24**	---
Opt.	1.26E-2	---	1.78E-2	---	129	3.21E-2	---	9.65E-2	---	125

Çizelge 3.7 Deneysel 2. titreşim modu için bozulmaların karşılaştırılması

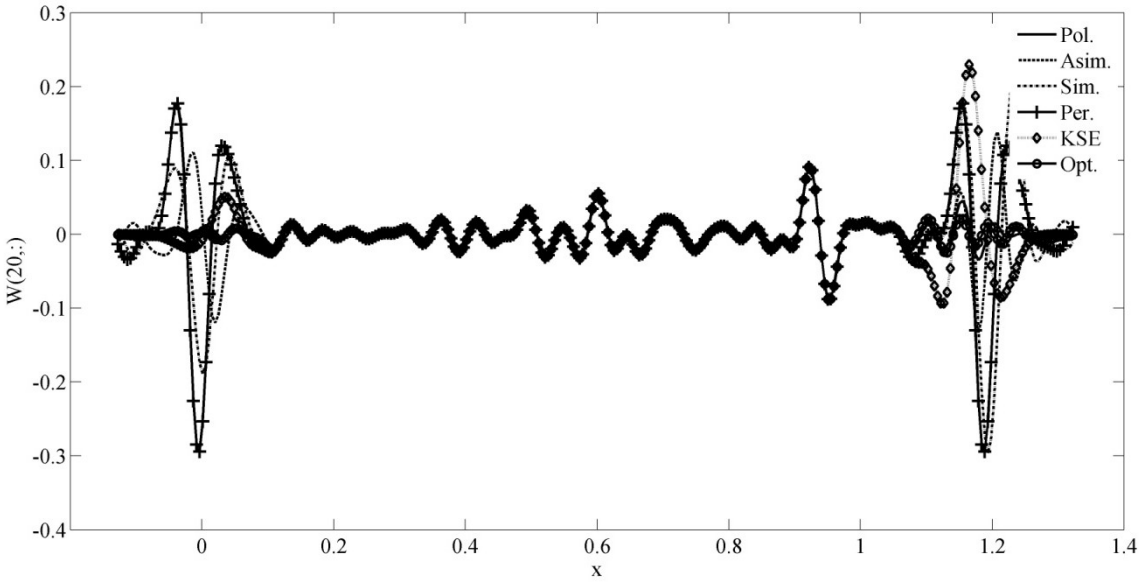
	s=10					s=20				
Yöntem	B_L	Hata	B_R	Hata	TS	B_L	Hata	B_R	H	TS
Pol.	8.75E-3	**1.4**	3.18E-2	**4**	3.7	3.26E-2	**3**	1.00E-1	**13**	3.6
Asim.	2.36E-2	**>**100	1.05E-1	>>100	---	5.43E-2	**71**	1.96E-1	>100	---
Sim.	1.80E-1	>>100	1.34E-1	>>100	---	7.71E-1	>>100	7.77E-1	>>100	---
Per.	4.65E0	>>100	4.65E0	>>100	---	9.31E0	>>100	9.31E0	>>100	---
KSE	1.05E-2	**22**	4.07E-2	**23**	---	8.35E-2	>100	3.48E-1	**>>**100	---
Opt.	8.63E-3	---	3.32E-2	---	155	3.17E-2	---	8.92E-2	---	102

Çizelge 3.8 Deneysel 3. titreşim modu için bozulmaların karşılaştırılması

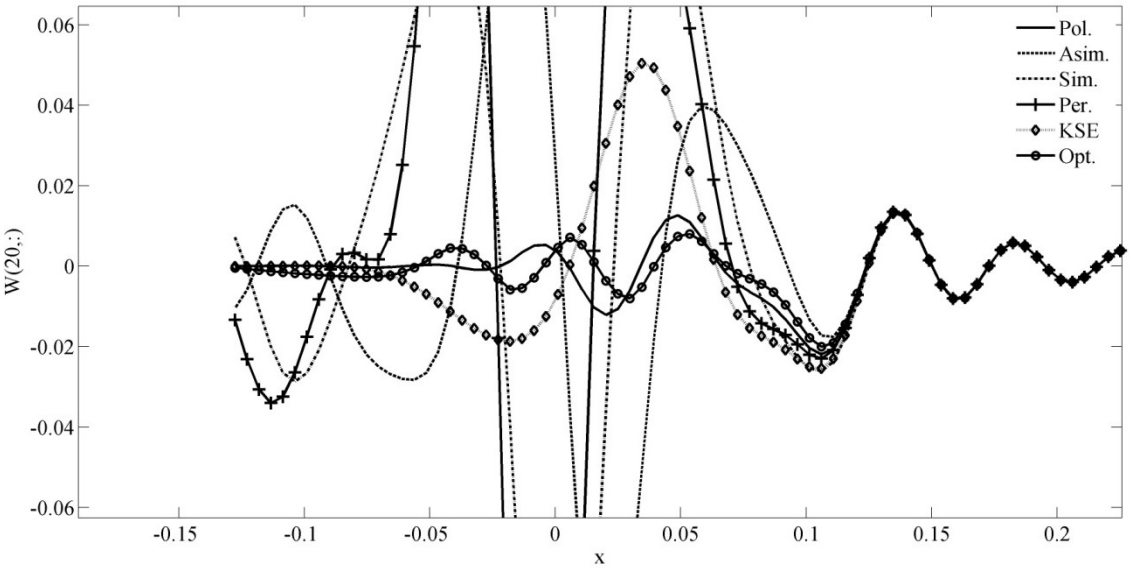
	s=10					s=20				
Yöntem	B_L	Hata	B_R	Hata	TS	B_L	Hata	B_R	H	TS
Pol.	7.57E-3	**3**	5.96E-2	**12**	3.4	8.43E-2	**17**	1.67E-1	**40**	3.46
Asim.	1.00E-1	**>>**100	2.59E-1	>>100	---	4.92E-1	**>>**100	5.27E-1	>>100	---
Sim.	8.88E-2	>>100	1.64E-1	>100	---	7.31E-1	>>100	1.16E0	>>100	---
Per.	2.88E-1	>>100	2.88E-1	>>100	---	1.04E0	>>100	1.04E0	>>100	---
KSE	1.29E-2	**75**	8.33E-2	**23**	---	2.05E-1	>100	8.47E-1	**>>**100	---
Opt.	7.35E-3	---	6.79E-2	---	126	7.16E-2	---	1.19E-1	---	1.07



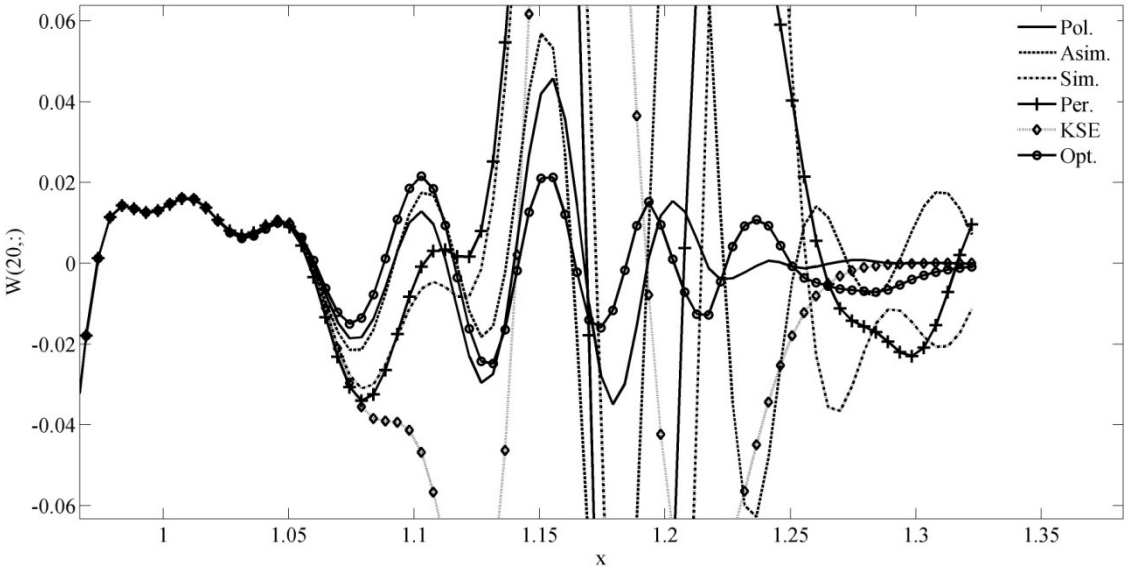
Şekil 3.11 3. titreşim modunun farklı yöntemlerle genişletilmesi.



a)



b)



c)

Şekil 3.12 3. titreşim modunun s=20 ölçeğindeki SDD katsayıları. b) ve c)'deki grafikler a)'dakinin uç noktalar civarındaki büyütülmüş halidir.

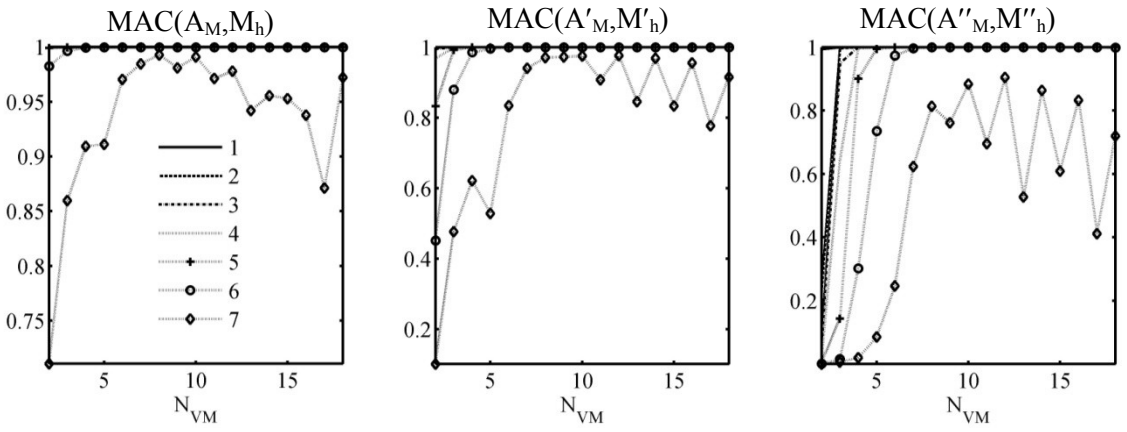
3.2. Hasar Teşhisi

(2.21) eşitliğinde üç adet hasar indisi verilmişti. Bunlardan I_I ve I_{III} kullanılagelen indisler olup I_{II} bu tez çalışmasında önerilmiştir. Öncelikle tek boyutlu bir veri kullanılarak I_{II}'nin özellikleri araştırılacaktır. Daha sonra iki boyutlu yapılara uygulama konusu ele alınacaktır.

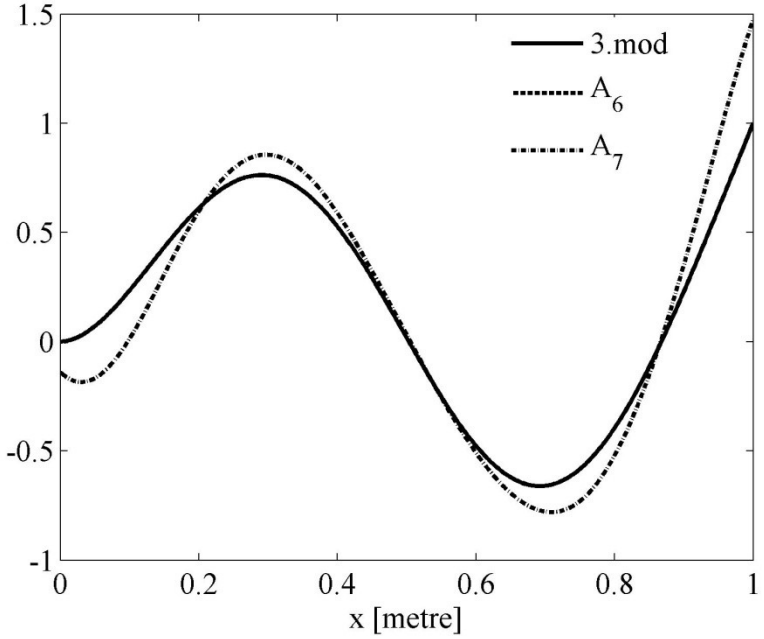
3.2.1 I_{II} indisinin kullanımı

Bu indisle HT için öncelikle ADD'de kullanılacak dalgacığın N_{VM} değeri ve uygun ayrışım düzeyi belirlenmelidir. Bu iki husus örneklerle izah edilecektir. Boyu L=1m, kesit ölçüleri w=20mm, h=30mm (bkz. Şekil 2.1) olan çelik bir kiriş (E=200GPa, ρ=7800kgm^{-3}, ν=0.33) dikkate alınmıştır. Kiriş üzerinde üç farklı konumda derinliği 1mm olan çentikler bulunmaktadır: $x_{c,1}$=0.3L, $x_{c,2}$=0.55L, $x_{c,1}$=0.8L. Bu noktalar rastgele seçilmiştir. Ankastre-serbest (AS) sınır şartları için N_e=500 alınarak

titreşim modları hesaplanmıştır. Örneğin 3. titreşim modu için ilk birkaç ayrışım düzeyinde yaklaşım fonksiyonu ve hasarlı mod şekli arasındaki korelasyon katsayıları Şekil 3.13'deki gibi değişmektedir. Daha önce, bir M. düzeydeki yaklaşım fonksiyonu A_M ile hasarlı haldeki titreşim modu M_h arasındaki korelasyonu arttırmak için N_{VM} değeri yüksek bir dalgacık kullanılması önerilmişti. Şekil 3.13 bu öneriyi haklı çıkarmaktadır: Belli bir düzeyde N_{VM} arttıkça korelasyonlar artmaktadır. Dalgacık katsayılarının lokal süreksizliklere duyarlı olduğu, süreksizlik noktasındaki katsayıların daha yüksek genlikli olduğu hatırlanırsa, özellikle küçük N_{VM} halinde, artan düzeyle eğim ve eğrilikle ilgili korelasyonların önemli derecede azalması anlaşılır. Öte yandan, verilen örnekte 7. düzeydeki indisler diğer düzeydekilere göre oldukça gelişigüzel değişmektedir. Bunun sebebi, bu düzeyin kabul edilebilir sınırlar dışında olmasıdır. Çünkü bu düzeydeki yaklaşım fonksiyonu A_7 ve M_h karşılaştırılırsa (Şekil 3.14) ikisi arasındaki şekil benzerliğinin yeterli olmadığı görülür. Hâlbuki bir önceki düzeydeki yaklaşım fonksiyonu A_6 ve M_h gayet uyumludur. Burada A_M ve M_h arasındaki korelasyonun iyi olduğu ayrışım düzeyleri ile ilgilenilmektedir. Aksi halde, önerilen hasar indisi doğru sonuç vermez.

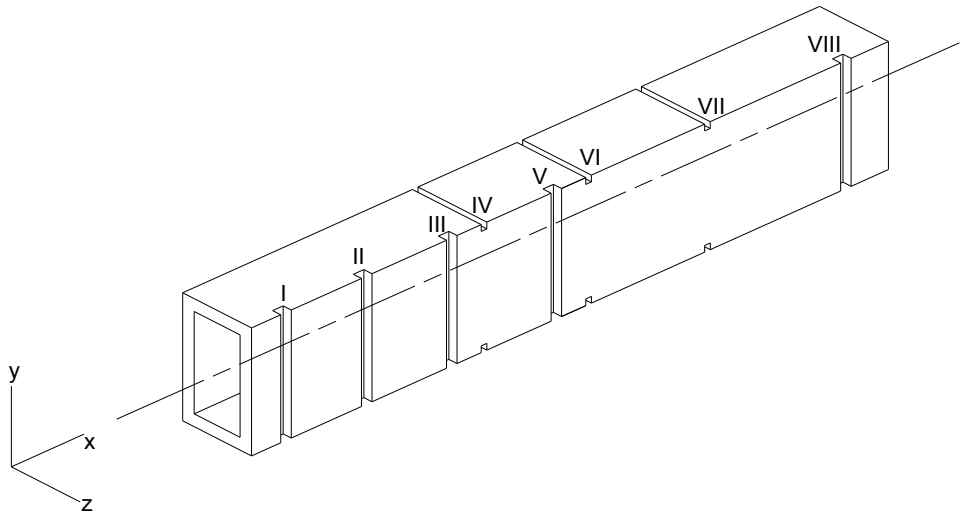


Şekil 3.13 AS kirişin 3. titreşim modu için MAC indislerinin ADD ayrışım düzeyi (1'den 7'ye kadar rakamlarla gösterilmiştir) ile değişimi ′=d/dx.



Şekil 3.14 3. titreşim modu ve bundan elde edilen yaklaşım fonksiyonlarının karşılaştırılması. ADD'de sym14 dalgacığı kullanılmıştır.

Yukarıda bahsedilen durum hasar derecesi, sınır şartı, veri uzunluğu gibi parametrelerden bağımsızdır. Böyle olduğu deneysel titreşim modları ile de gösterilebilir. Bu amaçla, özellikleri Şekil 3.7'de verilen kirişte hasar oluşturup aynı ayarlarla bir deney daha yapılmıştır. Hasar, çelik bir el testeresi ile Şekil 3.15'de numaralandırılmış konumlardan y ve z doğrultularında, derinliği 2mm çentikler açılarak oluşturulmuştur. Çentik yerleri ile ilgili geometrik bilgiler Çizelge 3.9'da gösterilmiştir. Hasarlı halde ölçülen 73 adet FCF ve bunların sanal kısımlarının değişimi Şekil 3.16'da verilmiştir. Hasarın doğal frekansları azalttığı daha önce belirtilmişti. Görüldüğü gibi, açılan çentikler FCF ve Sanal(FCF) piklerini frekans ekseninde sola kaydırmıştır. FCF'lerden elde edilen titreşim modları Şekil 3.17'de gösterilmiş, bunlar sağlıklı haldeki deneysel modlarla karşılaştırılmıştır. Şeklin altında, sağlıklı ve hasarlı haldeki deneysel titreşim modları arasındaki korelasyonu ifade eden MAC matrisi de verilmiştir. MAC matrisinin köşegen elemanlarına bakıldığında hasar ve ölçüm hatası gibi bozucu etkilerden en fazla üçüncü titreşim modunun etkilendiği anlaşılmaktadır.



Şekil 3.15 Deneysel titreşim modları ölçülen kirişte hasar konfigürasyonu.

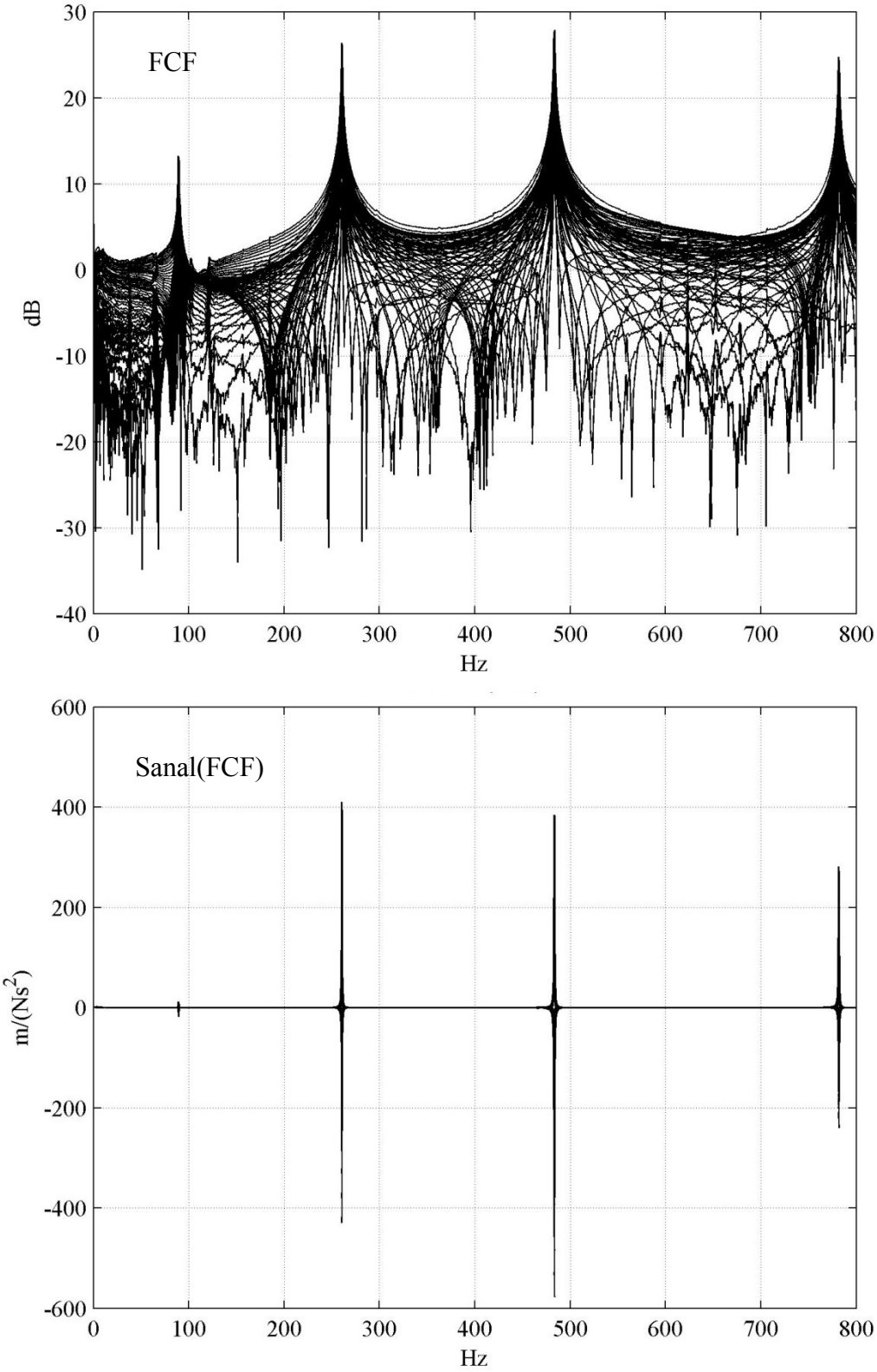
Çizelge 3.9 Deneysel titreşim modları ölçülen kirişte hasar yeri ve özellikleri

Hasar Yeri →	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Arasında olduğu ölçüm noktaları *	1-2	13-14	31-32	32-33	40-41	41-42	60-61	71-72
1 nolu ölçüm noktasına uzaklık oranı	6.94E-3	0.1736	0.4236	0.4375	0.5486	0.5625	0.8264	0.9791
Hasar Şekli	a	a	a	b	a	b	b	a

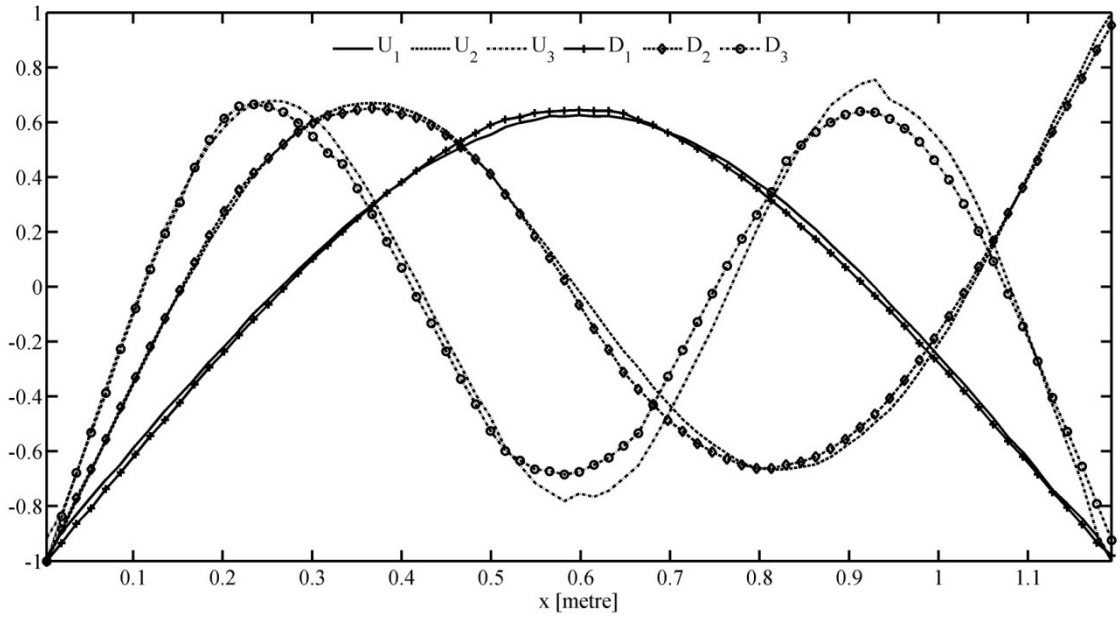
a: Kiriş eksenine dik doğrultuda, uzunluğu uzun kenar boyuna eşit, derinliği 2mm ve sadece bir uzun kenar üzerindedir.

b: Kiriş eksenine dik doğrultuda, uzunluğu kısa kenar boyuna eşit, kısa kenarların her ikisi üzerinde birer tane ve her birinin derinliği 2 mm'dir.

*: Şekil 3.7'deki ölçüm noktaları



Şekil 3.16 Hasarlı kirişin deneysel FCF eğrileri ve bunların sanal kısımlarının grafiği. Ref. 1m/(Ns^2)

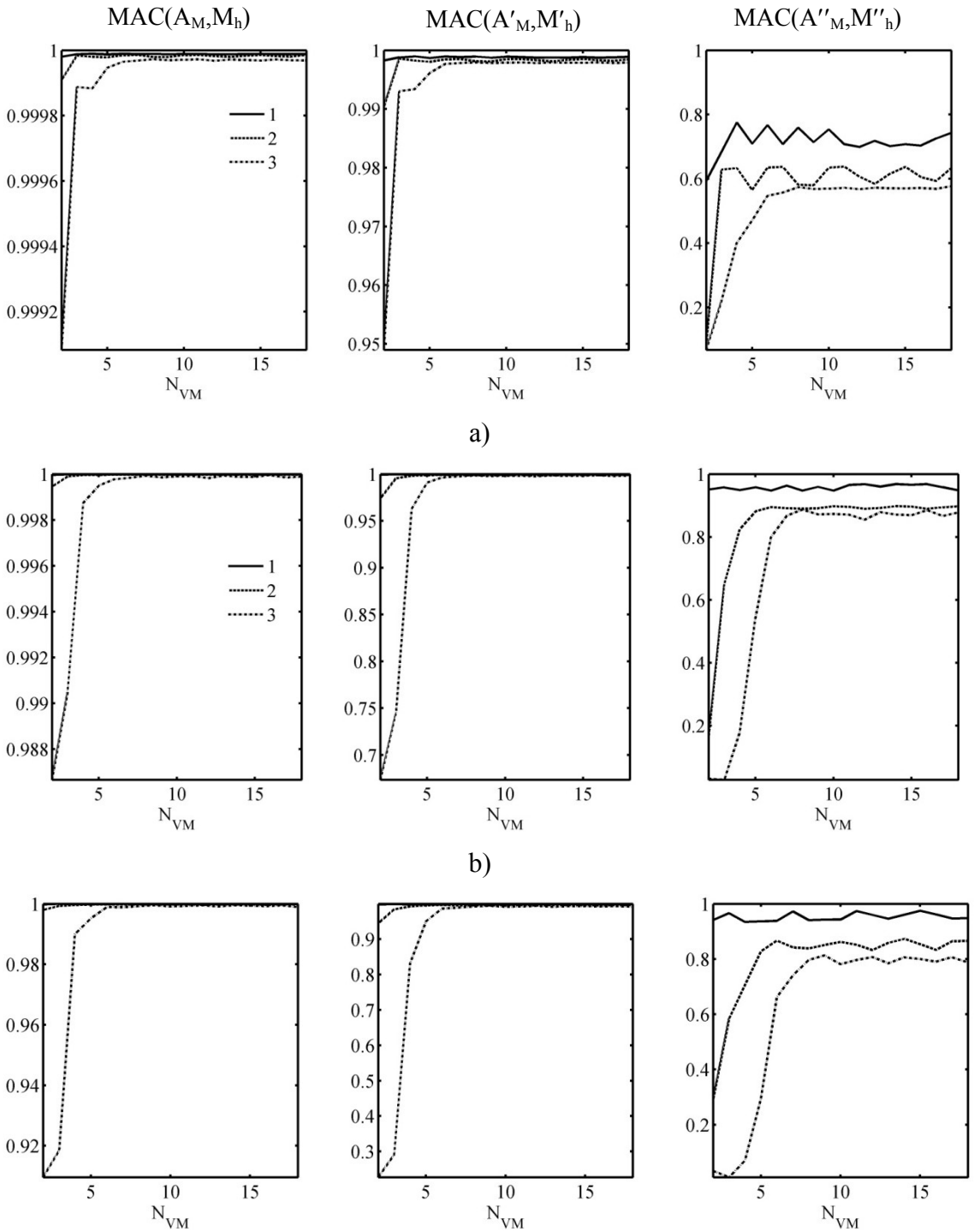


MAC matrisi

$$\begin{array}{c} \\ U \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{ccc} D & & \end{array} \\ \begin{pmatrix} \mathbf{99.86} & 0.00 & 0.02 \\ 0.16 & \mathbf{99.67} & 0.00 \\ 0.23 & 0.33 & \mathbf{98.72} \end{pmatrix} \end{array}$$

Şekil 3.17 Hasarlı (D) ve sağlıklı (U) haldeki kirişin ilk üç deneysel mod şekli

Söz konusu deneysel veri Şekil 3.13'ü elde etmede kullanılan titreşim modundan çok farklıdır: burada sınır şartları SS iken evvelkinde AS'dir. Veri uzunluğu bir öncekinde N_M=500 idi, şimdi N_M=73'tür. Öncekinde sadece üç yerde 1mm derinlikli çentik vardı, şimdi çentiklerin sayısı ve derinliği fazla olup farklı konumdadırlar. Ayrıca, az önceki veride parazit yok denecek kadar az olduğundan korelasyon indisleri 1'e çok yakındı. Fakat şimdi parazit önemli derecededir, bu sebeple indisler biraz daha azalmıştır (Şekil 3.18). Veri uzunluğu şimdi daha kısa olduğundan ADD ayrışım düzeyi için kabul edilebilir aralık bu kez daha dardır. Bütün bunlara rağmen, deneysel verilerle hesaplanan indisler herhangi bir düzeyde yüksek korelasyon elde etmek için N_{VM} değeri yüksek bir dalgacık kullanmak gerektiğini göstermektedir.



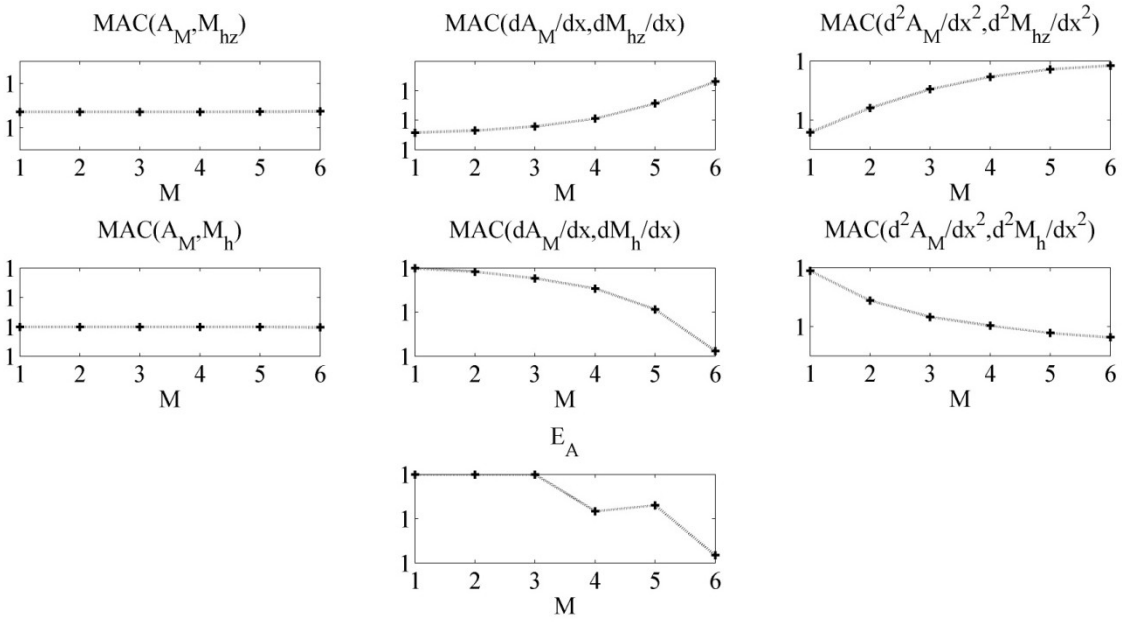
Şekil 3.18 SS kirişin deneysel titreşim modları için A_M ve M_h arasındaki korelasyonların ADD ayrışım düzeyi ile değişimi. a) 1.Mod, b) 2.Mod, c) 3.Mod.

Şekil 3.13 ve 18 incelendiğinde, bir düzeyde belli N_{VM}'den sonra indislerdeki artışın azaldığı görülmektedir. Bu da beklenen bir değişimdir. Çünkü Şekil 2.14'e

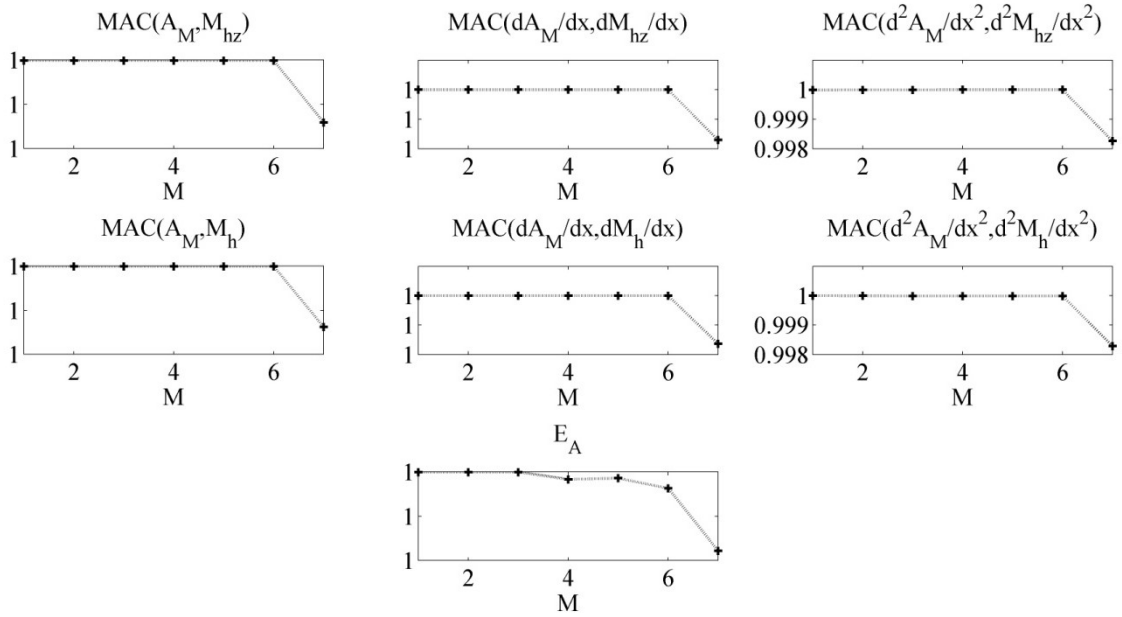
bakılırsa, filtre spektrumlarının N_{VM} arttıkça daralıp üst kısımlarının yassılaştığı ama bu değişimin yüksek N_{VM} değerlerinde önemsiz hale geldiği anlaşılır. Dolayısıyla, N_{VM} sayısını aşırı derecede arttırmaya gerek yoktur. Ayrıca yüksek N_{VM} hesap zamanı ve işlem hataları açısından da dezavantajlıdır (Douka ve ark. 2003, Tao ve ark. 2007) . Bu çalışmada, farklı özellikteki titreşim modları ile çok sayıda denemeler sonucu kazanılan tecrübeye dayanarak, ADD için N_{VM} sayısı [10,20] aralığında önerilmiştir. Bu aralıkta seçilen N_{VM} birçok durumda yeterli olmakla birlikte bazen sym10 ile sym20 arasında belirgin bir performans farkı oluşabilir. Böyle durumlarda aradaki dalgacıkları (sym12, …,20) da denemekte fayda vardır. Bu arada, daha önce "dalgacık seçimi" başlığında yüksek frekanslı parazitleri güçlendirdiği gerekçesi ile aşırı N_{VM}'lerden kaçınmak gerektiği tavsiye edilmişti. Burada ADD için önerilen aralığın bununla çelişkili olduğu akla gelebilir. Fakat ADD ortogonal bir dönüşüm olduğu için veriyi en az sayıda katsayı ile temsil etmek söz konusudur. Bu sırada sinyal enerjisi de korunur. Ayrıca burada ADD HT amacıyla değil, veri sıkıştırma özelliğinden yararlanarak M_h ile uyumlu bir A_M elde etmek için kullanılmaktadır. Sonraki uygulamalarda I_{II} indisi ile ilgili sonuçlar verilirken ADD'de kullanılan dalgacığın N_{VM} sayısı ayrıca belirtilecektir.

ADD için N_{VM} değeri yüksek bir dalgacık seçtikten sonra, ikinci olarak, hangi düzeydeki A_M'nin uygun olduğuna karar vermek gelir. Bu amaçla korelasyon indislerinin, yaklaşım fonksiyonunun ve I_{II} indisinin ayrışım düzeyi ile değişimini incelemek gerekir. Yine Şekil 3.13 için kullanılan kiriş verisi ele alınarak bu durum izah edilecektir. Örneğin, birinci titreşim modu s=20 ölçeğinde sym6 dalgacığı ile genişletildikten sonra sym14 dalgacığı kullanılarak ADD ile 6. ayrışım düzeyine kadar ayrıştırılmıştır. Bu durumda indislerin değişimi Şekil 3.19a)'daki gibidir (indisler 1'e çok yakın olduğu için y eksenlerinde 1'e yuvarlatılmış değerler mevcuttur). Düzey arttıkça yüksek frekanslı bileşenler veriden ayıklanmaktadır. Böylece, A_M M_{hz} gibi düzgünleşmektedir. Bu sebeple, aralarındaki korelasyon yavaş yavaş artmaktadır. Bu artış eğim ve eğrilikle ilgili korelasyon katsayılarında daha belirgindir. Çünkü bunlar hasar kaynaklı değişimlere daha duyarlıdırlar. Diğer taraftan, aynı sebepten dolayı A_M ve M_h arasındaki korelasyon ve E_A düzey arttıkça yavaş yavaş düşmektedir. Hasar derecesi çok küçük, verideki parazit de önemsiz derecede olduğundan indislerdeki

değişim oldukça azdır. Fakat indislerin belirtilen şekilde değişmesi beklentiye uygundur.



a) M=1:6

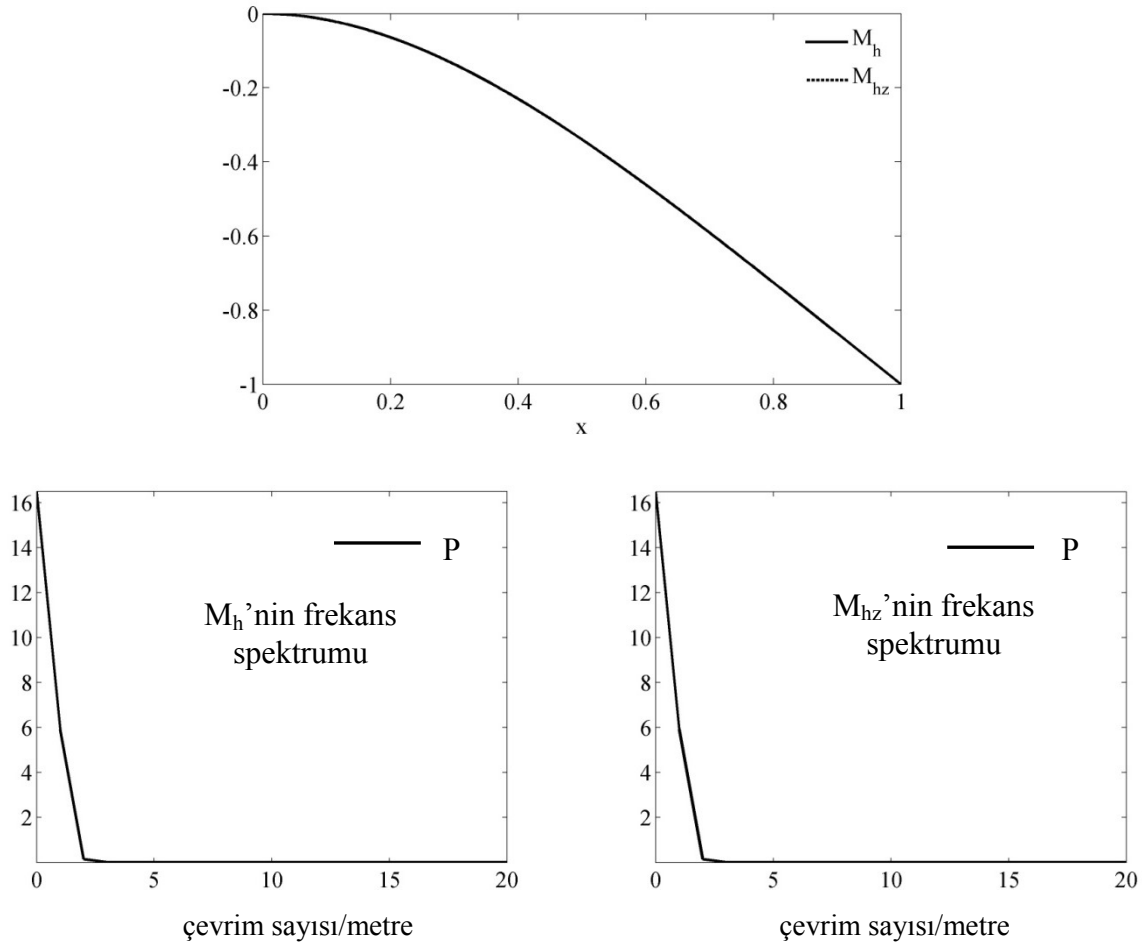


b) M=1:7

Şekil 3.19 1. titreşim modu için ayrışım düzeyi (M) ile korelasyon indislerinin değişimi. ADD'de sym14 dalgacığı kullanılmıştır.

Bir sonraki düzey de dikkate alınarak indis grafikleri tekrar çizdirilirse (Şekil 3.19b)) 7. düzeyde tüm indislerde ani düşüş meydana geldiği görülür. Bunun sebebi, bu düzeyden itibaren A_M'den yüksek enerjili küçük frekanslı bileşenlerin de ayrılmasıdır. Bu durumu izah etmek üzere titreşim modunun frekans spektrumunu (Şekil 3.20) incelemekte fayda vardır. Kiriş 500 elemana bölünerek mod şekilleri elde edilmişti. Hızlı FD'yi kullanmak üzere veri uzunluğu spline interpolasyonu ile 512'ye çıkarılmıştır[1]. Kiriş uzunluğu 1m olduğundan, bu durumda örnekleme frekansı 512 çevrim sayısı/metre (çs/m) olur. Nyquist örnekleme frekansına göre bu veride en fazla 512/2=256 çs/m'ye kadarki frekans bileşenleri sağlıklı bir şekilde analiz edilir (Ewins 2000, p. 212). Fakat enerji yoğunluğu 0 frekans civarındaki bileşenlerde toplanmıştır. Dolayısıyla, bu kısmı vurgulamak üzere Şekil 3.20'de 0-256 yerine 0-20 çs/m arası gösterilmiştir.

[1] FD'den önce sızıntıyı (*leakage*) azaltmak için mod verisi Hanning penceresi ile çarpılmıştır.



Şekil 3.20 1. titreşim modunun hasarlı ve hasarsız halde frekans spektrumları. P=(Y)(Y*)/512. Y: titreşim modunun FD'si. *: karmaşık eşlenik.

Spektrum grafiklerine bakıldığında, hasar ve parazit etkisi çok az olduğundan, yüksek frekanslı bileşen enerjilerinin veriye formunu veren düşük frekanslı bileşenlere göre çok az olduğu anlaşılmaktadır. Diğer taraftan, ölçek ve frekans arasındaki ilişki

$$\omega_s = \frac{\omega_c}{s\Delta} \tag{3.1}$$

şeklindedir (Misiti ve ark. 2007, p.6-69). Burada ω_c seçilen dalgacığın merkez frekansı, Δ örnekleme peryodu, ω_s de s ölçeğine karşılık gelen frekanstır. sym14 dalgacığının

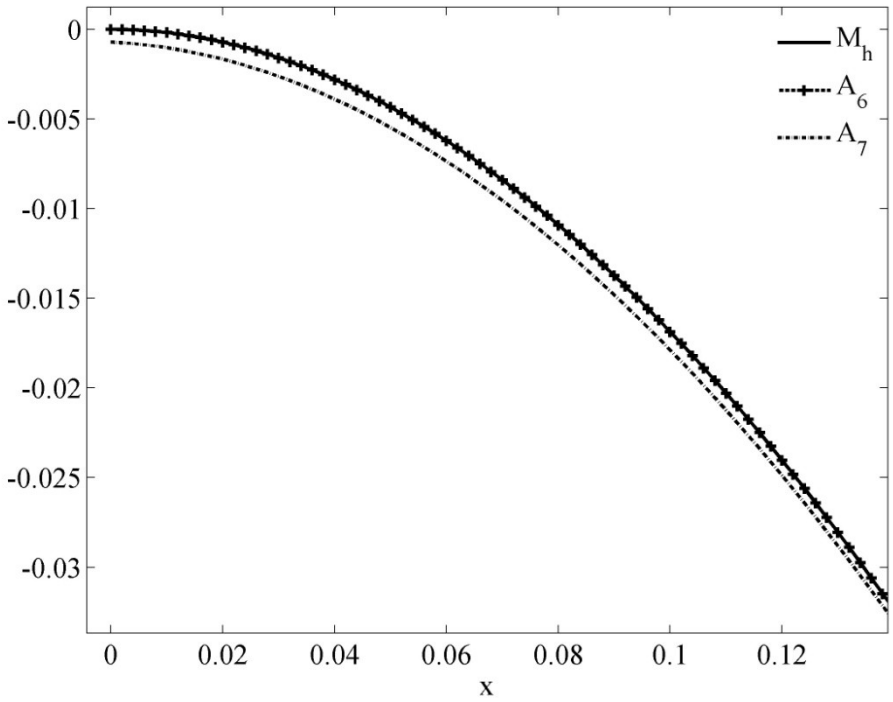
merkez frekansı 0.6667 Hertz'dir[1]. Örnekleme peryodu Δ=1m/512=0.0019m ve ADD'de ölçek $s=2^M$ şeklinde değiştiğinden, M=1:7 aralığında s ve ω_s Çizelge 3.10'daki değerleri alırlar:

Çizelge 3.10 sym14 dalgacığı için ölçek-frekans ilişkisi. (Örnekleme periyodu Δ=1m/512=0.0019m 'dir.)

M	1	2	3	4	5	6	**7**
s	2	4	8	16	32	64	128
ω_s [çs/u]	170	85	43	21	10.7	5.33	**2.67**

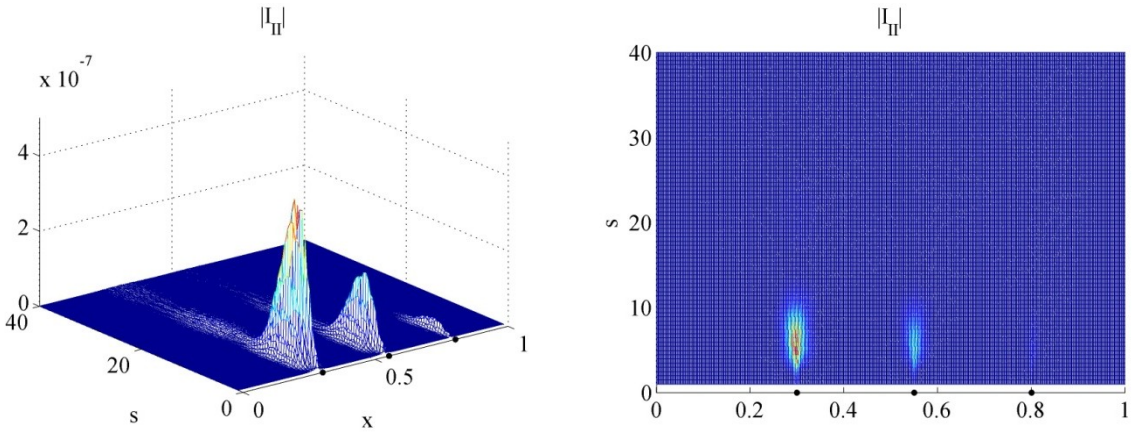
Görüldüğü gibi 7. düzeyle birlikte merkez frekansı 2.67 çs/m olan bileşenler ayıklanmaktadır. Hâlbuki bunlar Şekil 3.20'den de görüldüğü gibi yüksek enerjili bileşenlerdir. Bu bileşenlerin A_M'den ayıklanması A_M'nin M_h ve M_{hz} ile şekil benzerliğinin ciddi derecede azalması demektir. Dolayısıyla korelasyon indislerinde önemli düşüşler meydana gelmiştir. Gerçekten de 6 ve 7. düzeylerdeki A_M'ler kıyaslandığında A_7'nin M_h'den daha fazla saptığı görülmektedir (bkz. Şekil 3.21; sapmayı vurgulamak üzere şekilde verilerin belli bir kısmı büyütülerek gösterilmiştir).

[1] Bu değer MATLAB ortamında `centfrq('sym14')` komutuyla bulunmuştur.

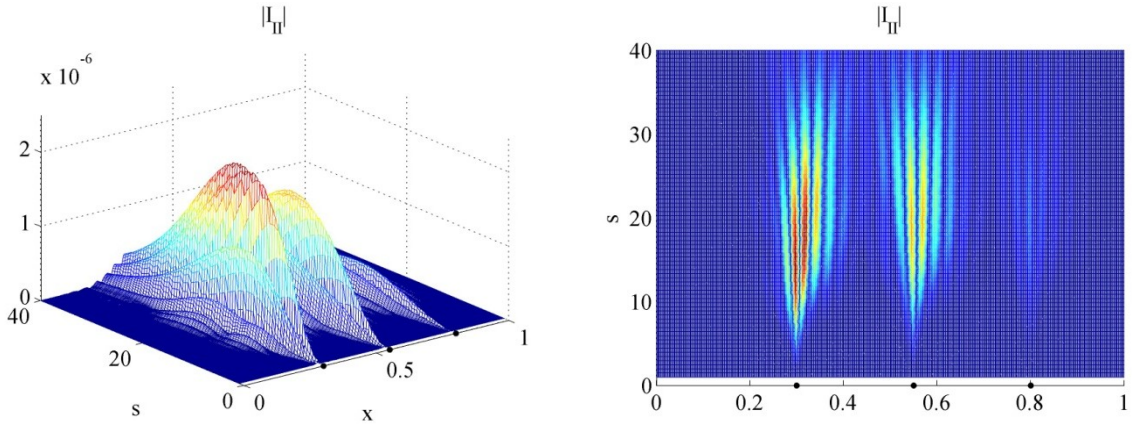


Şekil 3.21 6 ve 7. düzeylerdeki yaklaşım fonksiyonları ve titreşim modunun karşılaştırılması

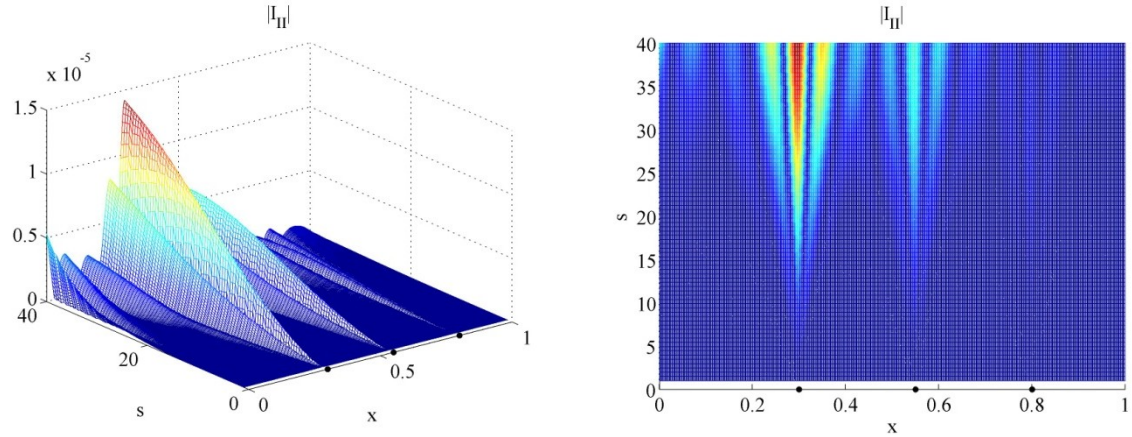
I_{II} indisinin düzeyle değişimine ait grafikler Şekil 3.22'de gösterilmiştir. İndislerin hem izometrik görünümü hem de xs düzleminde renk skalası görünümü verilmiştir. x ekseni üzerindeki siyah noktalar hasar yerlerini göstermektedir. Karşılaştırma amacıya I_I ve I_{III} indislerine ait grafikler de eklenmiştir. Düzey arttıkça A_M'den hasar kaynaklı bileşenler daha iyi ayıklandığından I_{II} indisinde hasar etkisi belirginleşmektedir. 6. düzeydeki I_{II} grafiklerine bakıldığında bunların I_I grafiklerine çok benzediği görülür. Bu durum, bu düzeyde elde edilen yaklaşım fonksiyonunun M_{hz} ile iyi korelasyonlu olduğuna işaret eder. Fakat 7. düzeyde, yukarıda bahsedilen gerekçelerden ötürü, korelasyon ciddi derecede azalmıştır. Buna paralel olarak, I_{II}'nin I_I'e benzerliği kötüleşmiştir. Şu halde uygun A_M bu örnek için M=6'dır. Dikkat çekici başka bir nokta, I_I ve I_{II}'de hasar kaynaklı değişimler belirgin olduğu halde I_{III}'de o kadar iyi olmamasıdır. Daha önce de ifade edildiği gibi hasar derecesi küçüldüğünde I_I I_{III}'e göre hasara daha duyarlı olur. Önerilen I_{II} indisi de I_{III} gibi sadece hasarlı haldeki veriyi kullanmaktadır, ama süreksizliğe duyarlılığı daha fazladır.


|I_II|
x 10^-7
4
2
0
40
20
0
s
0
0.5
1
x
|I_II|
40
30
20
10
0
s
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1

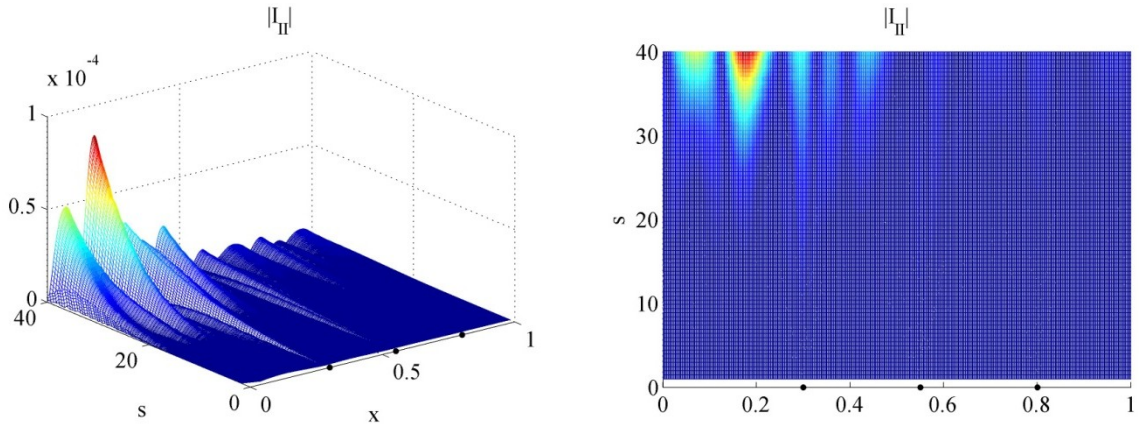
a) M=2


|I_II|
x 10^-6
2
1
0
40
20
0
s
0
0.5
1
x
|I_II|
40
30
20
10
0
s
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1

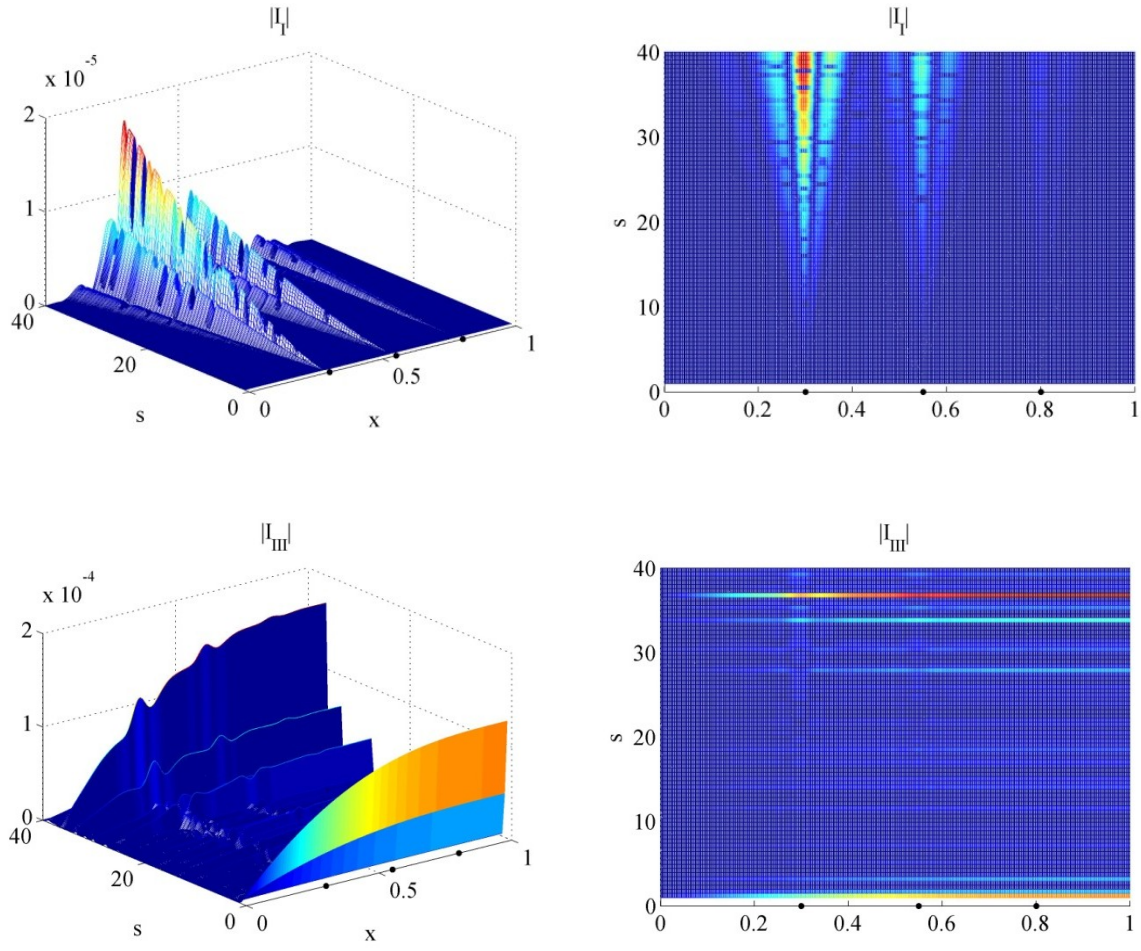
b) M=4


|I_II|
x 10^-5
1.5
1
0.5
0
40
20
0
s
0
0.5
1
x
|I_II|
40
35
30
25
20
15
10
5
0
s
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
x

c) M=6



d) M=7



e) I_I ve I_{III}

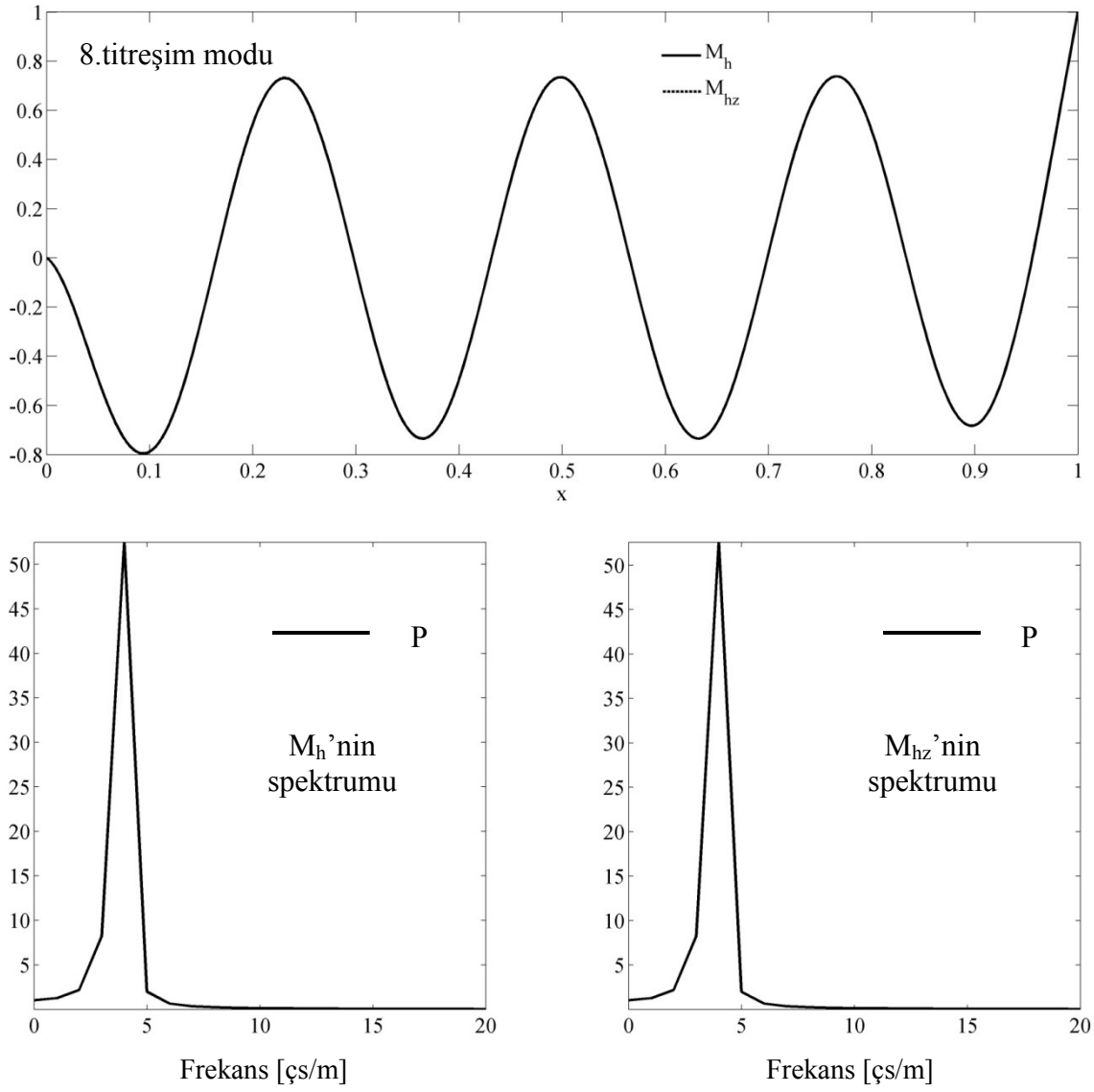
Şekil 3.22 1. titreşim modu için I_{II} indisinin düzeyle değişimi ve diğer indislerle karşılaştırılması. İndislerin hesabında sym6 dalgacığı kullanılmıştır.

Başka bir titreşim modu üzerinde de korelasyon indislerinin ve I_{II}'nin değişimi gösterilecektir. Bu kez aynı kirişin 8. titreşim modu dikkate alınmıştır. Hasarlı ve sağlıklı haldeki titreşim modları ile bunların frekans spektrumları Şekil 3.23'deki gibidir. Şimdi mod şekli daha salınımlı olduğundan merkez frekansı da fazladır. Hasar ve diğer bozucu girişlerin etkisi yine azdır. Bu sebeple M_h ve M_{hz} ile bunların spektrumları yine birbirine çok benzemektedir. Spektrum grafiklerine ve Çizelge 3.10'a bakıldığında, ADD'de aynı dalgacık kullanılması halinde uygun ayrışım düzeyinin daha küçük olacağı anlaşılmaktadır. Çünkü mod şeklinin profilini oluşturan temel bileşenler şimdi daha yüksek frekanslıdır. Dolayısıyla, daha erken bir düzeyde bu bileşenler de ayıklanmaya başlayacaktır. Böylece, korelasyon indisleri daha erken bir düzeyde ani düşüş gösterecektir.

Titreşim modu yine aynı dalgacıkla genişletilmiş, ADD'de tekrar sym14 dalgacığı kullanılmıştır. Bu halde korelasyon indislerinin M=1:4 ve M=1:5 arasında değişimleri Şekil 3.24'deki gibidir. Görüldüğü gibi bu kez beklenen değişim daha küçük bir düzeyde meydana gelmiştir: 4. düzeye kadar, beklentiye uygun olarak, A_M ve M_{hz} arasındaki korelasyonlar artmış, A_M ve M_h arasındakiler ve E_A azalmıştır. 5. düzeyde korelasyon indislerinin tamamı aniden düşmüştür.

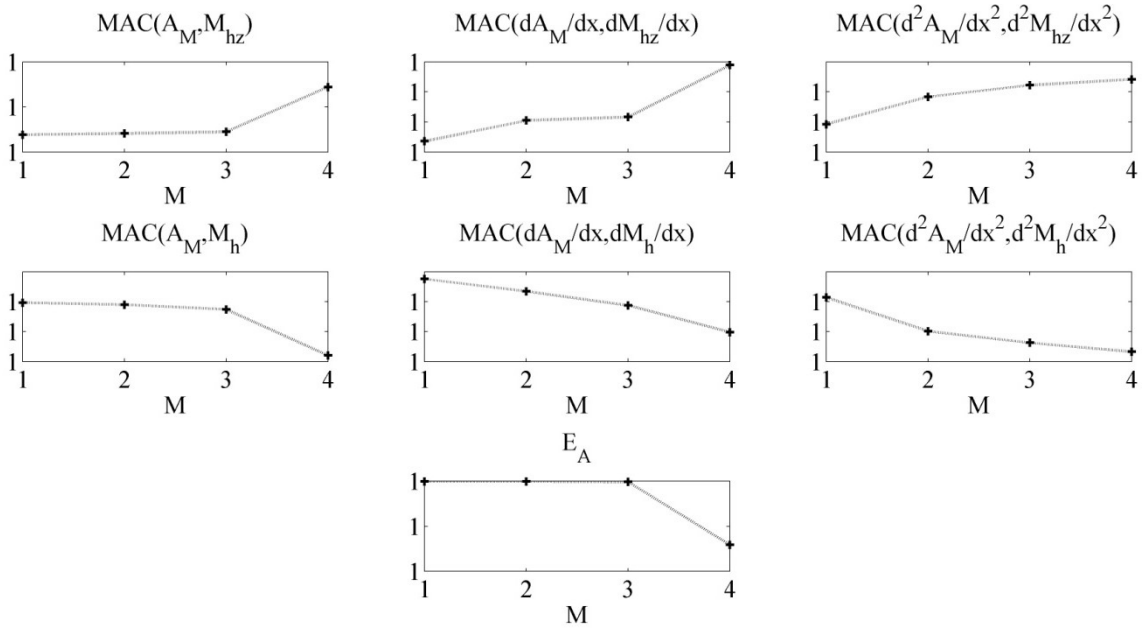
I_{II} indisinin düzeyle değişimine bakıldığında (Şekil 3.25) 4. düzeye kadar hasar etkisinin belirginleştiği, 5. düzeyde kaybolduğu görülmektedir. Bu durumda mevcut veri için uygun A_M 4.düzeydekidir. M=4 halindeki I_{II} ile I_I ve I_{III} karşılaştırıldığında I_{II}'nin performans bakımından I_I ve I_{III}'ün arasında olduğu anlaşılmaktadır: I_{III} grafiğinde hasar etkisi belirgin olmadığı halde I_{II}'de görülmektedir. Fakat I_{II} grafiğinde sol uçta bozulmadan kaynaklanan değişimler de önemli derecededir. Hâlbuki I_I'de sadece hasar kaynaklı değişimler mevcuttur. Hasar etkisini açığa çıkarmasına rağmen I_{II}'deki bu anormalliğin sebebi bozulma azaltma yaklaşımının yetersizliği olabilir. Önerilen genişletme yönteminde genişletme belli bir ölçekte yapılır. Bu sebeple, bozulmanın her düzeyde genişletme ölçeğindeki kadar az olması garanti edilemez. Dolayısıyla, bu çalışmada önerilen yöntemle bulunan yaklaşım fonksiyonunun özellikleri M_{hz}'e benzer ama birebir aynı olmaz. Ayrıca, x=0.3m konumundaki hasar eğriliğin çok küçük olduğu bir noktada bulunduğundan (Şekil 3.26) buna ait hasar etkisi

çok belirgin değildir[1]. Dolayısıyla, sol tarafta bozulma kaynaklı genlikler daha belirgindir.

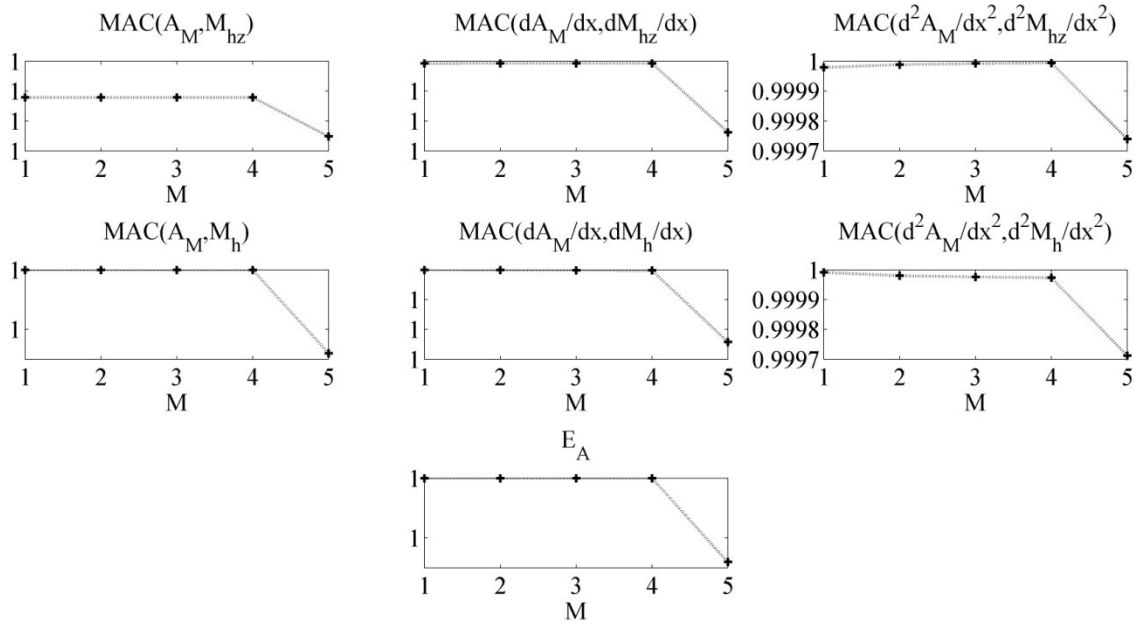


Şekil 3.23 Hasarlı ve sağlıklı halde 8.titreşim modu ve frekans spektrumları. P=(Y)(Y*)/512. Y: titreşim modunun FD'si. *: karmaşık eşlenik.

[1] Eğriliğin yüksek olduğu yerde hasar etkisi daha fazladır (Trentadua ve ark. 2007).

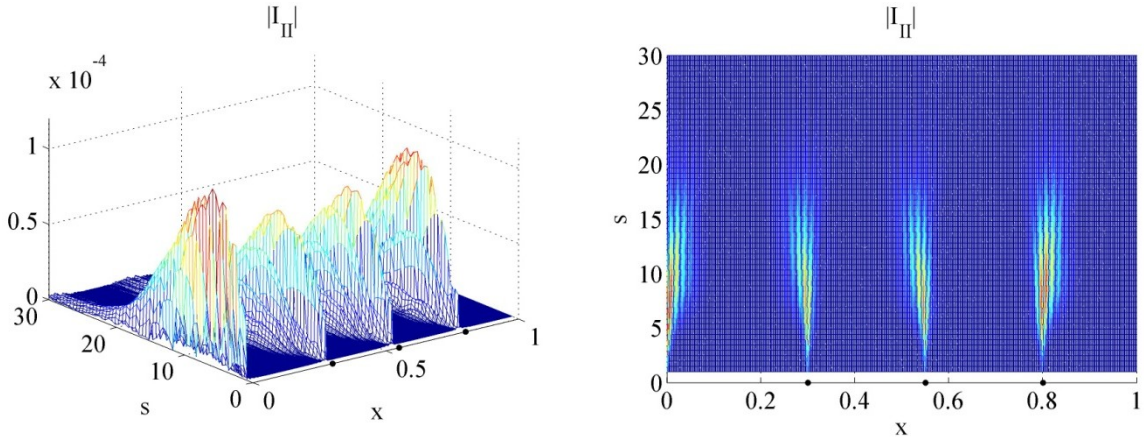


a) M=1:4

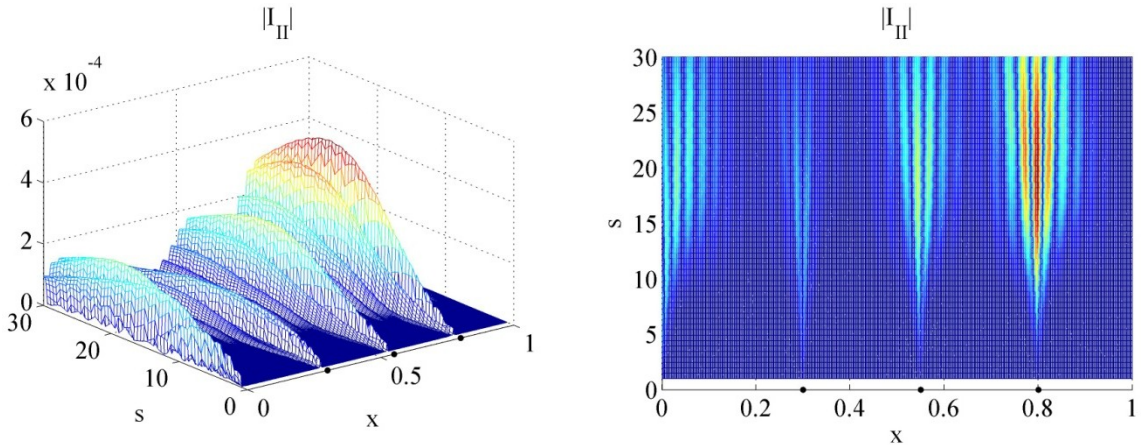


b) M=1:5

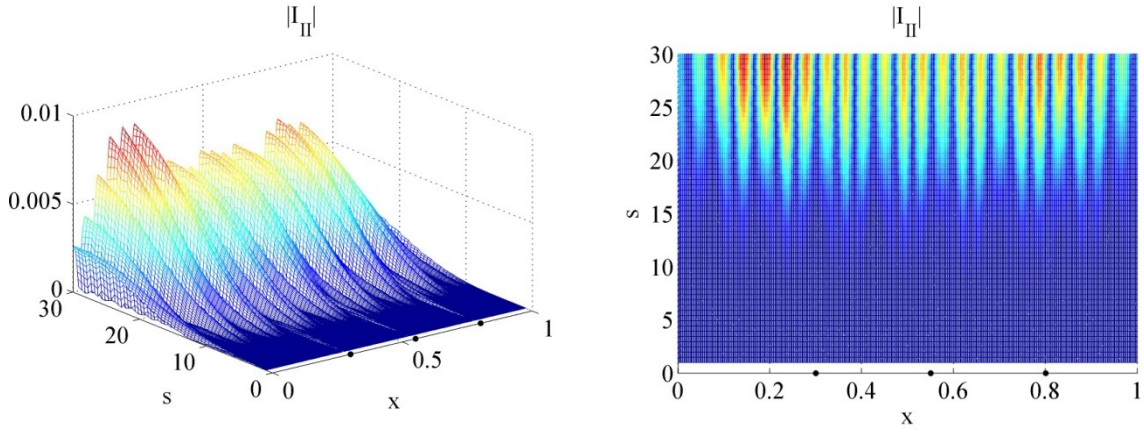
Şekil 3.24 Hasarlı kirişin 8. titreşim modu için korelasyon indislerinin ADD ayrışım düzeyi M ile değişimi


|I_II|
x 10^-4
1
0.5
0
30
20
10
0
s
0
0.5
1
x
|I_II|
30
25
20
15
10
5
0
s
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
x

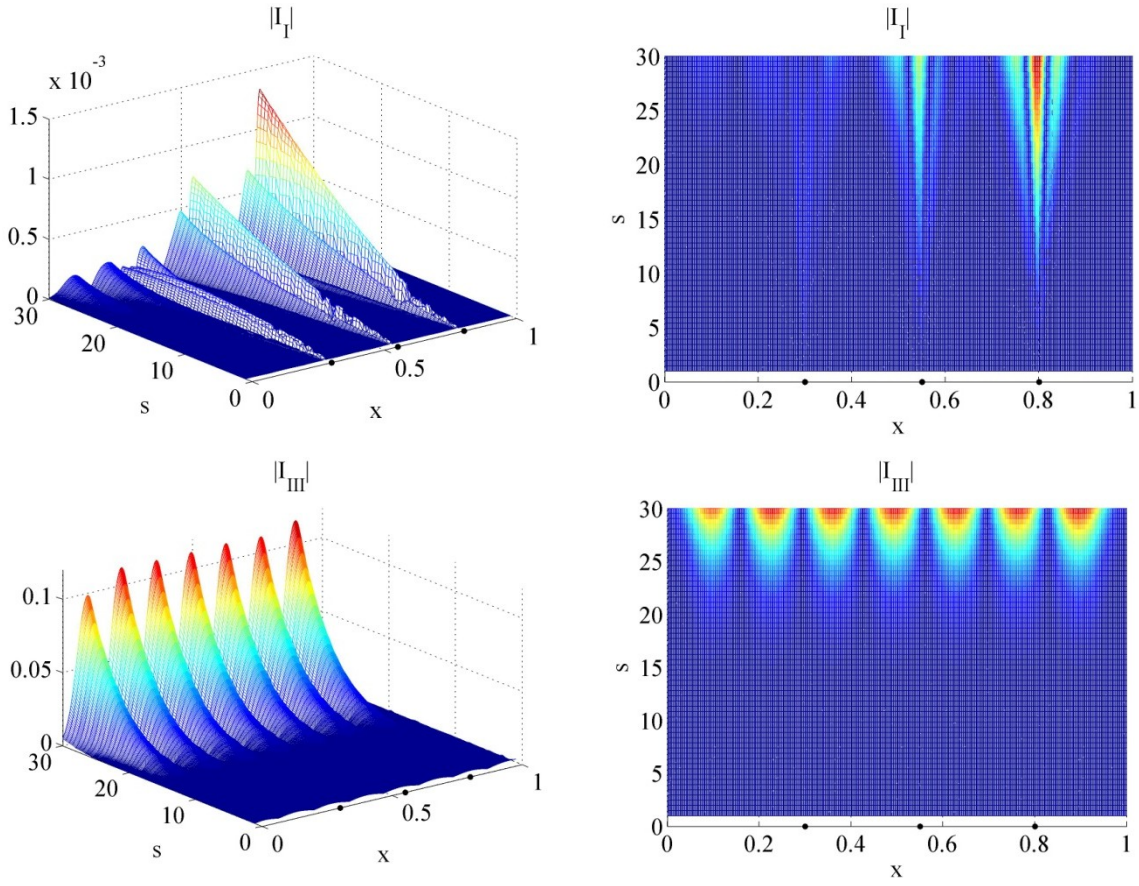
a) M=3


|I_II|
x 10^-4
6
4
2
0
30
20
10
0
s
0
0.5
1
x
|I_II|
30
25
20
15
10
5
0
s
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
x

b) M=4

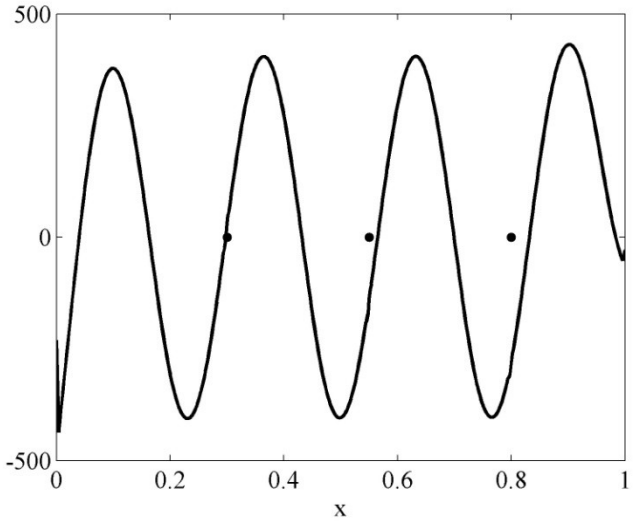

|I_II|
0.01
0.005
0
30
20
10
0
s
0
0.5
1
x
|I_II|
30
25
20
15
10
5
0
s
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
x

c) M=5



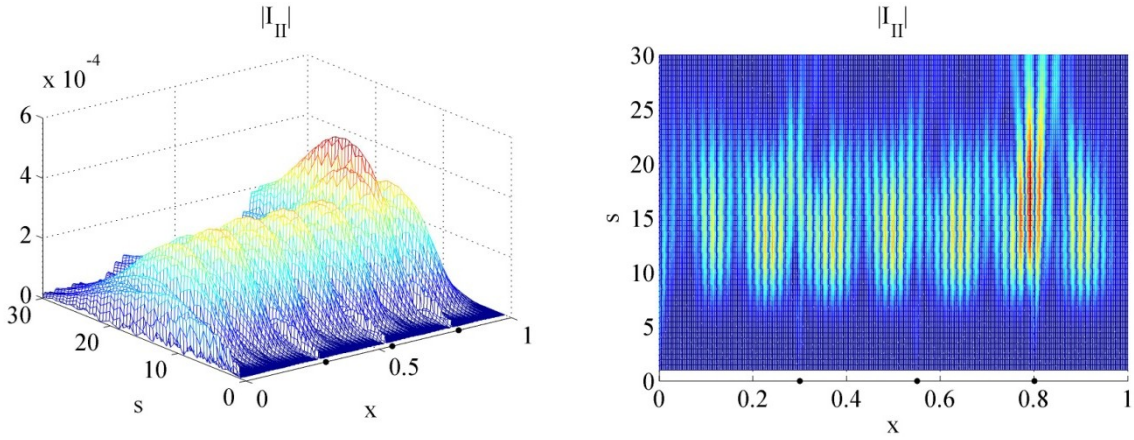
d)

Şekil 3.25 8. Titreşim modu için I_{II} indisinin düzeyle değişimi ve diğer indislerle karşılaştırılması

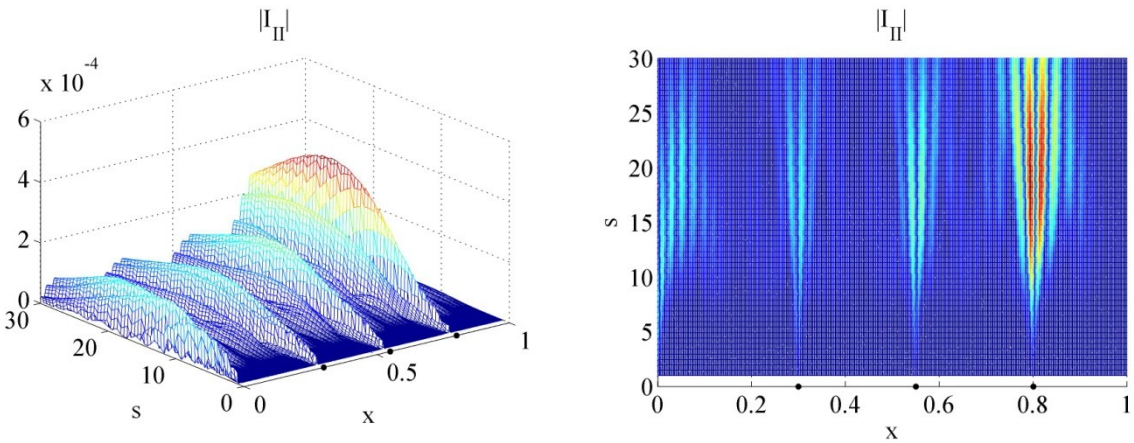


Şekil 3.26 8.titreşim modunun eğriliği
(Siyah noktalar hasar yerlerini temsil etmektedir)

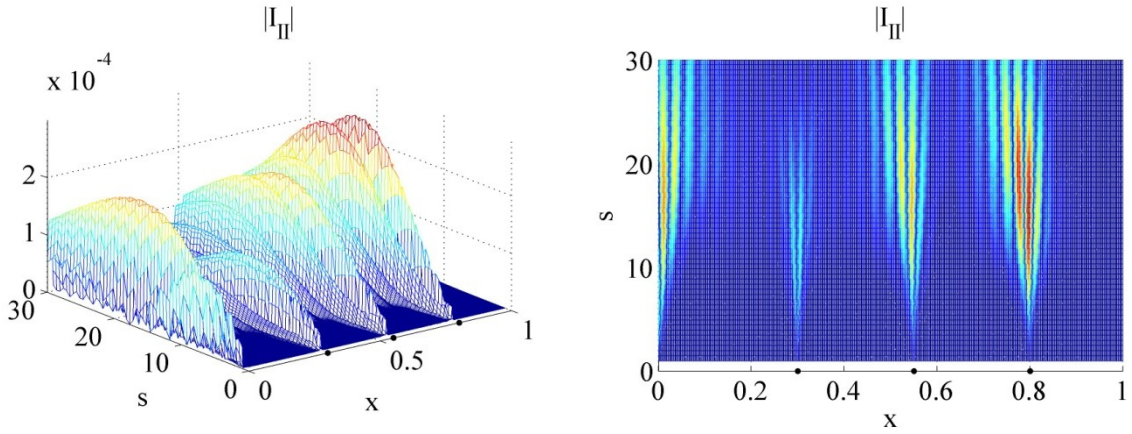
Daha önceden ADD için uygun N_{VM}'nin [10,20] aralığında seçilmesi önerilmişti. Şekil 3.27'ye bakılırsa, bu örnek için, ADD'de sym8 dalgacığının yeterince uygun olmadığı, sym10 ve sym20 arasında da belirgin bir fark olmadığı görülmektedir (Şekil 3.27). Sadece sym20 halinde sol taraftaki bozulma biraz daha artmıştır. Bunun sebebi sym20 dalgacığının N_{VM} sayısı daha yüksek olmasıdır. Dolayısıyla bu tarz bir değişim normaldir. Bazen sym10 ve sym20 kullanılması durumları arasındaki fark buradakinden daha fazla olabilir. Bu durumda, önerilen aralıktaki başka dalgacıklar denenerek en iyisini seçme yoluna gidilmelidir.



a) sym8



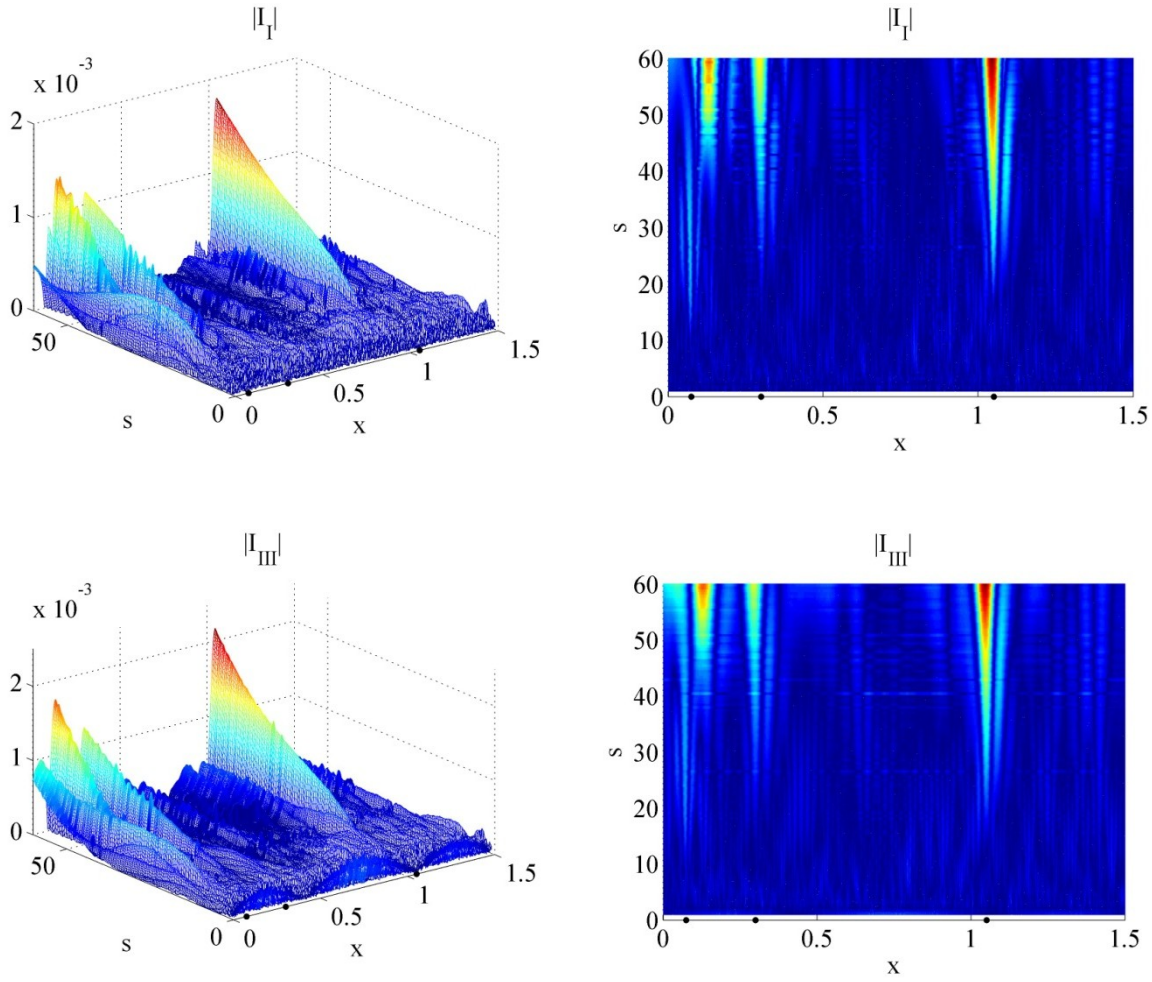
b) sym10



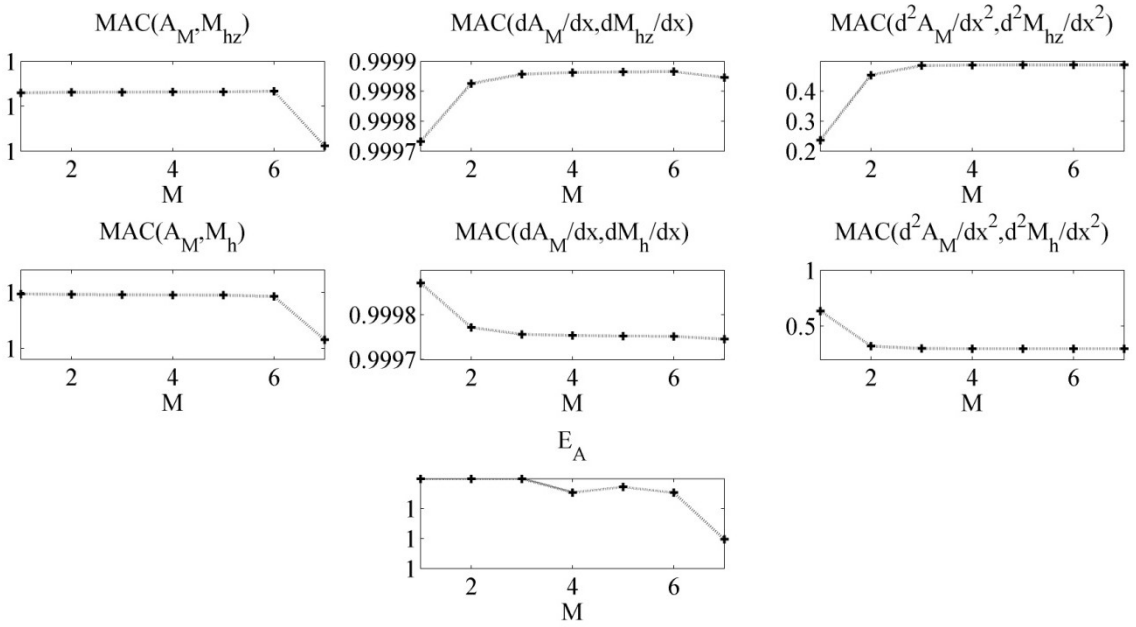
c) sym20

Şekil 3.27 ADD'de farklı dalgacıklar kullanılması halinde I_{II} indisinin değişimi. (8. titreşim modu kullanılmıştır)

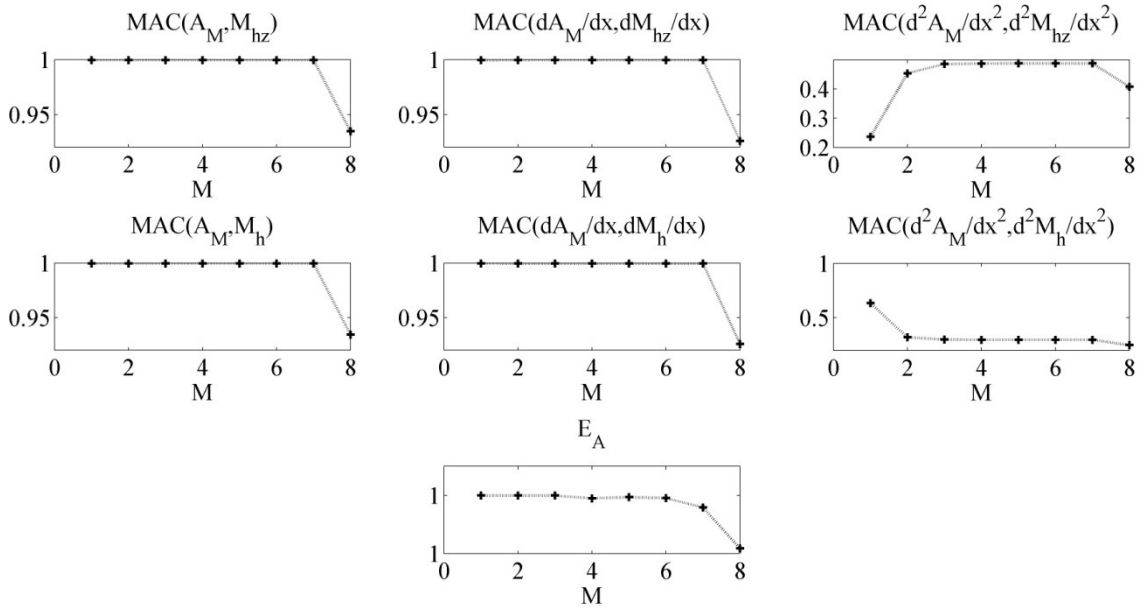
Başka bir uygulama için aynı kesit ölçüleri ve malzeme özelliklerine sahip, boyu L=1.5m olan bir kiriş dikkate alınmıştır. Şimdiki hasar yerleri farklıdır: $x_{c,1}$=0.05L, $x_{c,2}$=0.2L, $x_{c,3}$=0.7L. Yani bu durumda hasar yerlerinden biri sınıra çok yakındır. Hasar derecesi bu kez biraz daha yüksektir; çentiklerin derinliği 6mm'dir (bu durumda hasarlı kesit yüksekliği h_c=30-6=24mm'dir). Sınır şartlarında da farklılık sağlamak üzere bu kez AA mesnetleme kullanılmıştır. Bu halde N_e=1000 alınarak titreşim modları hesaplanmıştır (veri uzunluğu da önceki örnekten farklıdır). Ek olarak, veriye SNR=80dB olacak tarzda beyaz gürültü formunda parazit de eklenmiştir. Bu halde 2. titreşim modu s=30 ölçeğinde yine sym6 dalgacığı ile genişletilmiş, I_I ve I_{III} indisleri Şekil 3.28'deki gibi bulunmuştur. Çentik derinlikleri şimdi daha yüksek olduğu için I_{III} grafiğinde de hasar etkisi ortaya çıkmıştır. Ayrıca, hasar derecesi öncekinden daha fazla olduğundan bu halde I_I indisinin hasara duyarlılığı I_{III}'den çok farklı değildir.



Şekil 3.28 Hasarlı kirişin 2. titreşim modu için I_I ve I_{III} indisleri



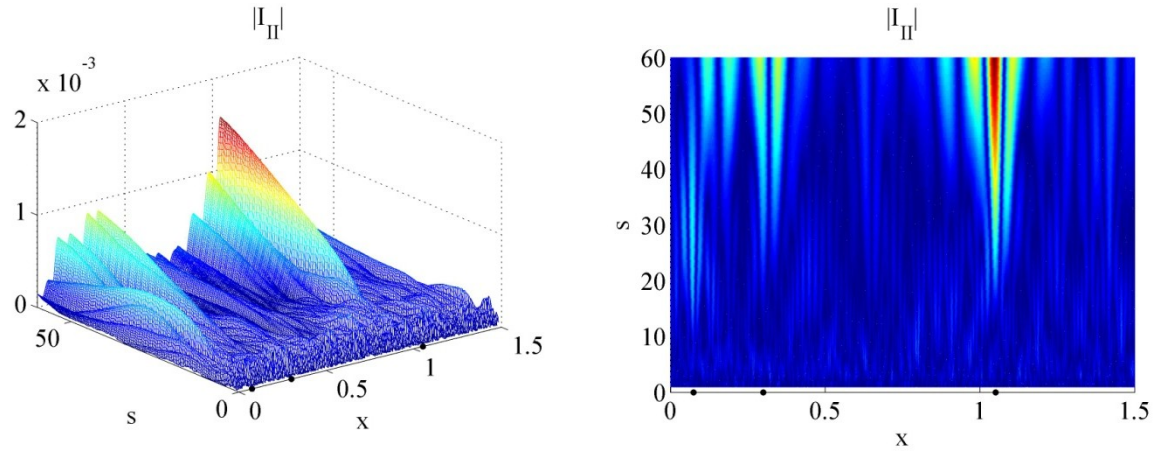
a) M=1-7



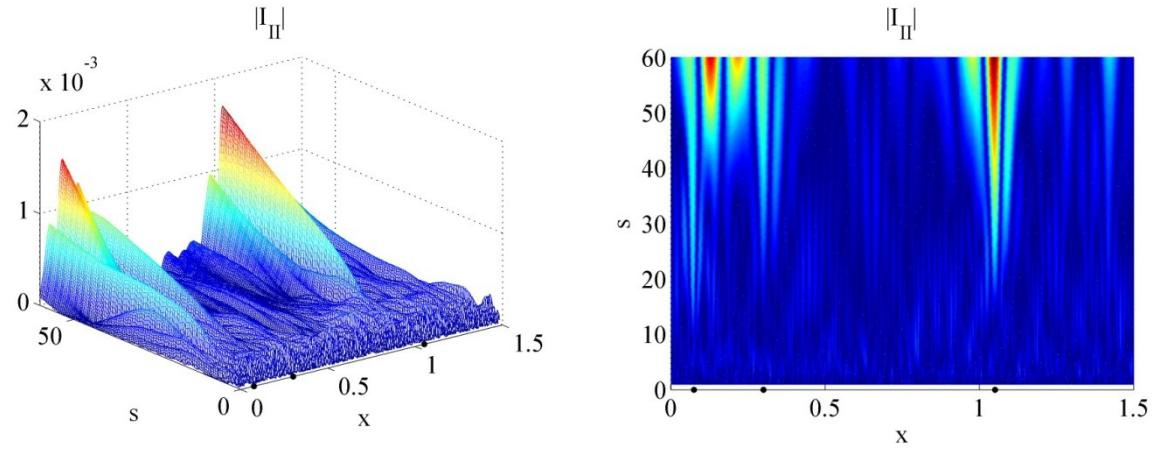
b) M=1-8

Şekil 3.29 Hasarlı kirişin 2.titreşim modu için korelasyon indislerinin ADD ayrışım düzeyi ile değişimi. ADD'de sym14 dalgacığı kullanılmıştır.

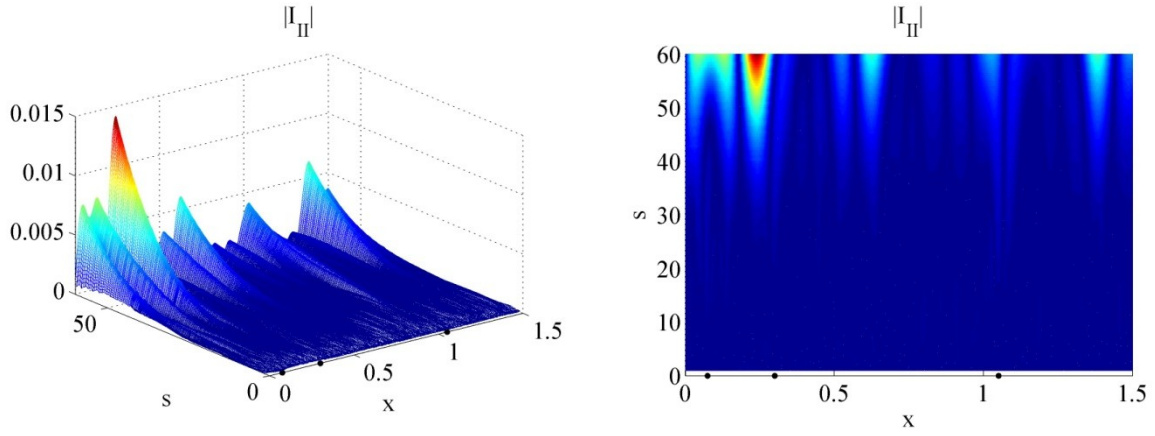
Hasarlı ve sağlıklı haldeki titreşim modlarının frekans spektrumları bundan önceki örneklere benzediği için verilmemiştir. I_{II} indisiyle ilgili korelasyonlar ADD ayrışım düzeyi ile Şekil 3.29'daki gibi değişmektedir. Parazit olduğu için, özellikle eğrilikle ilgili korelasyonlar bu halde daha azdır. Bununla birlikte, indislerin değişimi daha önceki örneklerle paralellik arz etmektedir. M=8'de indislerde önemli düşüşler gözlenmektedir. Dolayısıyla, ADD için uygun düzey şimdi M=7 alınabilir. I_{II} indislerine ait grafikler incelenerek de böyle olduğu görülebilir (Şekil 3.30). Hasar etkisini açığa çıkarmak bakımından I_{II} indisi I_I ve I_{III}'den çok farklı değildir. Dahası, sınıra yakın hasar kaynaklı değişimin I_{II}'de biraz daha belirgin olduğu görülmektedir (karş. Şekil 3.30b) ve Şekil 3.28).



a) M=6



b) M=7

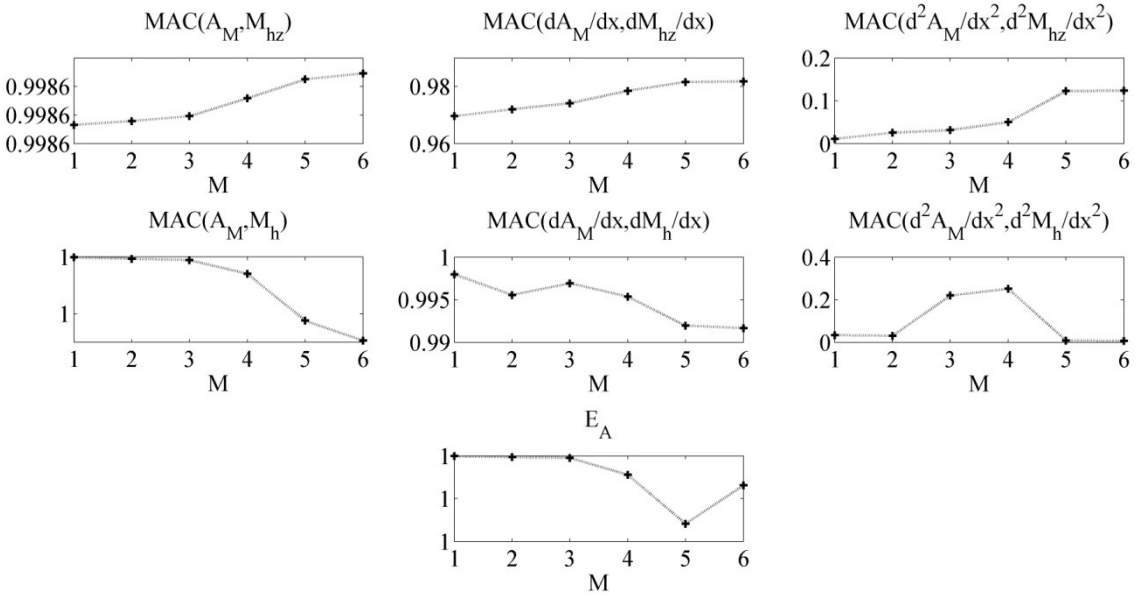


c) M=8

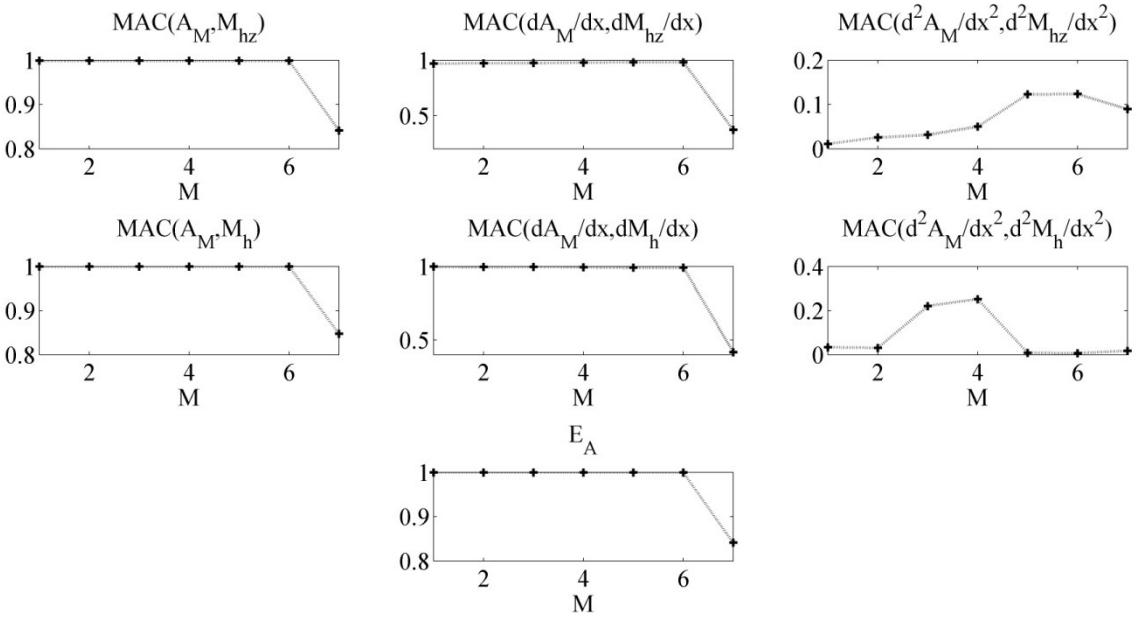
Şekil 3.30 I_{II} indisinin uygun ayrışım düzeyi etrafındaki değişimi.

Son olarak, deneysel titreşim modları ile hasar teşhisi üzerinde durulmuştur. Özellikleri Şekil 3.7'de, hasar durumu Şekil 3.15 ve Çizelge 3.9'da verilen kirişin

hasarlı ve sağlıklı haldeki deneysel titreşim modları Şekil 3.17'de gösterilmiştir. Çentik konumları keyfi seçilmiş olup, sadece I ve VIII kasten sınıra yakın konumlandırılmıştır. III ve IV birbirine çok yakın olup aralarında bir tane ölçüm noktası vardır. Aynı durum V ve VI için de geçerlidir. Bu kadar yakın mesafeli oldukları için hasar indislerine ait grafiklerde bunlarla ilgili süreksizlik konilerinin ortak olması (III ve IV için bir tane, V ve VI için de ayrı bir koni) beklenir. Her biri 73 elemanlı titreşim modları N_M=1000 olacak şekilde kübik spline interpolasyonu ile yoğunlaştırılıp s=40 ölçeğinde sym6 dalgacığı ile genişletilmiştir. ADD'de yine sym14 dalgacığı kullanılmıştır. Bu halde birinci titreşim modu için korelasyon indislerinin değişimi Şekil 3.31'deki gibidir. 6. düzeye kadar indisler, genel olarak, öngörülen şekilde değişmekte, 7. düzeyde ani düşüş meydana gelmektedir. Fakat parazit sebebiyle, eğrilikle ilgili korelasyonların beklenilenden farklı değiştiği görülmektedir. I_{II} indisinin 6 ve 7. düzeylerdeki görünümü ile diğer indislerin grafiği Şekil 3.32'de verilmiştir. Parazitin bu halde fazla olduğu I_I indisindeki anormallikten anlaşılmaktadır. Şimdiye kadarki uygulamalarda hasara en duyarlı olan I_I indisi bu halde hasar etkisini gösterememektedir. I_{III} ise şimdi daha iyi olup III-IV ve V-VI çentiklerine ait tekilliği açığa çıkarabilmiştir. VII civarında da belirgin bir tekillik konisi mevcuttur. I_{II} ise I_I kadar kötü olmayıp I_{III}'e benzer bir değişim göstermektedir. I_{III}'deki tekillik benzeri değişimler I_{II}'de daha belirgindir. Fakat parazit kaynaklı değişimleri de güçlendirdiği görülmektedir. Buradan, I_{II}'nin aşırı parazitten etkilendiği anlaşılmaktadır. 2. ve 3. titreşim modlarında parazit etkisi daha fazla olduğundan hasar teşhisi için elverişli değildirler; bunlara ait indis grafikleri verilmemiştir.

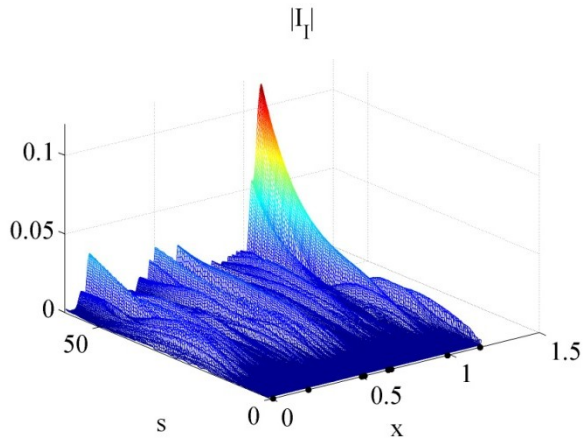


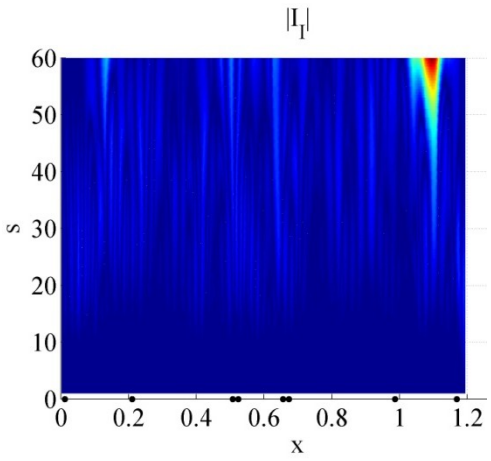
a) M=1-6

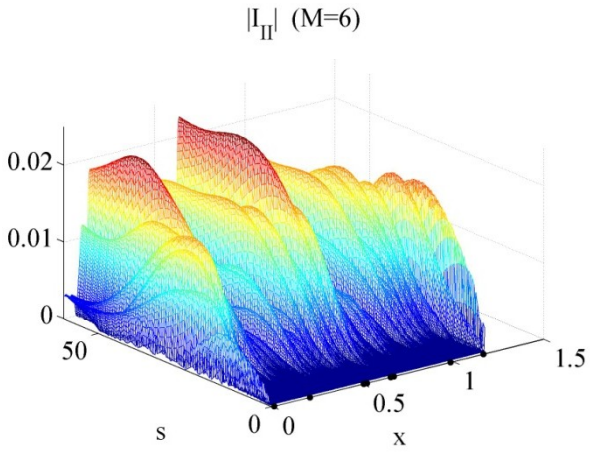


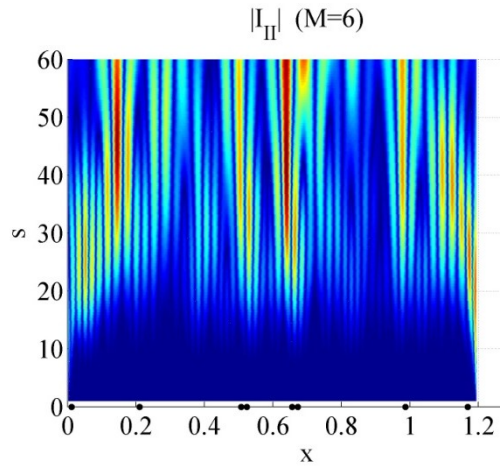
b) M=1-7

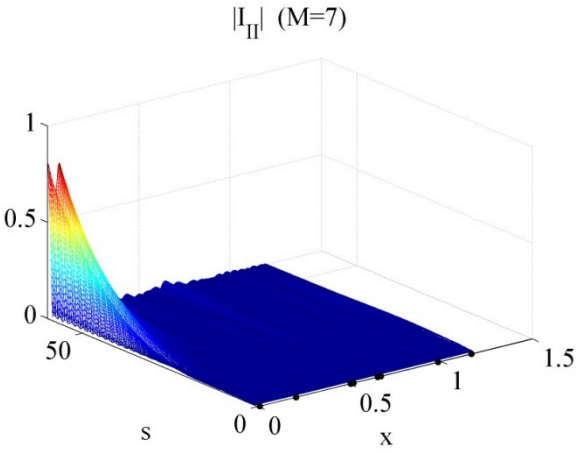
Şekil 3.31 Deneysel 1.titreşim modu için korelasyon indislerinin ADD ayrışım düzeyi ile değişimi

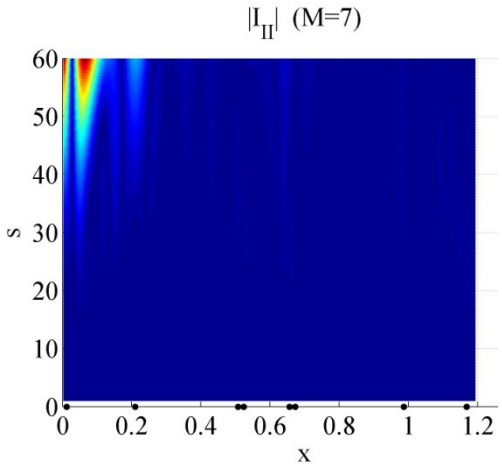

|I_I|
0.1
0.05
0
50
s
0
0
0.5
1
1.5
x

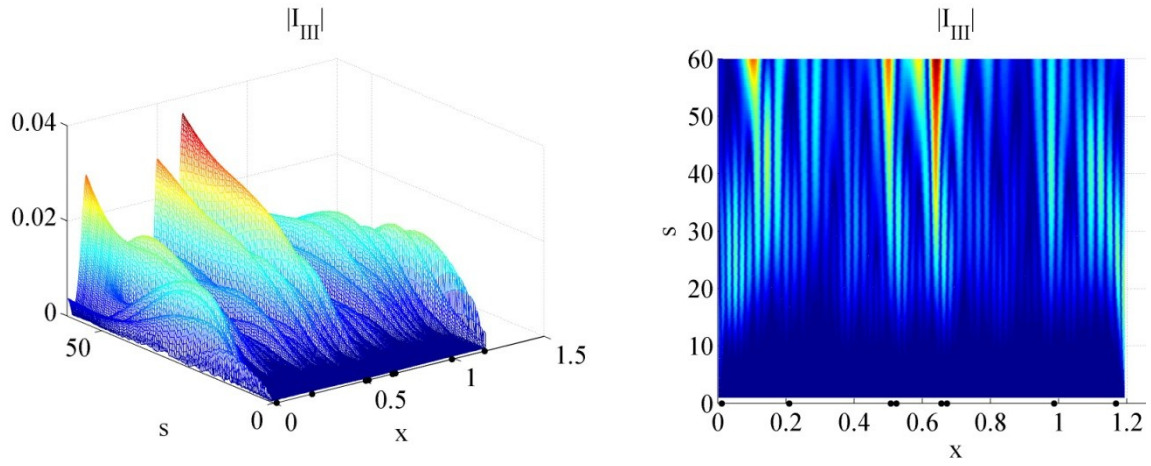

|I_I|
60
50
40
30
20
10
0
s
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
1.2
x


|I_II| (M=6)
0.02
0.01
0
50
s
0
0
0.5
1
1.5
x


|I_II| (M=6)
60
50
40
30
20
10
0
s
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
1.2
x


|I_II| (M=7)
1
0.5
0
50
s
0
0
0.5
1
1.5
x

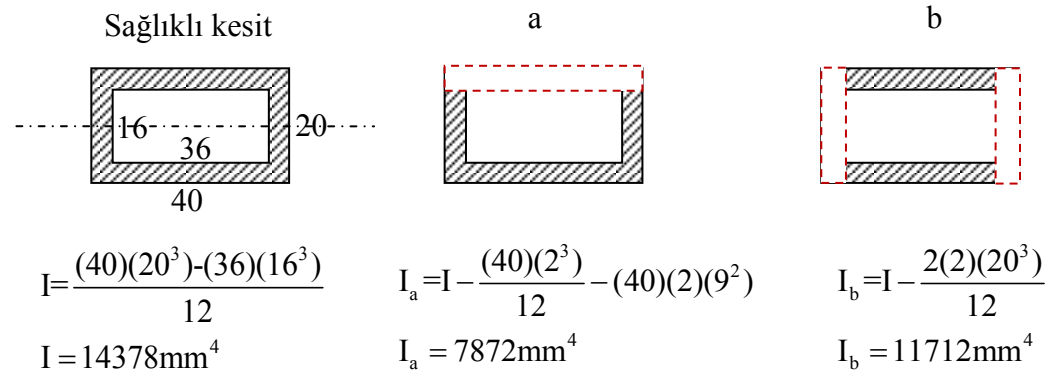

|I_II| (M=7)
60
50
40
30
20
10
0
s
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
1.2
x



Şekil 3.32. Deneysel 1. titreşim modu ile hesaplanan hasar indisleri

I ve VIII nolu çentikler sınıra yakın konumlardadır. Serbest mesnet halinde sınıra yakın noktalarda eğrilik daha az olduğundan I ve VIII'e ait değişimlerin yukarıdaki indis grafiklerinde belirgin olmaması izah edilebilir bir durumdur. Hasar derecesi çentikli ve çentiksiz kesitlerin atalet momentleri oranı olarak ifade edilirse, Çizelge 3.9'da "a" ve "b" ile gösterilen çentikler için Şekil 3.33'deki gibi hesaplanan atalet momentleri kullanılarak $I_a/I=0.55$ ve $I_b/I=0.81$ bulunur. II ve VII nolu çentiklerin aynı konumda farklı derecede hasarı temsil ettiği belirtilmişti. Buna göre II nolu noktadaki hasar derecesi VII'dekinden daha fazladır. Buna rağmen, indis grafiklerinde VII'nin etkisi daha belirgindir. Bunun parazitten başka bir sebebi II'nin ivmeölçerin bağlı olduğu noktaya yakın olması olabilir. II nolu çentik 13 ve 14. ölçüm noktaları arasında, askılama 15 ve 16. noktalar arasında, ivmeölçer de 19 nolu noktadadır. B&K 4514 ivmeölçerin altlığı 25mm çapında ve 5mm kalınlığında (bkz. Çizelge 2.3) olup, yüzeyle bağlantının iyi sağlanması için güçlü bir mıknatıs kuvvetine sahiptir. Bu durum, yakınındaki noktaların serbestliğini kısıtlayıcı bir etki yapabilir. II çentiğinin bulunduğu noktadaki mukavemet kaybı VII'ye kıyasla fazla olmasına rağmen VII'ye ait değişimin indis grafiklerinde daha belirgin olmasının bir sebebi bu olabilir. Sonuç olarak, III – VII arasındaki çentiklerin iyi bir şekilde algılanabildiği anlaşılmaktadır. Öte yandan, deneyde dikkate alınan hasar derecesinin benzer test ekipmanı kullanılan çalışmadakilere kıyasla, genel olarak, daha az olduğu doğrulanabilir. Örneğin, buradaki gibi çekiç-darbe testinin kullanıldığı bir çalışmada (Rucka ve Wilde 2006b) hasarlı ve sağlıklı kesitlerin atalet momentleri oranı 0.27'dir. Buna rağmen, ilgili çalışmadaki

SDD grafiklerinde parazit etkisi belirgindir (Şekil 3.34). Benzer çalışmalarda (Hong ve ark 2002, Messina 2008) oran=0.125'dir. Yani hasar derecesi ciddi boyuttadır. Douka ve ark. (2003)'ın çalışmasında oran nispeten yüksek olup 0.51'dir. Fakat söz konusu çalışmada çentik konumu ankastre uca yakındır; yani eğriliğin yüksek olduğu bir noktadadır. Dolayısıyla hasar kaynaklı katsayıların genliği hasar etkisinin sağlıklı bir şekilde algılanmasını sağlayacak derecede yüksektir. Görüldüğü gibi, benzer test ekipmanı kullanılmasına rağmen, bu çalışmadaki hasar derecesi diğerlerinden azdır. Buna rağmen, çentiklerin çoğu tek bir titreşim modu ile belirlenebilmiştir. Her titreşim modunun aynı hasara duyarlılığı eşit olmaz. Bu sebeple, sağlıklı bir değerlendirme için uygulamada çok sayıda titreşim modu kullanılması tavsiye edilmektedir (Trentadue ve ark. 2007).



Şekil 3.33 Hasarlı kesitlerde atalet momentleri

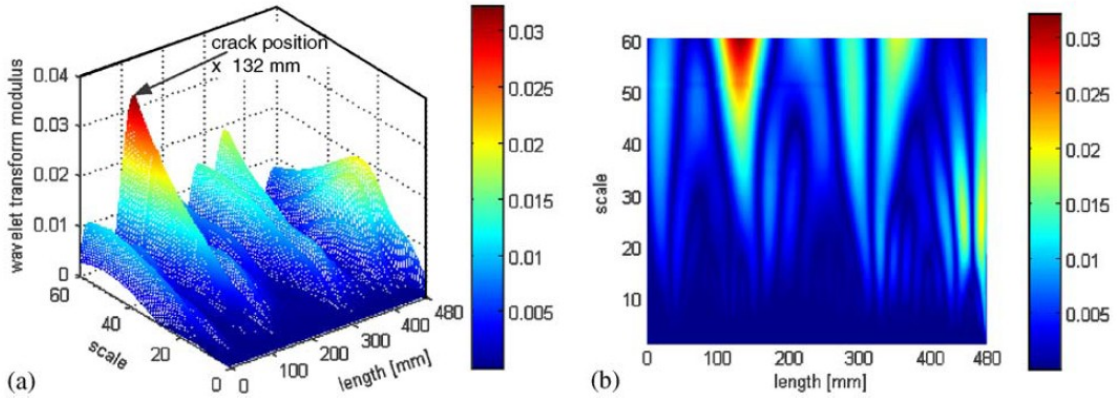


Fig. 11. Wavelet transform modulus of experimental first mode shape; (a) 3D view; (b) top view.

Şekil 3.34 Referans çalışmadaki SDD grafikleri. **Kaynak**: Rucka ve Wilde (2006b)

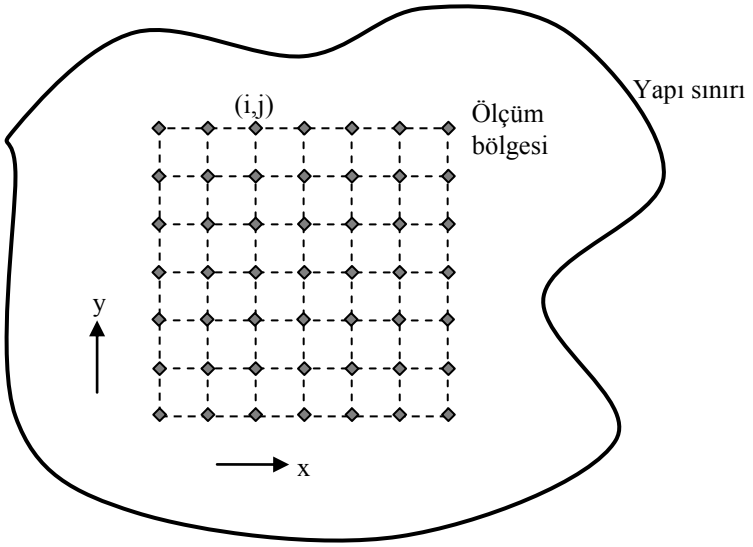
Bu başlık altındaki çalışmalardan çıkan sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- I_{II} indisi ile HT için ADD'de kullanılacak dalgacığın N_{VM} sayısı [10,20] aralığında seçilebilir. Yukarıdaki uygulamalarda, farklı türde veriler için sym14 dalgacığının yeterli olduğu görülmüştür. En genel halde aralıktaki diğer dalgacıklar denenip performans farkı olmadığı gözlemlenirse bunlardan biri, aksi halde sınırlardaki bozulmayı en az yapan seçilebilir.
- Uygun ayrışım düzeyi genellikle indislerde en fazla düşüşün olduğu düzeyden bir öncesidir. Pratikte M_{hz} verisi mevcut olmayabilir. Bu durumda A_M ve M_h arasındaki korelasyonlarla E_A'nın ilk birkaç düzeyde değişimi gözlenebilir. Ek olarak, bu düzeylerdeki I_{II}'nin gelişimine de bakılabilir. Düzey arttıkça I_{II}'de tekillik etkisi artmaktadır. En yüksek düşüşün görüldüğü düzeydeki I_{II} tekillikleri açığa çıkarmada yetersizdir. Bu durum uygun düzeyin bir önceki olduğuna karar vermede yardımcı olabilir.
- Yüksek indisli titreşim modları daha salınımlı olduğundan mod şeklini belirleyen temel bileşenlerin frekansı küçük indisli modlara göre fazladır. Bu durumda, uygun ayrışım düzeyi yüksek indisli modda daha küçüktür.
- Hasar derecesi küçük ve parazit miktarı az olduğunda I_{II}'nin tekilliklere duyarlılığı I_{III}'den yüksektir. Aşırı parazit halinde I_{II} I_{III}'e benzer sonuç vermekte, fakat parazit kaynaklı tekillik etkileri I_{II}'de daha belirgin olmaktadır.

3.2.2. İki boyutlu yapıda HT

Bir yüzey üzerindeki noktalardan titreşim modları ölçüldüğünde herhangi bir doğrultudaki modal şekil değiştirmeler bir matrisle temsil edilebilir. Örneğin Şekil 3.35'de yapının bir bölgesinde belli aralıklarla konumlandırılmış ölçüm noktalarından z doğrultusunda darbe ve ivme ölçülerek bu doğrultudaki yer değiştirmelerle ilgili modal matrisler elde edilebilir. Böyle bir matrisin (i,j) elemanı i. satır ve j. sütundaki ölçüm noktasının modal genliğini (işaretiyle beraber) içerir. Bunun her satır ve sütunu için yukarıdaki I_I, I_{II} ve I_{III} indisleri bir s ölçeğinde hesaplanırsa, bu ölçek için bir SDD

katsayıları matrisi elde edilir. Bu matrisin yüzey grafiğine bakıldığında, hasar yerlerinde belirgin sivrilikler oluştuğu görülür. Mod matrisinin satır ya da sütununun kullanımına göre indisler de farklı olur. Buna göre, iki boyutlu yapıda HT için kullanılacak indisler Çizelge 3.11'deki gibidir. Çizelgedeki indislerden birini hesaplamak için nxm boyutunda bir matris kullanılmışsa, indisin boyutu da nxm olur.



Şekil 3.35. İki boyutlu bir yapıda ölçüm bölgesi.

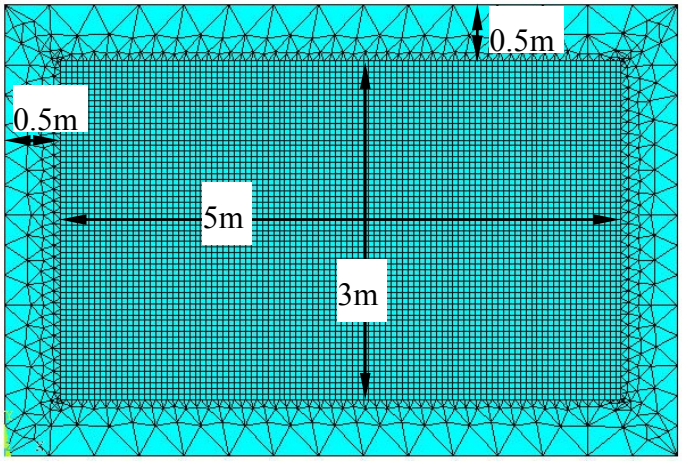
Çizelge 3.11 İki boyutlu yapıda HT için kullanılan indisler.

İndis	**Açıklama**
I_I^y	Bu indisin bir i. satırı mod matrisinin i. satırı için s ölçeğinde (2.21) eşitliğindeki I_I verisini içerir.
I_I^d	I_I^y gibi hesaplanır. Ancak, bu durumda satır değil sütun verileri kullanılır.
I_{II}^y	Bu indisin bir i. satırı mod matrisinin i. satırı için s ölçeğinde (2.21) eşitliğindeki I_{II} verisini içerir.
I_{II}^d	I_{II}^y gibi hesaplanır. Fakat bu kez mod matrisinin satır yerine sütunları kullanılır.
I_{III}^y	Bu indisin bir i. satırı mod matrisinin i. satırı için s ölçeğinde (2.21) eşitliğindeki I_{III} verisini içerir.
I_{III}^d	I_{III}^y gibi hesaplanır. Tek fark satır yerine sütunların kullanılmasıdır.

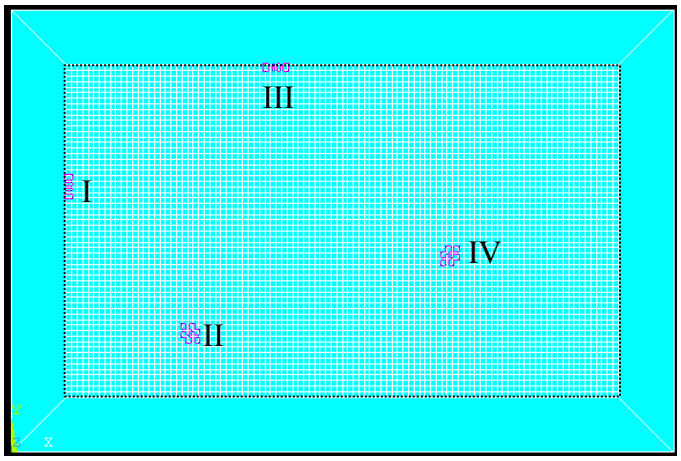
Çizelge 3.11'deki indislerden I_I ve I_{III}'le ilgili olanların hesabı tek boyutlu veri için yapılanların tüm satır veya sütunlar için tekrarlanmasıdır. I_{II} ile ilgili olanlar için de aynı şey geçerlidir. Fakat burada, örneğin I_{II}^y hesaplanırken, "Her satır için uygun yaklaşım

fonksiyonu bulmak üzere aynı ADD ayrışım düzeyi mi kullanılmalıdır?" şeklinde bir soru gündeme gelebilir. Benzer durum sütun verileri için de geçerlidir. Evet, her satır ya da sütundaki yaklaşım fonksyionu için aynı düzey dikkate alınır. Bu durumu izah etmek üzere kenar uzunlukları a ve b, kenarları basit mesnetli, malzeme ve geometri bakımından üniform bir dikdörtgen plağın mod şeklini ifade eden $\sin\frac{m\pi x}{a}\sin\frac{n\pi y}{b}$ fonksiyonu ele alınsın (Timoshenko ve ark. 1974). Burada m ve n mod sayısını gösteren pozitif tamsayılardır. Görüldüğü gibi, bir m. modda farklı y değerleri için x ekseni doğrultusundaki değişimler aynı sinüs fonksyionu ile ifade edilmektedir. Dolayısıyla, bu değişimler frekans ortamında aynı spektruma sahiptirler; sadece spektrumdaki frekanslarda genlikleri farklı olur. Bu durumda, her satır verisi için uygun ADD ayrışım düzeyi aynıdır. Bunlardan birisi için uygun bir düzey belirlenip tüm satırlar için aynı düzeyde yaklaşım fonksiyonları hesaplanabilir. Benzer durum sütunlar için de geçerlidir.

İki boyutlu halde Çizelge 3.11'deki indisleri kıyaslamak üzere kenar uzunlukları 6m ve 4m, kalınlığı 50mm olan serbest kenarlı bir plak yapı dikkate alınmıştır (Şekil 3.36a)). Malzeme özellikleri: E=210GPa, ρ=7800kgm^{-3}, ν=0.33 olarak seçilmiştir. Parça üzerinde kenar uzunlukları 5m ve 3m olan bir ölçüm bölgesi belirlenmiştir. Bölgenin plak kenarlarına uzaklığı 0.5m'dir. Bu bölge kenar uzunlukları 50mm olan kare elemanlarla bölünerek koordinat eksenleri doğrultusunda eşit aralıklı ölçüm noktaları oluşturulmuştur. Geri kalan kısım keyfi bir şekilde elemanlara ayrılmıştır. Ölçüm bölgesinde dört farklı yerdeki elemanların kalınlığı azaltılarak hasar etkisi oluşturulmuştur (Şekil 3.36b)). Bunlardan I ve III bölgenin kenarlarında olup buralarda dörder elemanın, II ve IV'de de yedişer elemanın kalınlığı azaltılmıştır. Böylece rastgele konumlarda farklı derecelerde hasar etkileri oluşturulmuştur. Ölçüm bölgesine ait titreşim modları 61x101 boyutunda matrislerdir.



a)

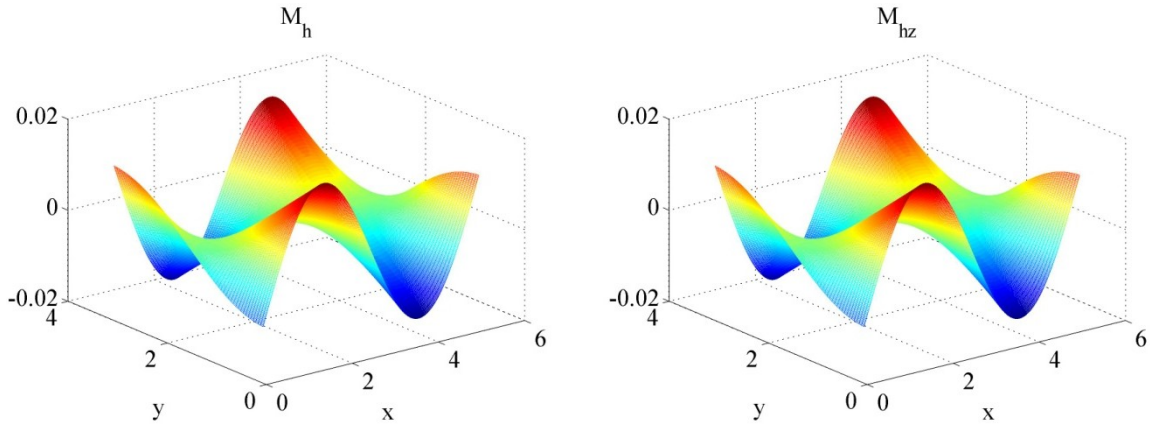


b)

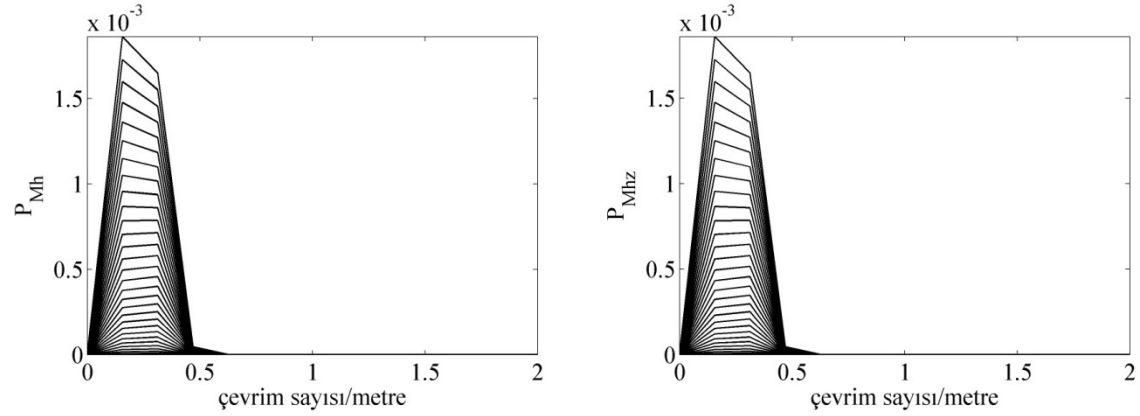
Şekil 3.36. Serbest kenarlı plağın boyutları ve hasar yerleri.

İlk örnek için plağın 7. elastik titreşim modu ele alınmıştır. Bunun sağlıklı ve %10 hasarlı hali[1] Şekil 3.37'de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi hasar etkisi yine titreşim modlarında fark edilebilir bir değişime sebep olmamıştır. Titreşim modunun satır ve sütun verilerine ait frekans spektrumları Şekil 3.38'de gösterilmiştir. Buradan, hasar derecesinin bu kez de spektrumlarda belirgin bir değişime yol açmayacak kadar az olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca, beklenildiği gibi, satır ve sütun verilerinin spektrumları kendi aralarında benzerdir. Ek olarak, yatay doğrultuda daha fazla salınım olduğundan, Şekil 3.38a)'daki grafiklerde daha yüksek frekanslı bileşenlerin enerjisi b)'dekine kıyasla fazladır.

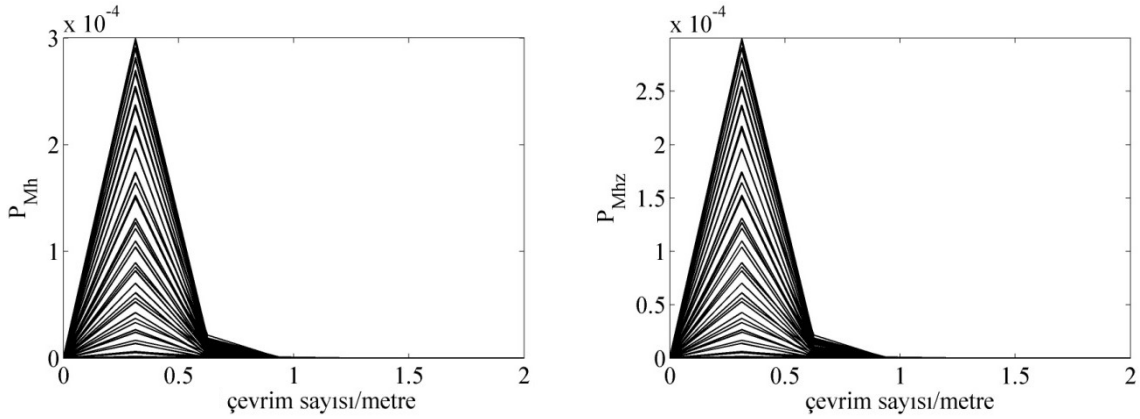
[1] Hasar yerlerindeki elemanların kalınlığı %10 azaltılmıştır.



Şekil 3.37. Sağlıklı ve %10 hasarlı halde plağın 7. titreşim modu.



a) Satırların spektrumları

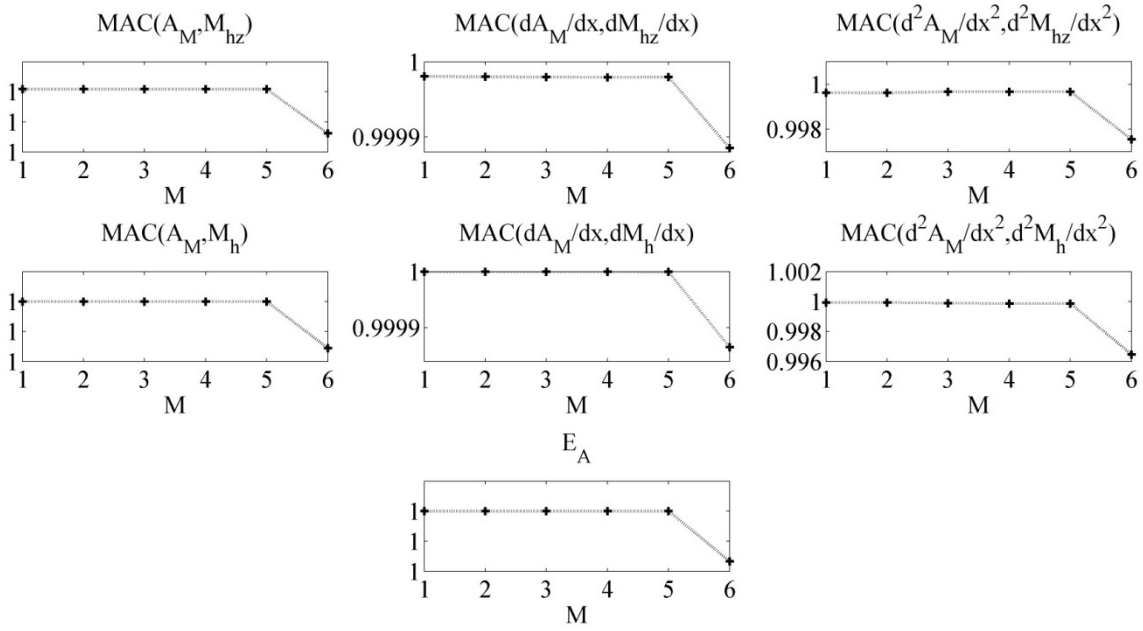


b) sütunların spektrumları

Şekil 3.38. 7. titreşim modunun sağlıklı ve hasarlı halde frekans spektrumları. P=(Y)(Y*)/N. Y: satır ya da sütun verisinin FD'si. N: Y vektöründeki eleman sayısı. Alt "Mh" indisi hasarlı veriyi, "Mhz" indisi de hasarsız veriyi temsil etmektedir.

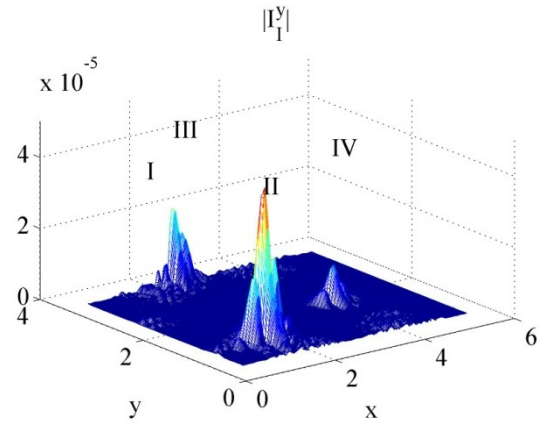
Bu mod şekli için Çizelge 3.11'deki hasar indislerinden "y" üst simgeli olanları hesaplamak üzere mod verisinin satırları yoğunlaştırılarak 500'e çıkarılmıştır. Başlangıçta boyutları 61x101 olan mod matrisinin boyutları şimdi 61x500'dür. Her satır sym6 dalgacığı ile s=30 ölçeğinde polinomla genişletilmiştir. I_{II}^{y} indisi için ADD'de sym14 dalgacığı ve 5. ayrışım düzeyi kullanılmıştır. Bu düzeyin "uygun ayrışım düzeyi" olduğunu göstermek üzere mod matrisinin, örneğin, 35. satırına ait korelasyon indisleri hesaplanmıştır[1]. Bunların ADD ayrışım düzeyi M ile değişimi Şekil 3.39'daki gibidir. Görüldüğü gibi 6. düzeyde indislerde ani düşüş meydana gelmiştir. Şu halde uygun ayrışım düzeyi M=5'tir. Böyle olduğu I_{II}^{y} indisinin M'ye bağlı değişiminde de görülmektedir (Şekil 3.40). Şekildeki grafiklere bakıldığında M=5'deki I_{II}^{y}'nin I_{I}^{y} ve I_{III}^{y} ile daha benzer olduğu görülmektedir. 6. düzeydeki yaklaşım fonksiyonları ait oldukları mod şekliyle benzerliklerini kaybettikleri için bu düzeydeki I_{II}^{y} bambaşka bir görünüme sahiptir. 4. düzeydeki I_{II}^{y} 5. düzeydekine ve diğer indislere (I_{I}^{y} ve I_{III}^{y}) benzemektedir. Fakat dikkat edilirse, hasar yeri dışındaki değişimlerin bu halde biraz daha fazla olduğu görülür. Bunun sebebi henüz hasar kaynaklı bileşenlerin bu düzeydeki yaklaşım fonksiyonundan yeterince ayıklanmamış olmasıdır.

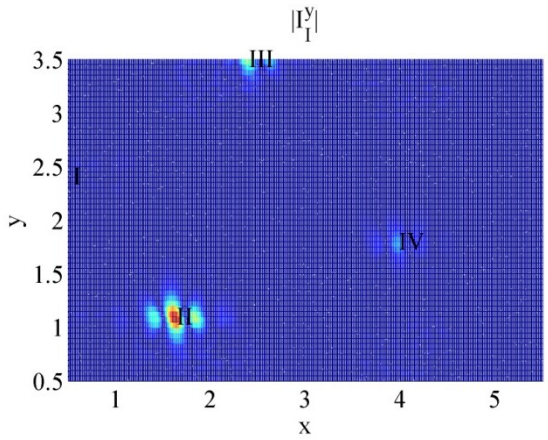
[1] İndislerin değişimi diğer satırlar için de aynı olduğundan bunlara ait grafikler verilmemiştir.

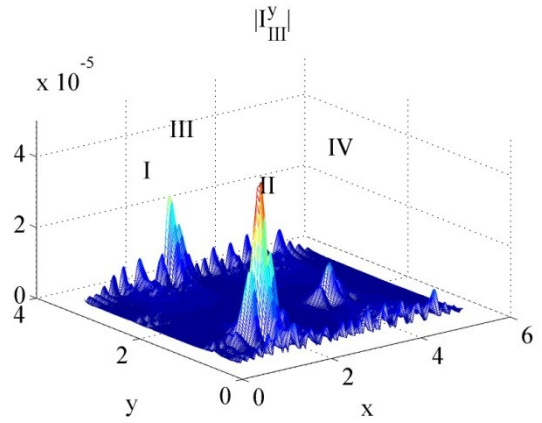


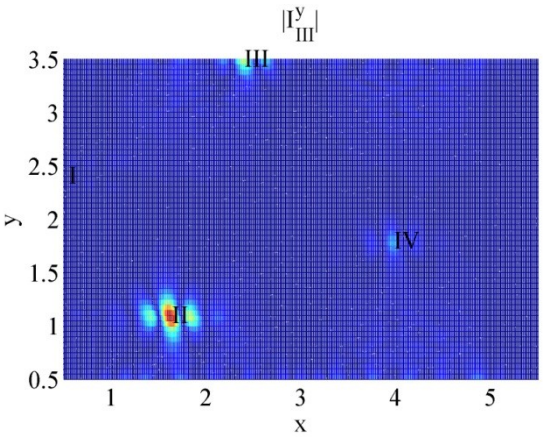
Şekil 3.39 Plağın 7.titreşim modunun 35.satırı için korelasyon indislerinin ADD ayrışım düzeyi ile değişimi.

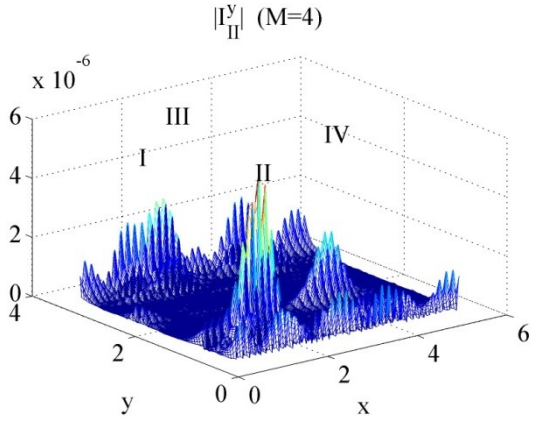
Şekil 3.40'daki indisler için SDD hesabında sym6 dalgacığı kullanılmıştır. Bunun yerine sym4 dalgacığı kullanılsaydı I_{III}^{y} 'nin bu halde süreksizliklere duyarlılığı daha az olurdu (Şekil 3.41). Bunun sebebi, sym4 dalgacığının yeterli sayıda sıfıra eşit momentinin olmayışıdır. Bu dalgacık titreşim modundaki yüksek dereceden polinom türü bileşenleri bastıramadığından, hasar kaynaklı süreksizlikler Şekil 3.40'daki gibi belirgin değildir. Fakat I_{I}^{y} sağlıklı ve hasarlı haldeki verilerin SDD katsayıları farkına dayandığından polinom türü değişimler çıkarma sırasında birbirini götürmüştür. Benzer durum bu çalışmada önerilen I_{II}^{y} indisi için de söz konusudur. Önerilen yöntemle bulunan yaklaşım fonksiyonu hasarsız haldeki mod şekline benzediğinden çıkarma sırasında bu değişimler birbirini elemiştir. Dolayısıyla, Şekil 3.41'de görüldüğü gibi, I_{II}^{y} indisi bu halde de hasar etkilerini yeterli bir şekilde açığa çıkarabilmektedir. Yüksek mertebeli modlar yüksek dereceli polinomlarla uyumlu olduğundan I_{III} ile HT için N_{VM}'si yüksek dalgacık kullanmak gerekmektedir. Daha önce de ifade edildiği gibi, bu halde dalgacığın konum eksenindeki lokalizasyonu azalır ve verideki parazitleri güçlendirir. *Fakat önerilen* I_{II} *indisi ve bundan türetilen* I_{II}^{y} *ve* I_{II}^{d} *ile yüksek* N_{VM}*'li dalgacık kullanmaya gerek kalmadan hasar etkileri tespit edilebilmektedir*.

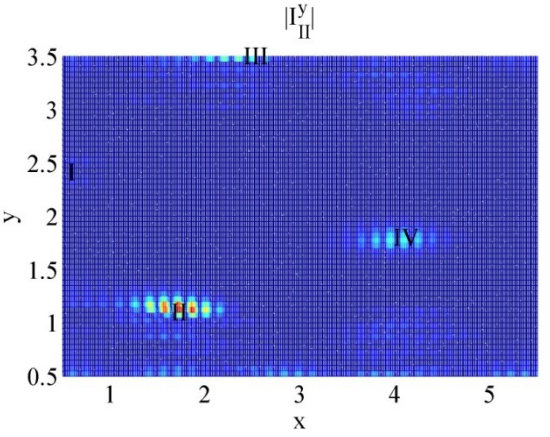

$|I^y_I|$
x 10^-5
III
IV
I
II
y
x

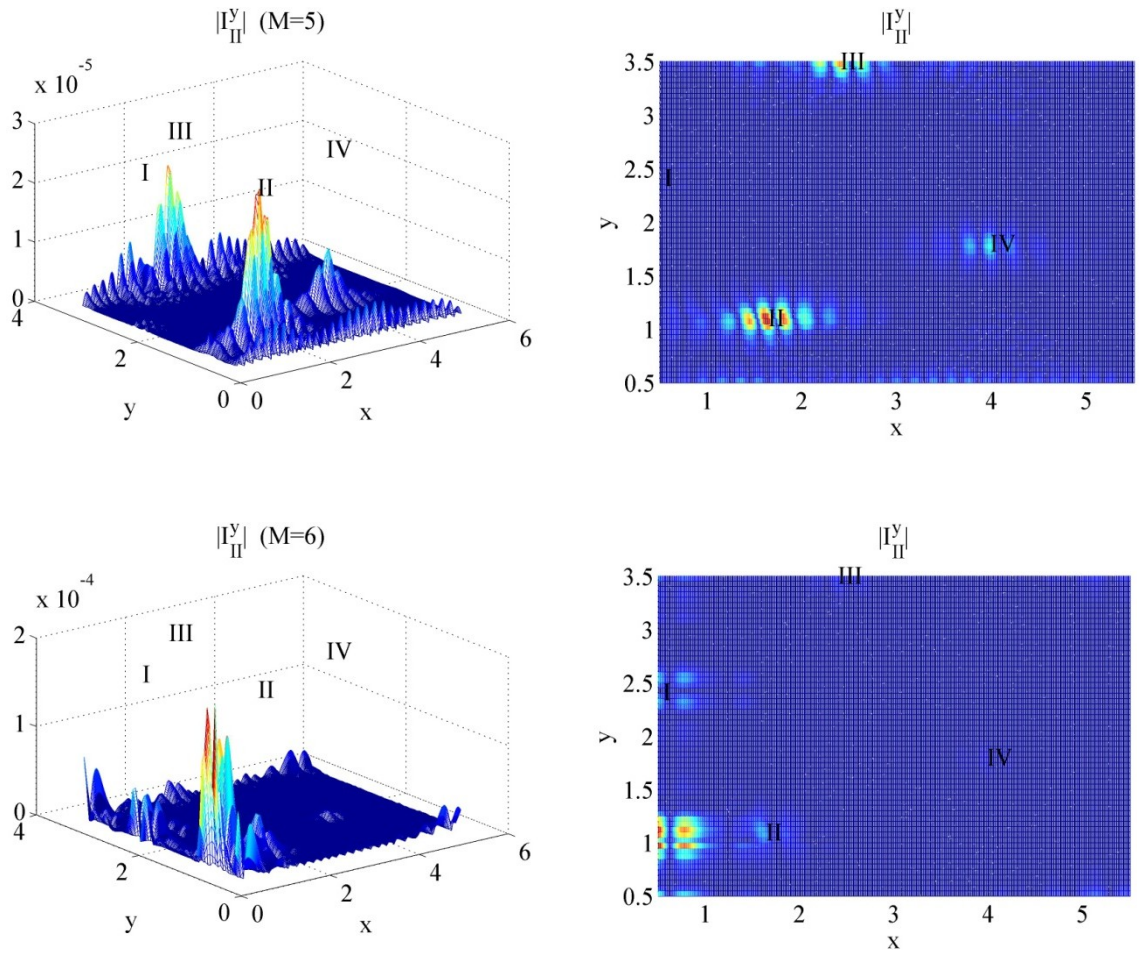

$|I^y_I|$
III
I
IV
II
y
x


$|I^y_{III}|$
x 10^-5
III
IV
I
II
y
x

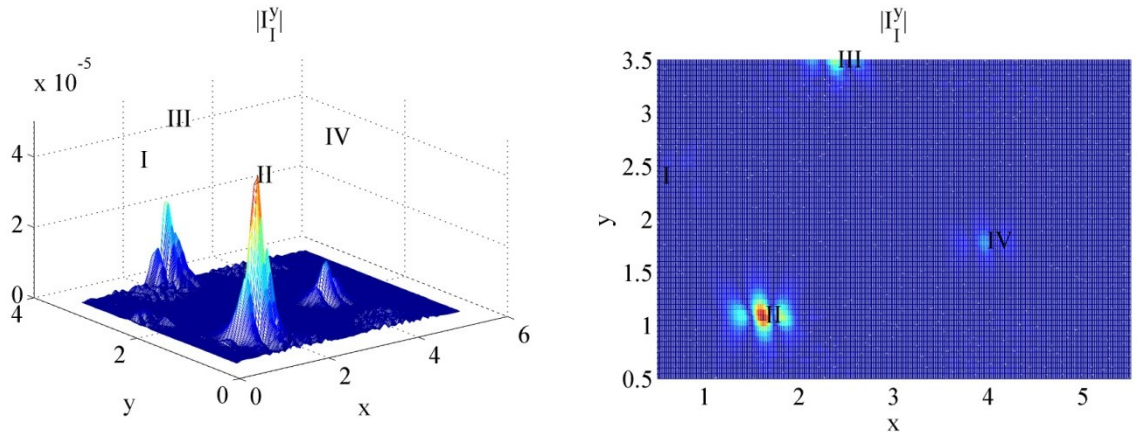

$|I^y_{III}|$
III
I
IV
II
y
x

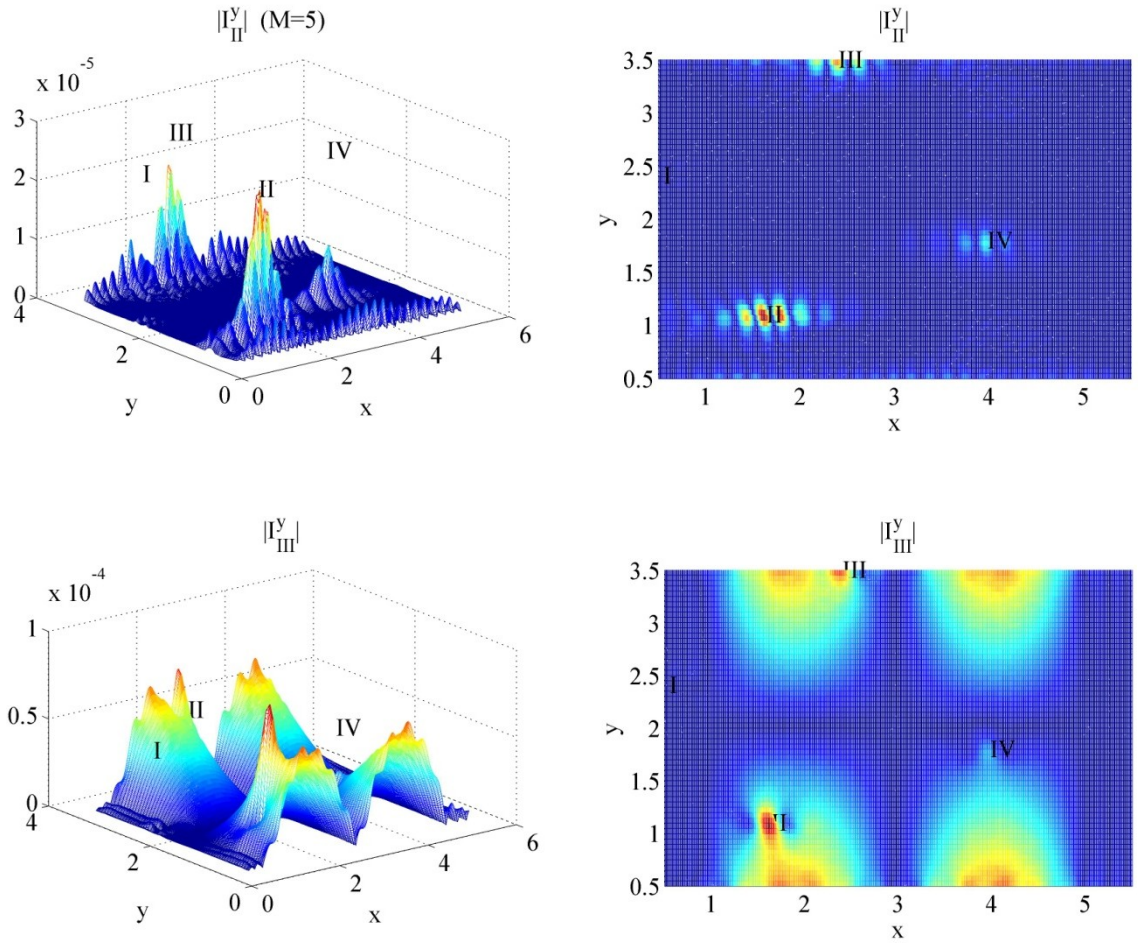

$|I^y_{II}|$ (M=4)
x 10^-6
III
IV
I
II
y
x


$|I^y_{II}|$
III
I
IV
II
y
x



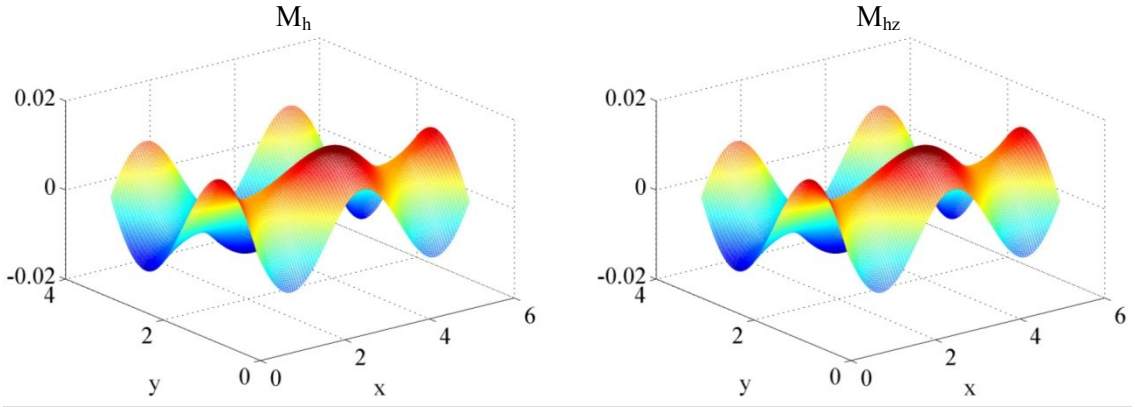
Şekil 3.40 Plağın 7. titreşim modunun satır verilerine ait hasar indisleri. s=30, SDD dalgacığı sym6, ADD dalgacığı sym14.



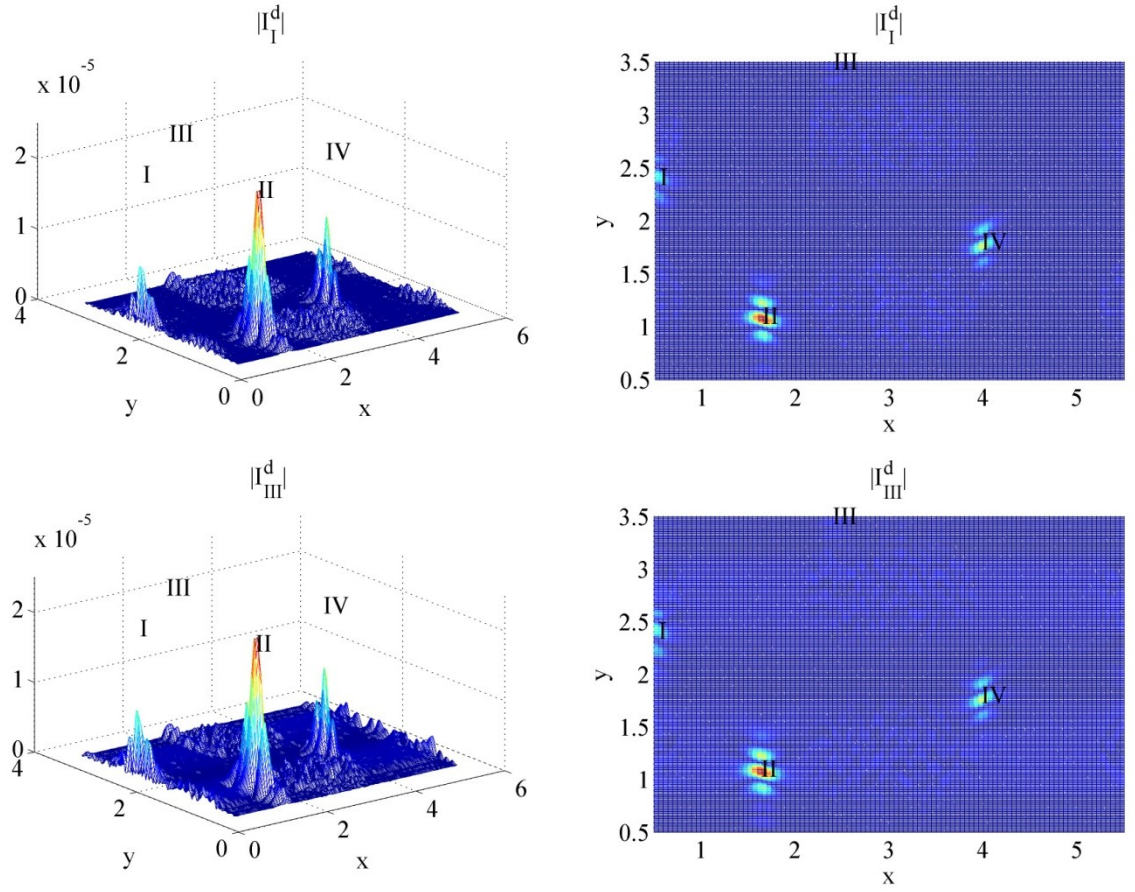


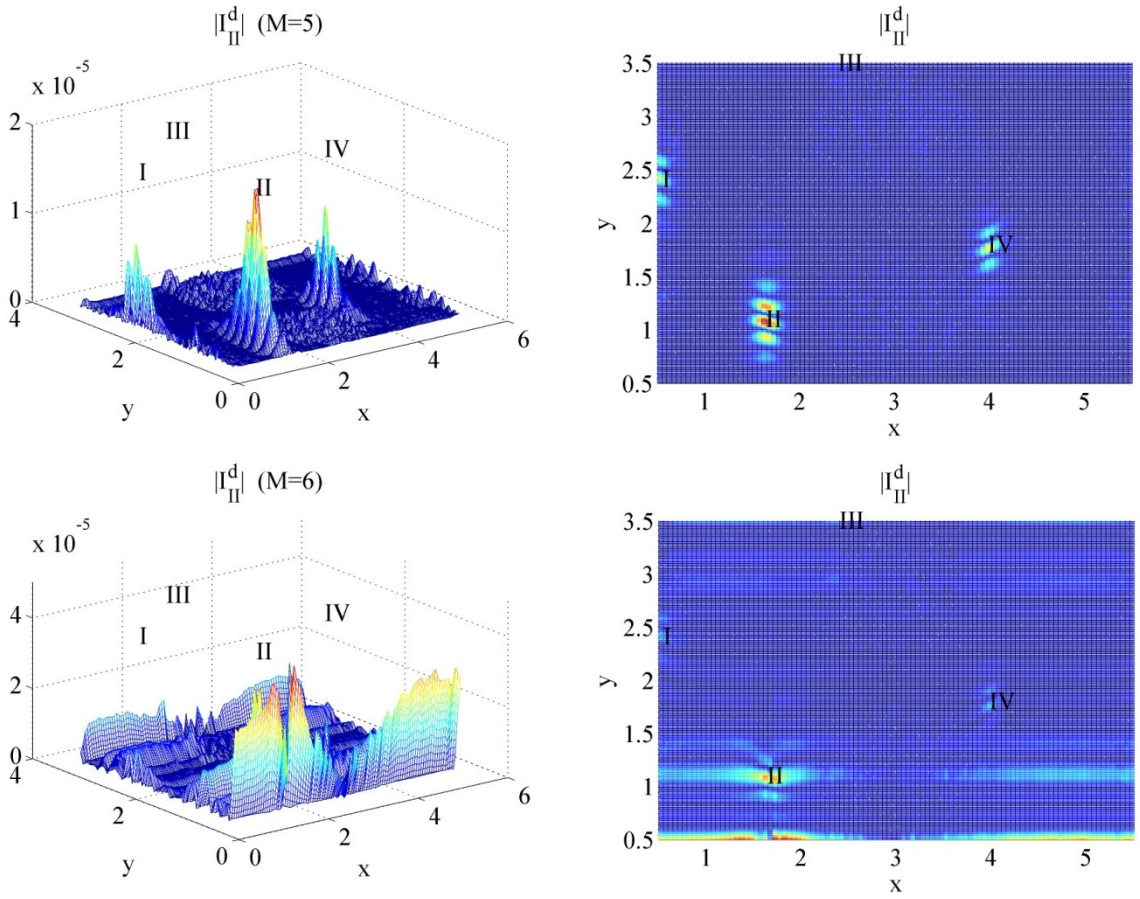
Şekil 3.41 SDD hesabında sym4 kullanılması halinde indislerin grafikleri.

İndislerin karşılaştırılması ile ilgili bir uygulama daha yapılmıştır. Bu kez plağın 10. titreşim modu (Şekil 3.42) kullanılmış ve %5 hasar derecesi dikkate alınmıştır. Çizelge 3.11'deki indislerden "d" üst simgeli olanları hesaplamak üzere mod verisinin sütunları analizden önce kübik spline interpolasyonu ile 5 katına çıkarılmıştır. Bu durumda, başlangıçta 61x101 boyutundaki mod matrisi 305x101 olmuştur. Veri uzunluğu önceki uygulamaya göre biraz daha az olduğundan, genişletme ve indis grafiklerini elde etmede s=20 ölçeği dikkate alınmıştır. Bu halde indis grafikleri Şekil 3.43'deki gibidir. Şekilden I^d_{II} için uygun düzeyin M=5 olduğu görülmektedir. Çünkü M=6'da indisin görüntüsü diğerlerinden çok farklıdır ve M=5'te I ile IV'e ait genlikler belirgin iken bu halde çok azalmıştır. Öte yandan, bir önceki mod şekline ait sonuçlarda I hasarına ait etki yok iken şimdi bu üç indiste de belirgindir. Bunun tersi bir durum III hasarı için söz konusudur. Bu durum verilerin hasar yeri ve derecesine farklı derecede duyarlı olmaları ile ilgilidir.



Şekil 3.42 Plağın hasarlı ve hasarsız halde 10. titreşim modu.



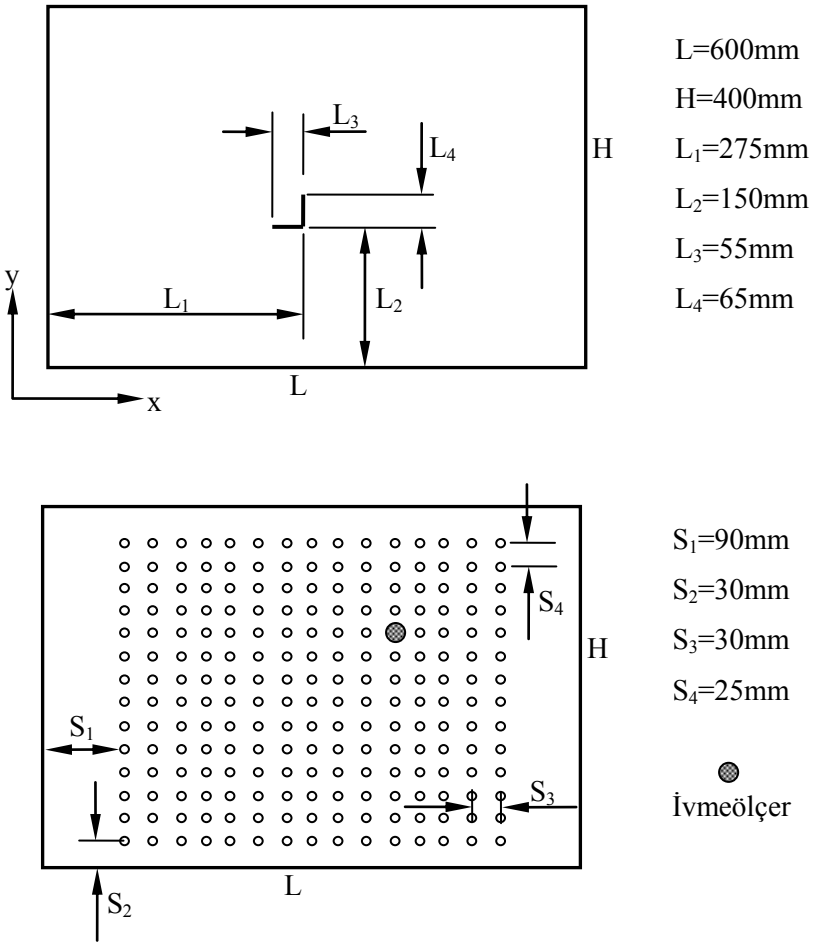


Şekil 3.43 10. titreşim modunun sütunları ile hesaplanan hasar indisleri. Ölçek s=20, SDD dalgacığı sym6, ADD dalgacığı sym14.

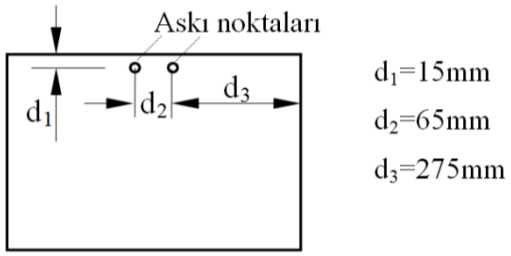
3.2.2.1. Düzlem plak deneyi

Çizelge 3.11'deki indisleri deneysel veri ile test etmek üzere kenar uzunlukları L ve H olan 2mm kalınlığındaki dörtgen plak kullanılmıştır (Şekil 3.44). Rulo sacdan kestirilen bu parçanın malzemesi St37 çeliği olup özellikleri E=200GPa, ρ=8567kgm^{-3} (kütle ve hacim hesaplanarak ölçülmüştür) ν=0.32 şeklindedir. Kenarlardan L_1 ve L_2 uzaklığında, boyları L_3 ve L_4 olan birbirine dik iki yarık bulunmaktadır. Yarıklar tel erozyon tezgâhında 0.5mm genişlikte açılmıştır. Parça üzerinde, kenarlardan S_1 ve S_2 kadar içeride bir ölçüm alanı belirlenmiştir. Bu alanda yatay doğrultuda örnekleme mesafesi S_3 olan 15 nokta, düşey doğrultuda da S_4 olan 14 nokta ile toplam 14x15=210 ölçüm noktası belirlenmiştir. İvmeölçer (B&K4394) şekildeki 146 nolu noktaya bağlanmıştır. Bu nokta ilk birkaç titreşim modunun düğüm çizgilerinden yeterince

uzaktadır. Plak üst kenarından çapı 8mm olan iki delik açılmış, askılama bu noktalardan yapılmıştır (Şekil 3.45).



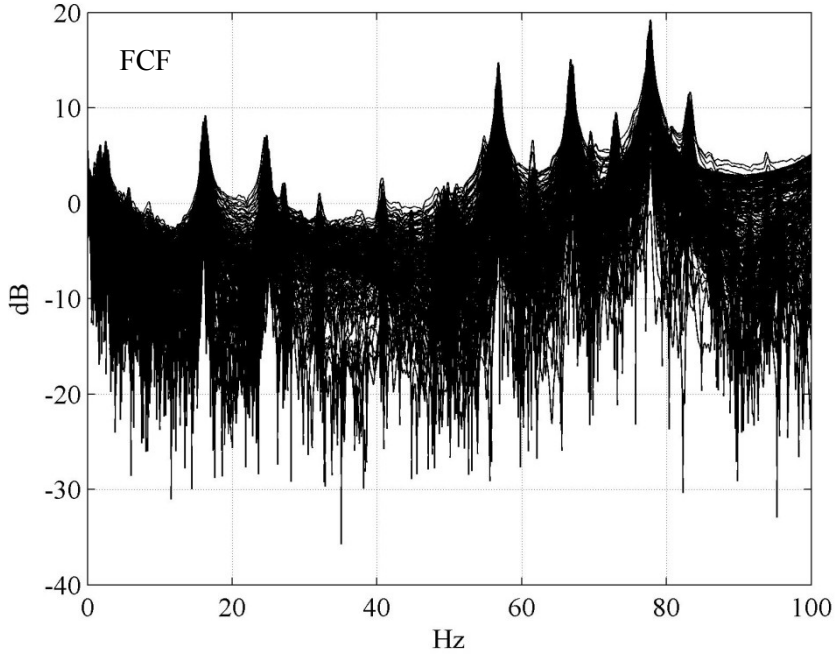
Şekil 3.44 Deneyde kullanılan plağın özellikleri.

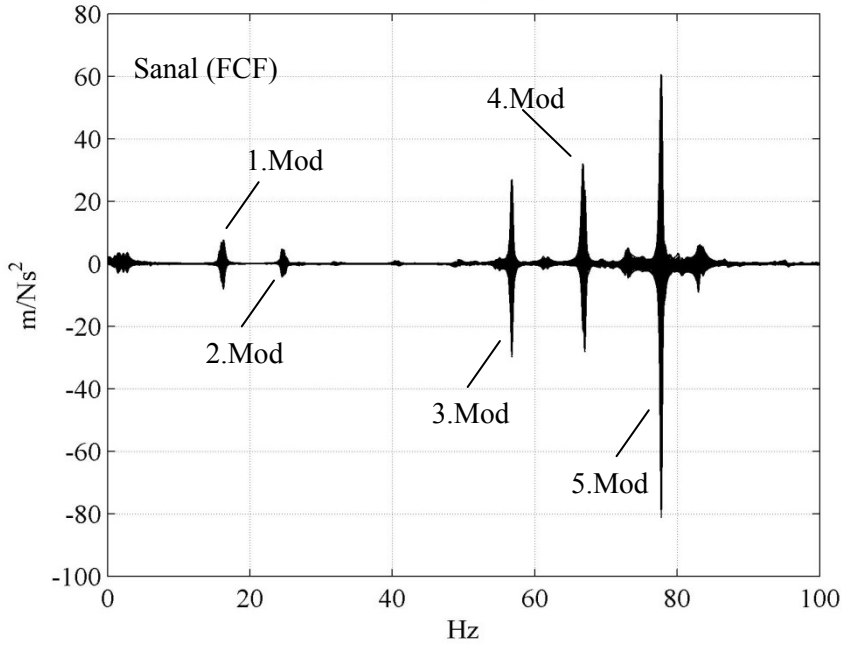


Şekil 3.45 Plak askı noktaları.

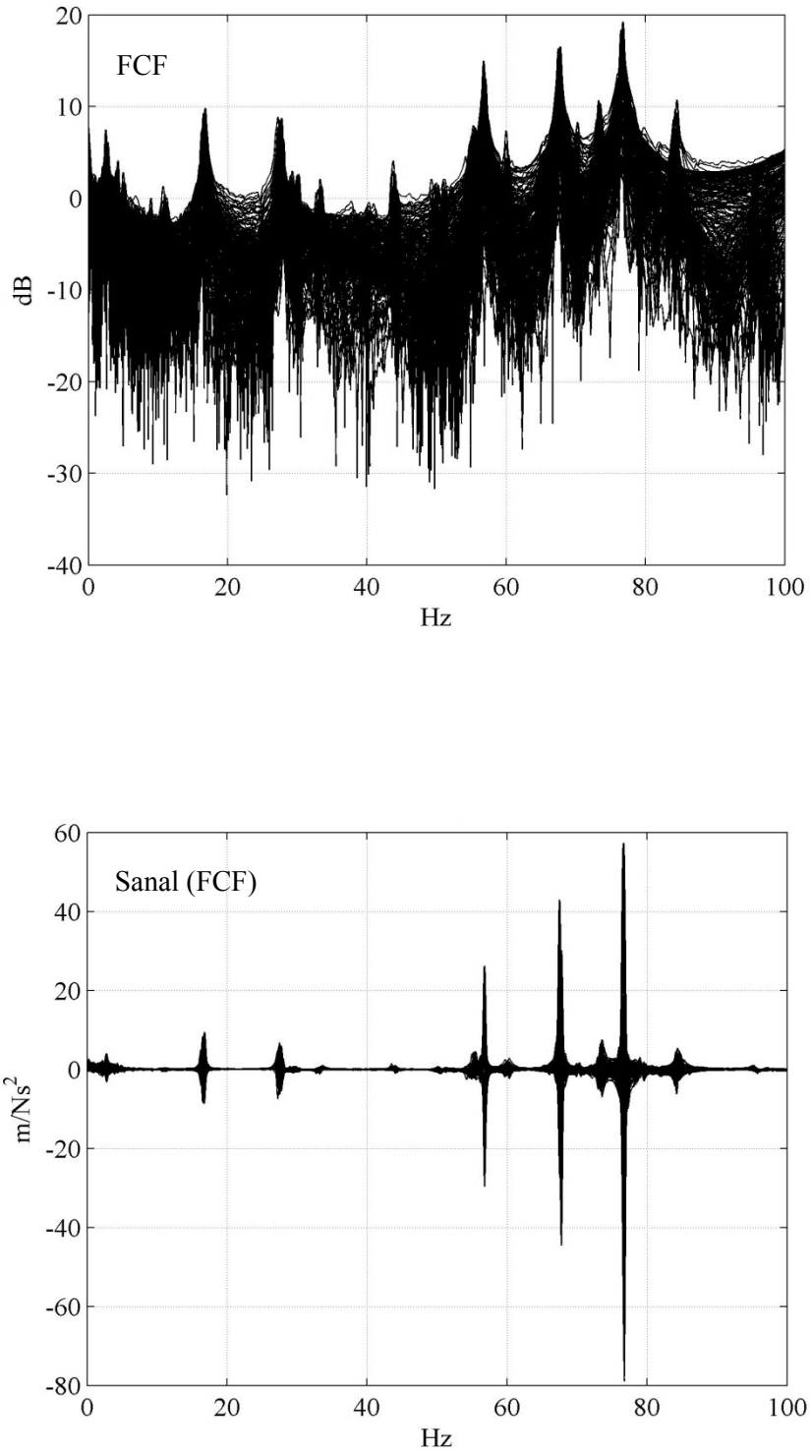
Modal çekice kauçuk uç takılmış, 0-100 Hz arası 0.25 Hz çözünürlükte ölçülecek şekilde ayarlanmıştır. Bu durumda, bir FCF ölçmek için gerekli süre 4saniye, kuvvet ve

ivme sinyallerine uygulanan eksponensiyel pencere sabiti de 1.02 saniyedir. Paraziti azaltmak üzere bir noktadan 4 FCF ölçülerek ortalaması alınmıştır. Sağlıklı halde (yarıklar açılmadan önce) ölçülen 210 adet FCF verisi ve bunların sanal kısımları Şekil 3.46'da gösterilmiştir. Şekilden 0-100Hz arasında 5 tane elastik titreşim modu olduğu görülmektedir. Hasarlı plak için de aynı şartlarda deney yapılarak Şekil 3.47'deki FCF eğrileri bulunmuştur. Bu FCF'lerden elde edilen titreşim modları ve hasarsız halde ANSYS ile bulunan sayısal modlar Şekil 3.48'de karşılaştırılmıştır. Şeklin altında mod şekilleri arasındaki yakınlığı ifade eden MAC matrisleri de verilmiştir.



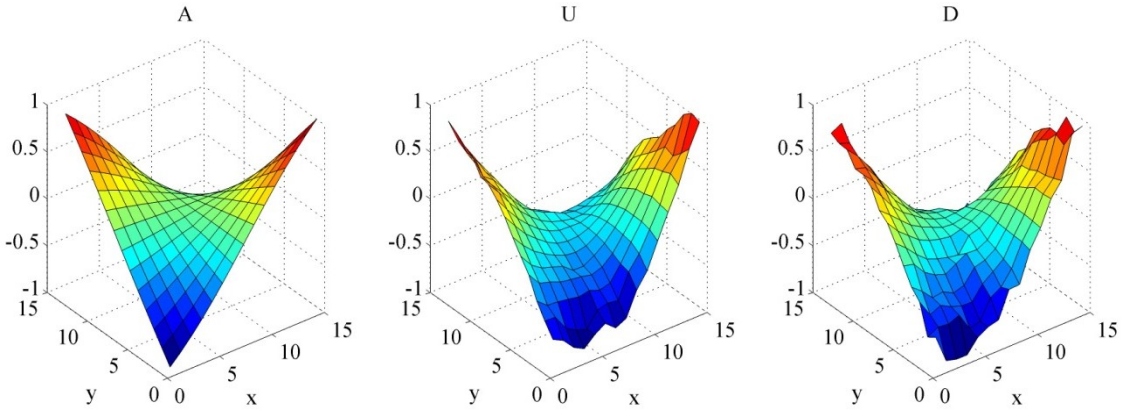


Şekil 3.46 Hasarsız plağın FCF eğrileri.

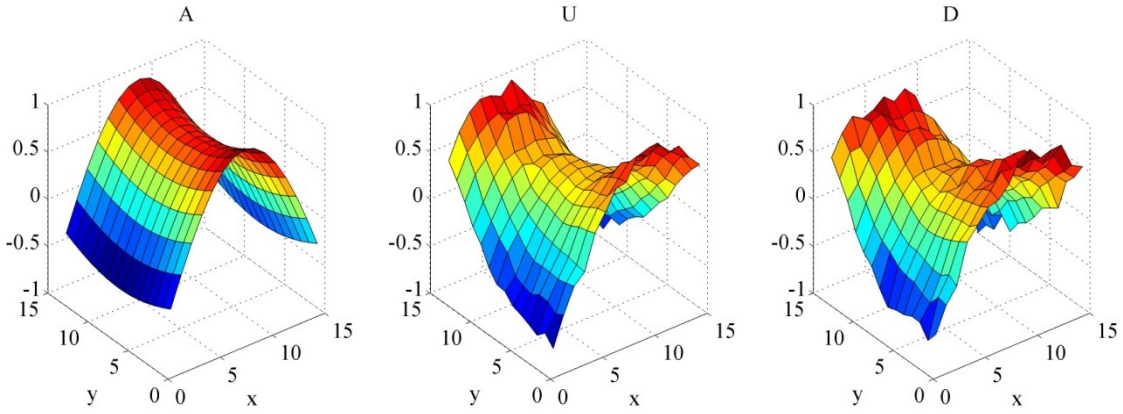


Şekil 3.47 Hasarlı plağın FCF eğrileri.

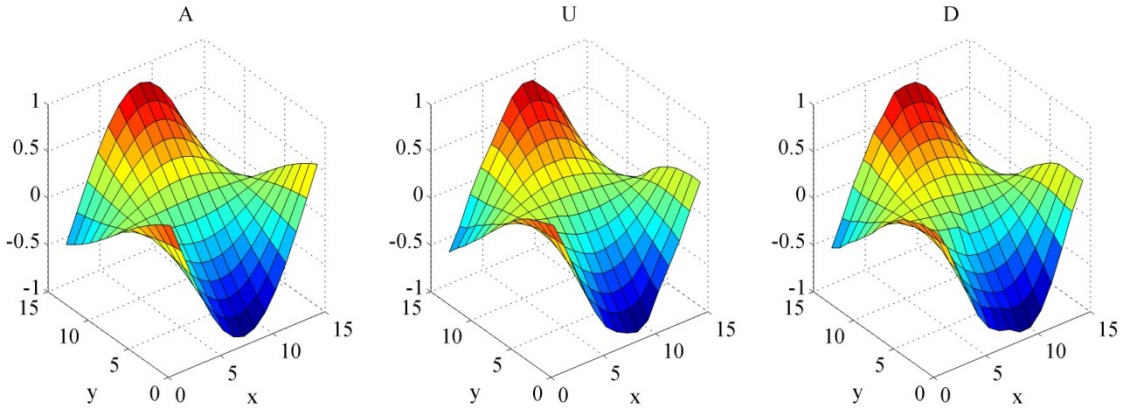
1.Mod

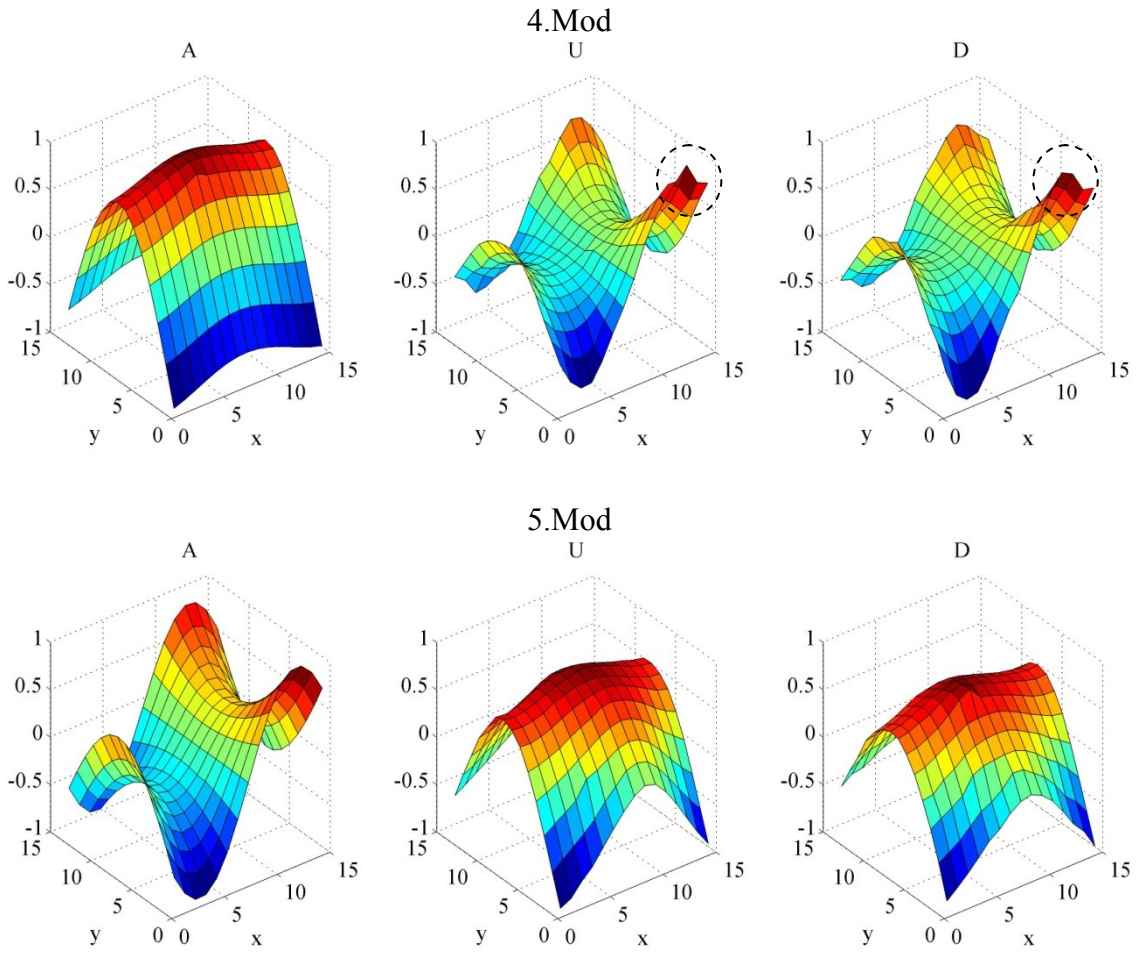


2.Mod



3.Mod





100xMAC(A,U)

$$\begin{bmatrix} \mathbf{60.21} & 36.03 & 2.03 & 0.23 & 0.81 \\ 32.64 & \mathbf{62.90} & 0.02 & 0.05 & 0.26 \\ 1.26 & 0.28 & \mathbf{97.11} & 1.85 & 0.06 \\ 4.29 & 0.09 & 0.07 & 0.42 & \mathbf{94.44} \\ 0.16 & 14.90 & 0.00 & \mathbf{91.86} & 0.55 \end{bmatrix}$$

100xMAC(U,D)

$$\begin{bmatrix} \mathbf{96.53} & 0.15 & 0.01 & 2.79 & 0.12 \\ 1.55 & \mathbf{96.61} & 0.70 & 0.85 & 3.91 \\ 0.56 & 0.35 & \mathbf{98.93} & 1.35 & 0.65 \\ 1.57 & 3.11 & 0.03 & \mathbf{97.98} & 1.63 \\ 0.33 & 1.37 & 0.32 & 0.42 & \mathbf{98.15} \end{bmatrix}$$

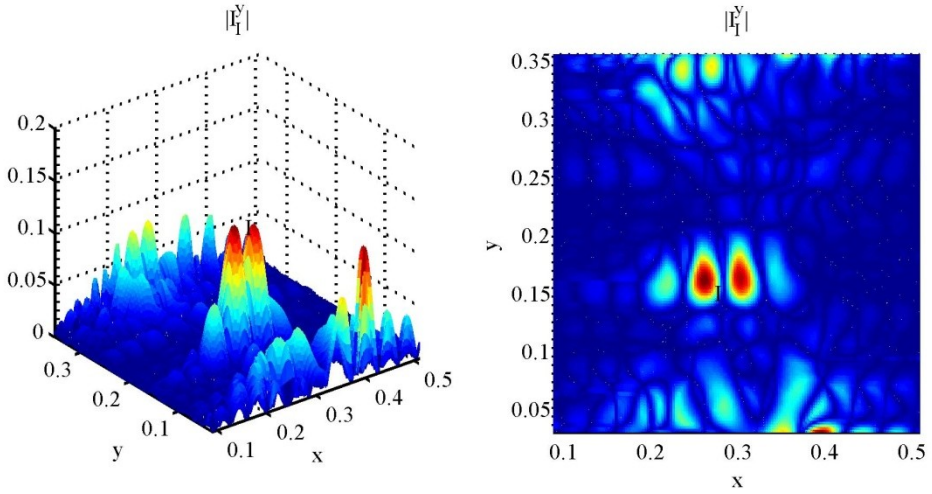
Şekil 3.48 Düzlem plağın deneysel ve sayısal titreşim modları. A: ANSYS-hasarsız, U: Deneysel-hasarsız, D: Deneysel-hasarlı. Hasarsız halde deneysel ve sayısal doğal frekanslar [Hz]: 16.25(25.8), 24.75(27.68), 56.75(59.68), 66.75(64.91), 77.75(74.42). Parantez içindeki rakamlar teorik frekanslardır.

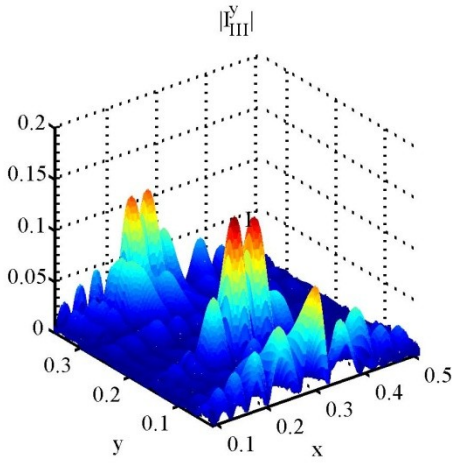
Şekil 3.48'deki MAC(A,U) matrisine bakıldığında, ilk iki modun oldukça hatalı ölçüldüğü görülmektedir. Bunda parça geometrisinin düzgünsüzlüğü (gözle görülebilir derecede eğrilikler mevcuttur), parçanın malzeme bakımından homojen olmaması (ucuz

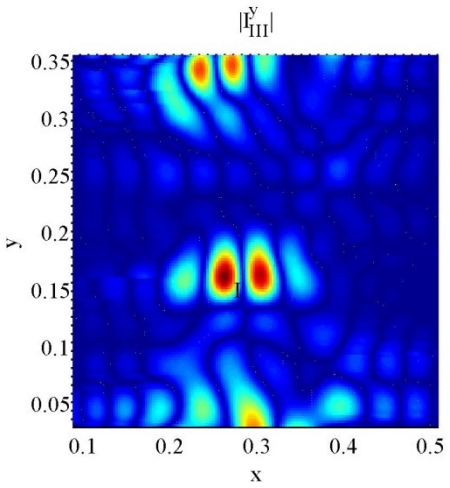
malzemeden soğuk şekillendirmeyle üretildiği için her yerinde malzeme kompozisyonu aynı değildir) etkilidir. Ayrıca, modların birbirine yakın olması da önemli bir sebeptir. Şekil 3.48'in açıklama yazısında verilen doğal frekanslara bakılırsa ANSYS ile bulunan ilk iki elastik doğal frekansın birbirine çok yakın olduğu görülür. Bu durum, ilk iki deneysel modun birbiriyle etkileşiminden kaynaklanan hatanın önemli mertebede olduğuna işaret eder. 3, 4 ve 5. modlarda daha az hata olmakla birlikte 4. teorik modun 5. deneysel modla, 5.'nin de 4. ile uyumlu olduğu görülmektedir. Bu durum teorik modların hesabındaki sayısal işlemlerden kaynaklanabilir. Deneydeki sınır şartlarının ideal serbest sınır şartıyla özdeş olmaması da bunun bir nedenidir. Diğer taraftan, MAC(U,D) matrisi deneylerin tutarlı olduğunu göstermektedir. Hasar mod şeklinde lokal değişime sebep olduğundan hasarlı ve hasarsız haldeki titreşim modlarının birbirlerine çok benzemesi gerekir. MAC(U,D) matrisinin köşegen elemanları bu benzerliğin oldukça yüksek olduğunu ifade etmektedir. Bu, bir anlamda, deneylerin tekrar edilebilirlik şartını sağladığını da gösterir. Dolayısıyla, MAC(A,U) matrisinde ilk iki moddaki düşük korelasyon, yapılan deneyin tutarsız olmasından değil, gerçek ve teori arasındaki model uyuşmazlığından ve mod şekli belirlemede kullanılan "*quadrature picking*" yönteminin yakın aralıklı modlar için uygun olmamasındandır. Diğer taraftan, hasar oluşturmak amacıyla açılan yarıkların biraz fazla uzun olduğu düşünülebilir. Fakat bu halde parazit miktarının ve örnekleme mesafesinin de daha yüksek olduğu unutulmamalıdır.

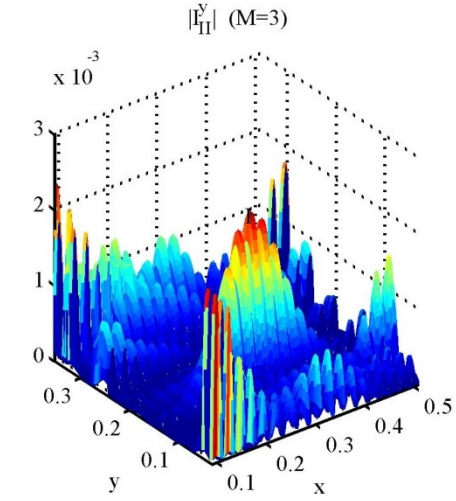
Hasar teşhisi konusunda en iyi sonuç üçüncü modla elde edilmiştir. Bunun kadar iyi olmamakla birlikte beşinci modun sütunları da kabul edilebilir sonuçlar vermiştir. İlk iki mod şekli, Şekil 3.48'den görüldüğü gibi, fazla parazitlidir. Bunlar modal analiz amacıyla bile yeterli doğrulukta ölçülememiştir. Dolayısıyla, hasar etkisini açığa çıkaramamışlardır. Dördüncü mod genel olarak yeterli doğrulukta ölçülmüştür. Ama dikkat edilirse, hem hasar yeri bunun eğriliğinin az olduğu semer noktasına yakındır hem de kenara yakın bölgede parazit kaynaklı ani değişimler yer almaktadır (Şekil 3.48'de çember içine alınmış bölge). Bu yüzden hasar etkisi yeterince belirgin değildir. Dolayısıyla, sadece üçüncü mod şekli ile ilgili sonuçlara yer verilmiştir (Şekil 3.49 ve 3.50). Ölçülen mod verisi 14x15 boyutunda bir matristir. Konum eksenlerinde çözünürlüğü arttırmak üzere kübik spline interpolasyonu ile on katına

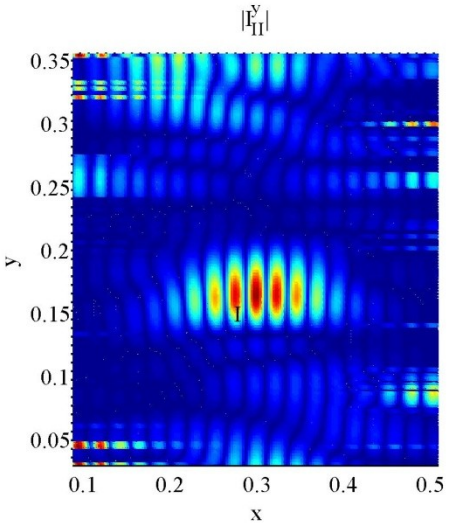
yoğunlaştırılmıştır. Bu durumda matrisin boyutu 140x150'dir. s=20 ölçeğinde sym6 ile genişletme yapılıp bu ölçekte aynı dalgacıkla SDD katsayıları hesaplanmıştır. ADD için yine sym14 dalgacığı kullanılmıştır. Bu durumda üçüncü mod şekli için "y" üst simgeli indisler Şekil 3.49'daki gibidir. I_I^y ve I_{III}^y indislerine bakıldığında en yüksek genlikli katsayıların hasar yerine (koordinatları (0.275;0.15) olan nokta) çok yakın olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, hasar yeri dışındaki bazı noktalarda da önemli derecede genlikler vardır. I_{II}^y indisi için uygun ADD ayrışım düzeyi bu halde M=4'tür. Çünkü 5. düzeyde indis çok farklı bir görünüme sahiptir. 3. düzeyde, özellikle köşelerde, aşırı genlikler oluşmuştur. 4. düzeydeki grafikte en yüksek genlik sadece hasar yerindedir. Bu grafik, diğer düzeydekilere kıyasla, I_I^y ve I_{III}^y indislerine en çok benzeyendir. Hatta I_I^y ve I_{III}^y'den biraz daha temiz bir görünüme sahiptir. Üçüncü modun sütunlarıyla hesaplanan "d" üst simgeli indisler Şekil 3.50'de gösterilmiştir. Bu halde sonuçların biraz daha iyi olduğu görülmektedir. I_I^d ve I_{III}^d'de grafiklerinde en yüksek genlik sadece hasar yerindedir. Bu durum I_{II}^d için de geçerlidir. I_{II}^d indisi için ADD'de uygun ayrışım düzeyi yine 4'tür. 3. düzeyde hasar kaynaklı değişimler henüz yeterli derecede ayıklanmadığından hasar yeri dışında da önemli genlikler bulunmaktadır. 5. düzeydeki yaklaşım fonksiyonları form olarak çok farklı olduğundan I_{II}^d indisinin hatalı sonuç verdiği görülmektedir.

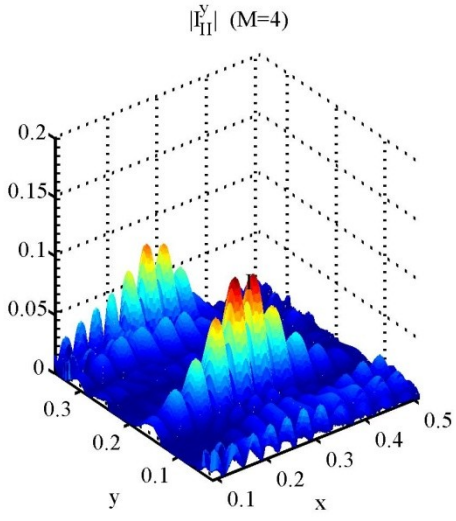


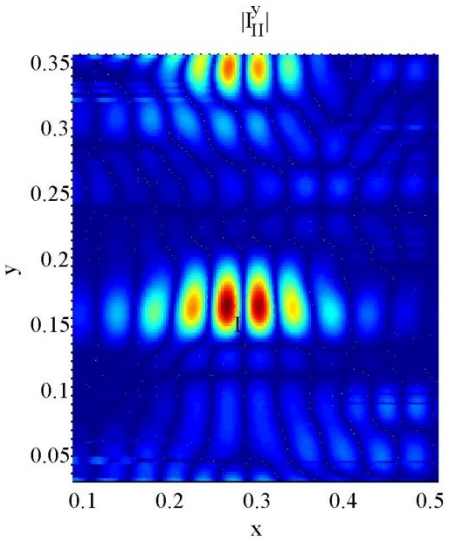

$|E^y_{III}|$
0.2
0.15
0.1
0.05
0
0.3
0.2
0.1
y
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
x

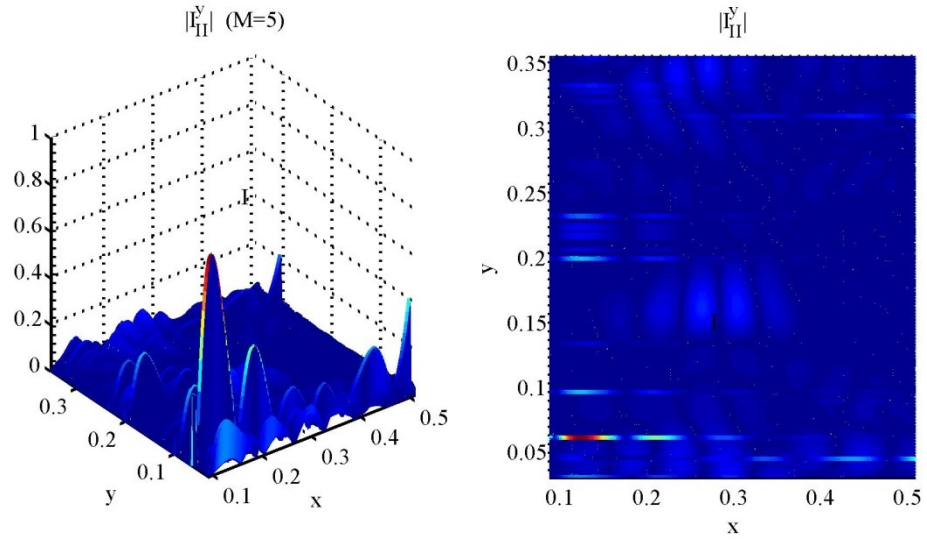

$|E^y_{III}|$
0.35
0.3
0.25
0.2
0.15
0.1
0.05
y
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
x


$|E^y_{II}|$ (M=3)
x 10^-3
3
2
1
0
0.3
0.2
0.1
y
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
x

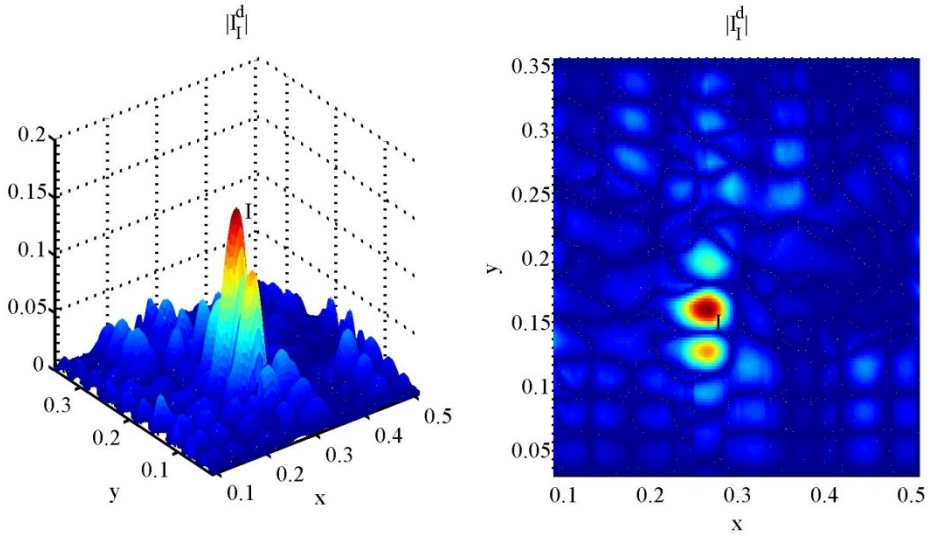

$|E^y_{II}|$
0.35
0.3
0.25
0.2
0.15
0.1
0.05
y
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
x

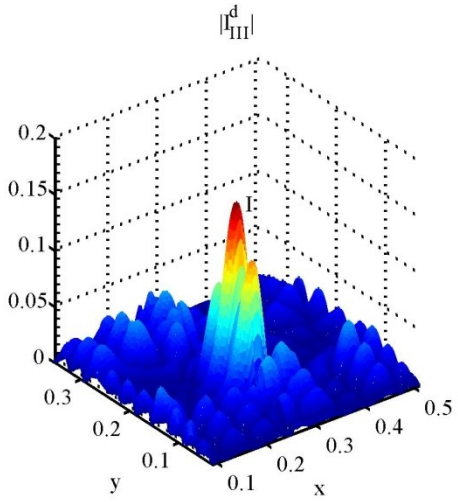

$|E^y_{II}|$ (M=4)
0.2
0.15
0.1
0.05
0
0.3
0.2
0.1
y
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
x

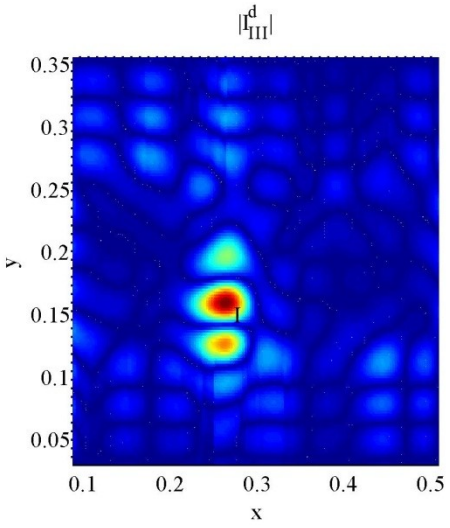

$|E^y_{II}|$
0.35
0.3
0.25
0.2
0.15
0.1
0.05
y
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
x

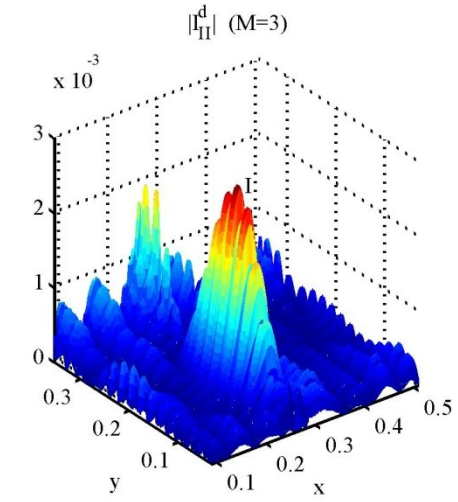


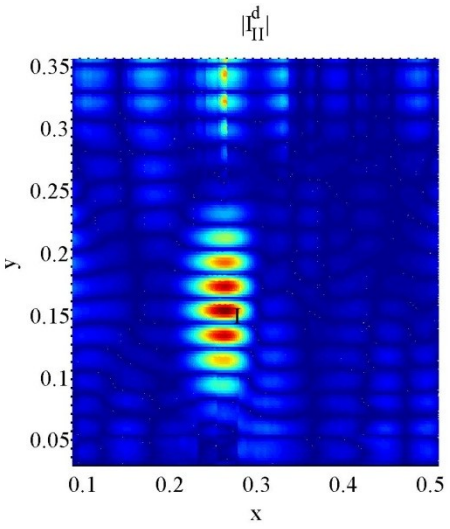
Şekil 3.49 Üçüncü mod şeklinin satırlarıyla hesaplanan hasar indisleri.

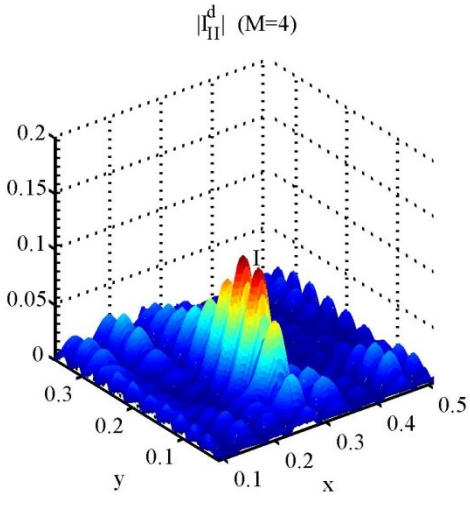


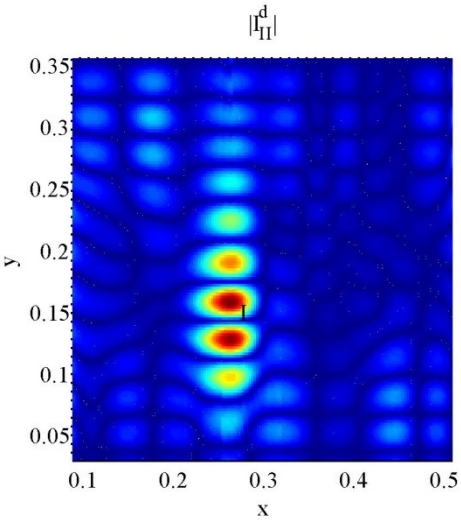

$|\Gamma^d_{III}|$
0.2
0.15
0.1
0.05
0
0.3
0.2
0.1
y
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
x

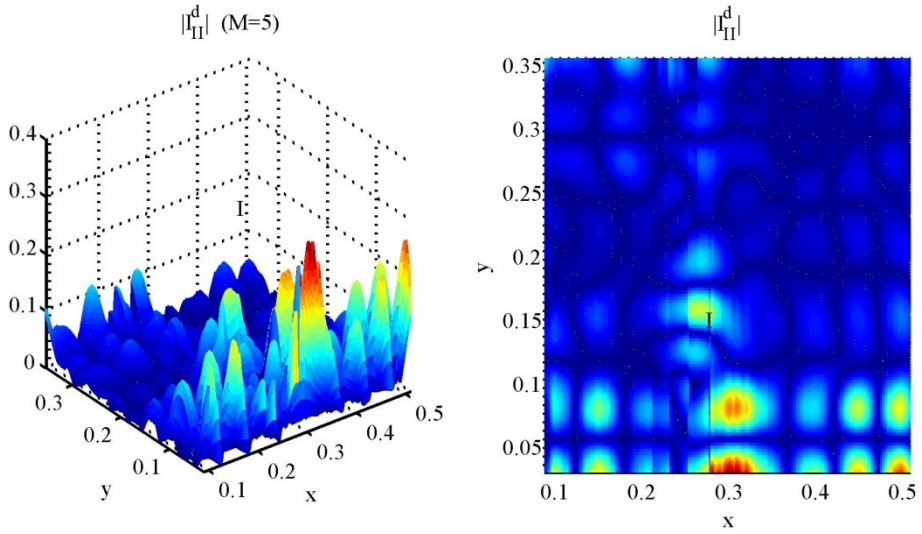

$|\Gamma^d_{III}|$
0.35
0.3
0.25
0.2
0.15
0.1
0.05
y
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
x


$|\Gamma^d_{II}|$ (M=3)
x 10^-3
3
2
1
0
0.3
0.2
0.1
y
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
x


$|\Gamma^d_{II}|$
0.35
0.3
0.25
0.2
0.15
0.1
0.05
y
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
x


$|\Gamma^d_{II}|$ (M=4)
0.2
0.15
0.1
0.05
0
0.3
0.2
0.1
y
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
x

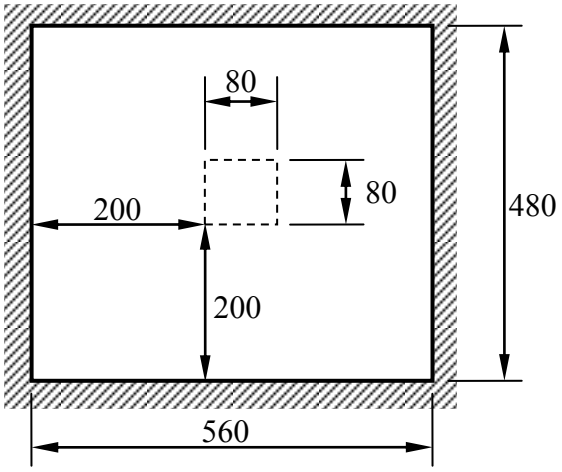

$|\Gamma^d_{II}|$
0.35
0.3
0.25
0.2
0.15
0.1
0.05
y
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
x



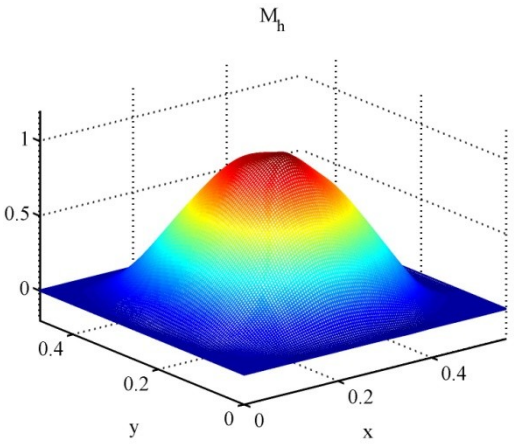
Şekil 3.50 Üçüncü mod şeklinin sütunlarıyla hesaplanan hasar indisleri.

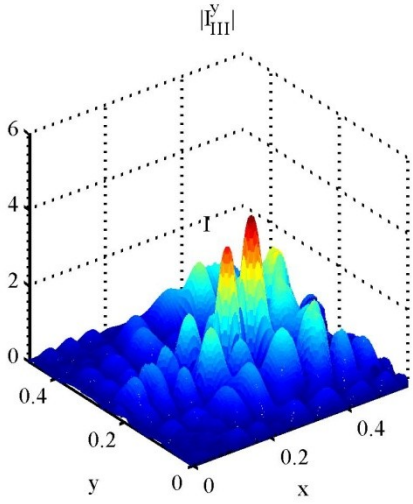
Konuyla ilgili başka bir uygulama Rucka ve Wilde (2006b)'in çalışmasındaki deneysel mod şekli kullanılarak yapılmıştır. Kalınlığı 2mm, kenar uzunlukları 560mm ve 480mm olan dörtgen plağın kenarlarına 200mm uzaklıktaki 80x80mm^2'lik alanın kalınlığı 0.5mm azaltılarak bir hasar oluşturulmuştur (Şekil 3.51). Plak kenarları ankastre mesnetli olup yatay doğrultuda örnekleme mesafesi 560/12=46.67mm, düşey doğrultuda da 480/14=34.28mm olacak şekilde toplam 13x15=195 ölçüm noktası belirlenmiştir. Bu çalışmadaki gibi çekiç-darbe testi ile plağın birinci mod şekli ölçülmüş ve hasar teşhisi amacıyla kullanılmıştır. Şekil 3.52 bu mod şeklini ve buna ait hasar indislerini göstermektedir[1]. Mod matrisi 15x13 boyutundadır, analizden önce yine 10 katına yoğunlaştırılmıştır. İndislerin hesabından önce her bir satır/sütun verisi yine s=20 ölçeğinde sym6 dalgacığı ile genişletilmiş ve indisler bu ölçekte aynı dalgacıkla hesaplanmıştır. I_{II}^y ve I_{II}^d için ADD'de bu kez de sym14 dalgacığı kullanılmış, uygun düzey M=4 olarak belirlenmiştir. Görüldüğü gibi indislerde en yüksek genlik hasar yeri civarındadır ((x;y) koordinatları (0.24;0.24) olan nokta). Bu çalışmada önerilen indisle de hasar yeri doğru bir şekilde belirlenmiştir.

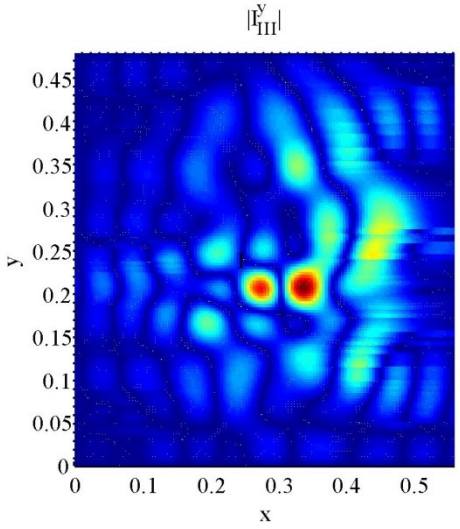
[1] Söz konusu çalışmada plağın sağlıklı haldeki titreşim modları ölçülmediği için I_i^y ve I_i^d ile ilgili grafikler verilmemiştir.

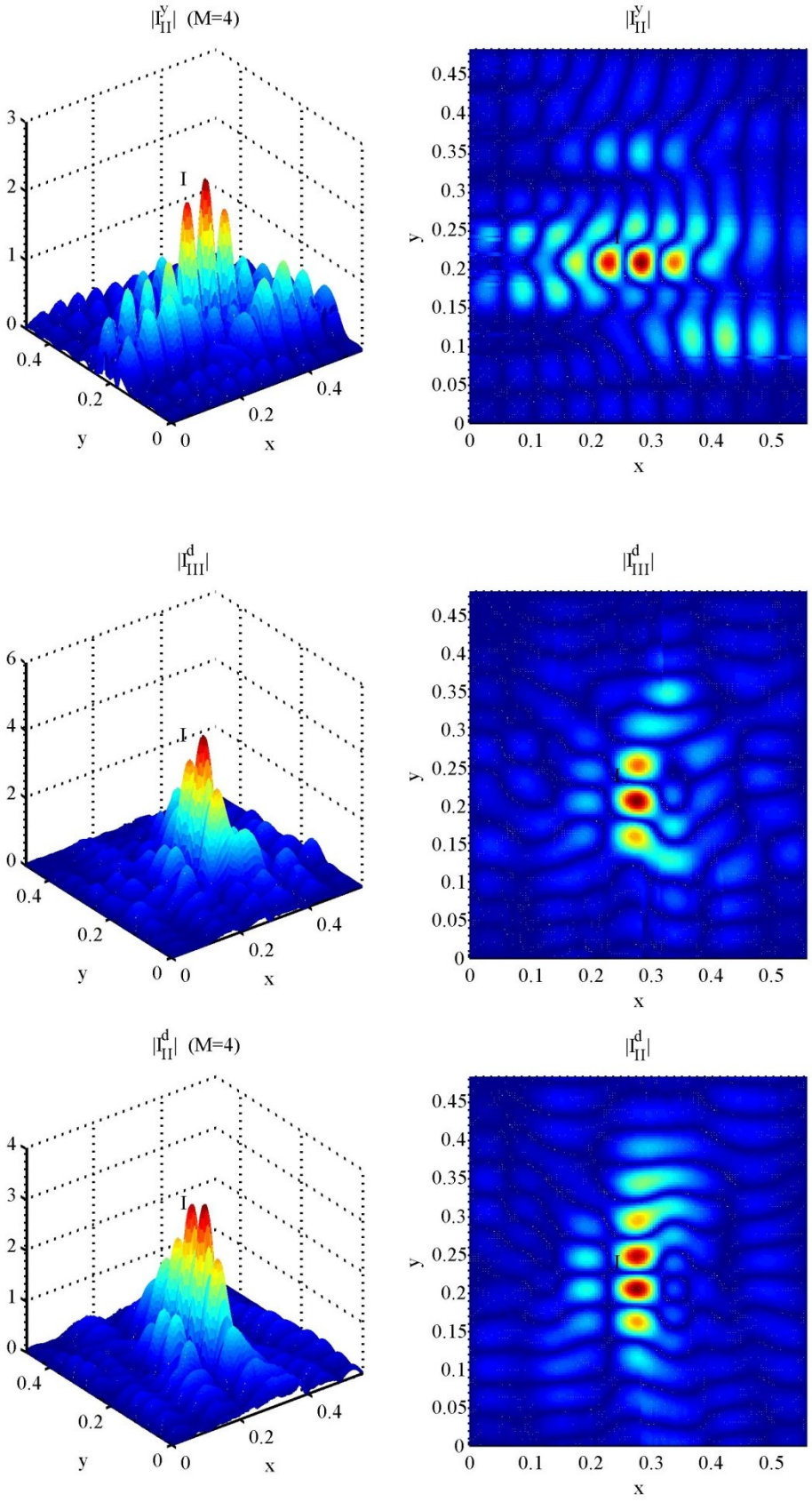


Şekil 3.51 Dört kenarı ankastre mesnetli plak.





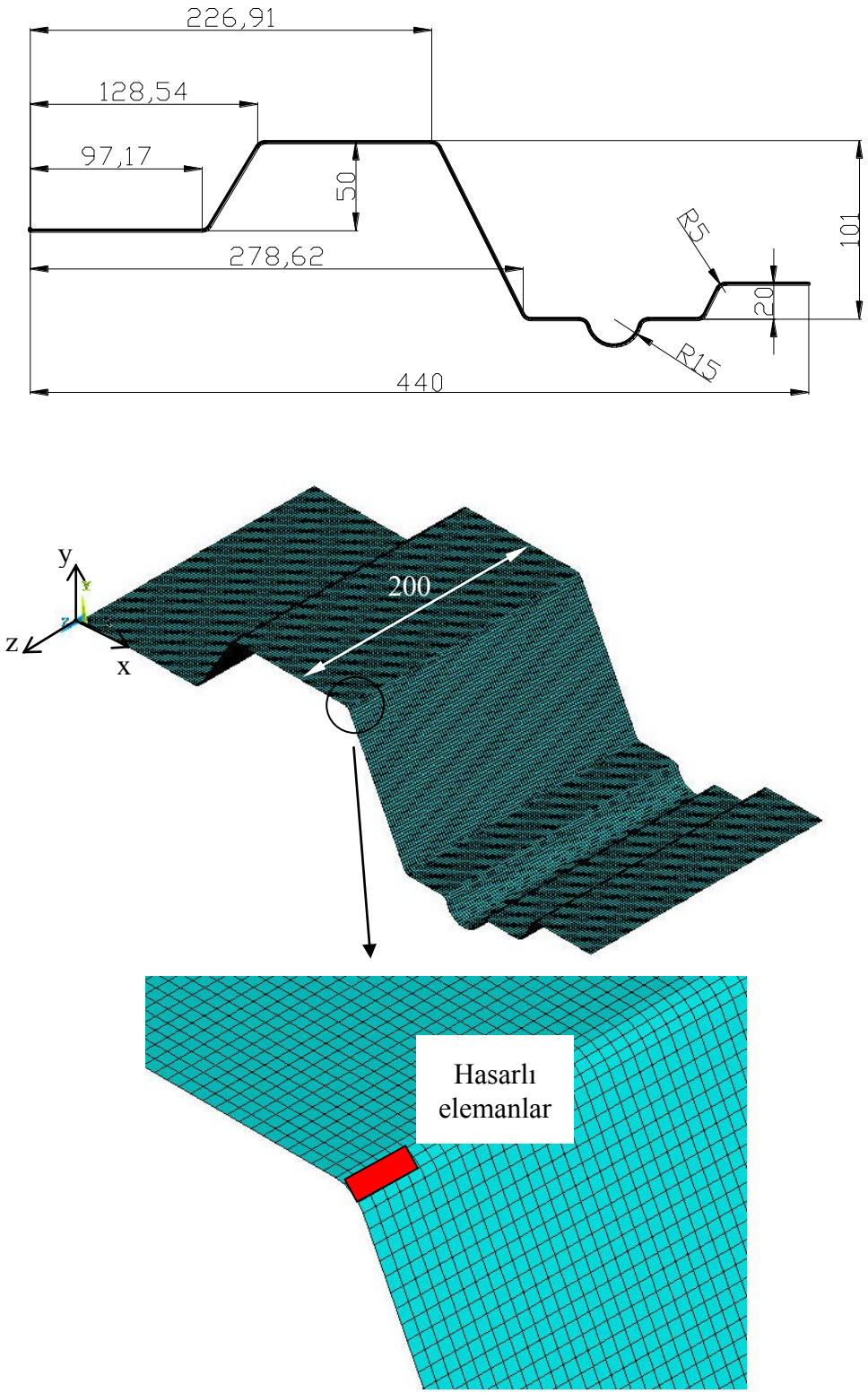




Şekil 3.52 Ankastre mesnetli plağın temel mod şekli ve bununla hesaplanan hasar indisleri

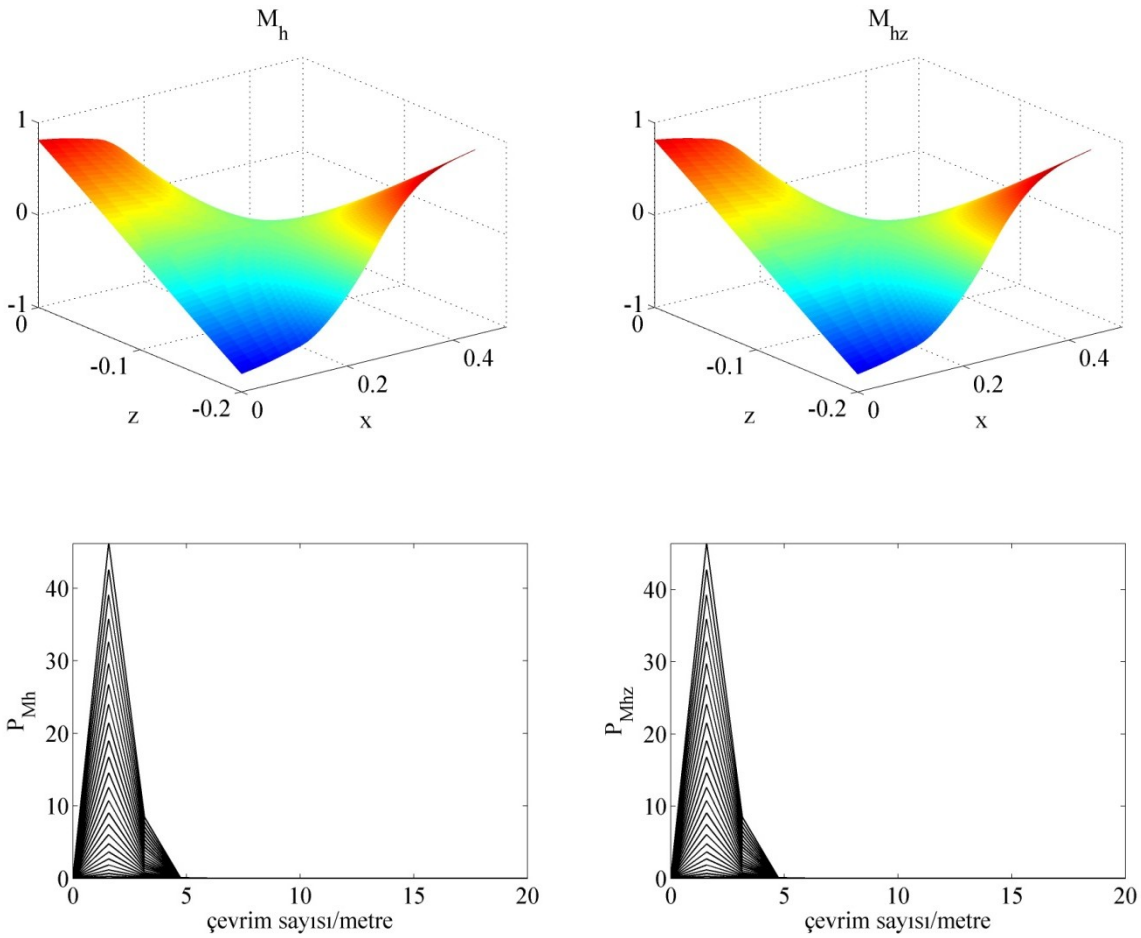
3.2.2.2. Karmaşık şekilli sac parçada HT

Titreşim modları ölçülen parça veya ölçüm bölgesi her zaman düzlemsel olmayabilir; girinti ve çıkıntı benzeri form değişimleri bulunabilir. Form değişimi dar bir bölgede aniden meydana gelirse bu bölgedeki SDD katsayıları hasarlı bölgedekiler gibi yüksek genlikli olurlar. Bunlar hasar kaynaklı değişimlerin belirlenmesini zorlaştırırlar. Bu çalışmada önerilen I_{II} indisi ölçüm bölgesinde ani kesit değişimi türü form değişimlerinin olmaması kabulüne dayanıyordu. Dolayısıyla, ne I_{II} ne de I_{III} indisi bu durumda yardımcı olabilir. Bununla birlikte, sac parça türü yapılarda genellikle keskin form değişimlerinden kaçınılır. Pratik olarak, çekme işlemlerinde oluşacak radyüsün olabildiğince yüksek olması tavsiye edilir. Fakat imalatla ilgili çeşitli sebeplerden ötürü sac kalınlığının yaklaşık dört katı civarında alınması önerilmektedir (Ataşimşek 1977). Bu şartı sağlayacak tarzda, sac kalınlığı 1mm olan Şekil 3.53'deki gibi bir çelik parça (E=210GPa, ρ=7800kgm^{-3}, ν=0.3) dikkate alınmıştır. Modellemede kolaylık açısından sadece x ekseni doğrultusunda form değişimleri oluşturulmuştur Dolayısıyla, Çizelge 3.11'deki indislerden sadece "y" üst indisliler hesaplanacaktır. Parçanın büküm yerlerindeki radyüslerin yarıçapı 5mm (şekilde bunlardan sadece en sağdakinin ölçüsü gösterilmiştir) olup, z ekseni doğrultusundaki genişliği 200mm'dir. Parça ANSYS ortamında SHELL63 elemanı ile kenar uzunluğu 2mm olan toplam 29000 elemana bölünmüştür. Hasar sol tarafa yaklaşık 227mm uzaklıktaki köşede bulunan 10 elemanın kalınlığı azaltılarak (hasarlı eleman kalınlığı 0.5mm'dir) modellenmiştir. Bu, çekme işleminde sac kalınlığının izin verilen sınırın altına düşmesi şeklinde bir imalat hatası olarak düşünülebilir. Parçanın sonlu eleman modelinden yararlanarak, serbest sınır şartları halinde ilk beş elastik titreşim modu bulunmuştur. Bunların her biri boyutu 101x291 olan bir matristir. Parça geometrisinden ötürü düğüm noktalarının x ekseni doğrultusundaki yerleşimi eşit aralıklı değildir. Eşit aralıklı noktalar elde etmek üzere x ekseni doğrultusundaki minimum örnekleme mesafesi (0.6189 mm) bulunmuş, x ekseni doğrultusundaki toplam mesafe (440mm) bu uzunluğa bölünerek bu doğrultudaki nokta sayısı 440/0.6189 $\cong$ 711 olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.53 Sayısal uygulamada dikkate alınan sac parça.

Böylece, 101x291 boyutundaki mod matrisinin boyutu kübik spline interpolasyonu ile 101x711'e çıkarılmıştır. Örnek olarak, 2. titreşim modu ele alınmıştır. Bunun sağlıklı ve hasarlı haldeki görüntüsü ile satır verilerinin frekans spektrumları Şekil 3.54'deki gibidir. Spektrum grafikleri hasar etkisinin bu halde de önemsiz derecede olduğunu göstermektedir[1]. Ayrıca, parçadaki form değişimlerinden ötürü, spektrum grafiklerinde mod şekli enerjisindeki baskın frekans aralığının biraz daha geniş olduğu görülmektedir (karş. Şekil 3.38).

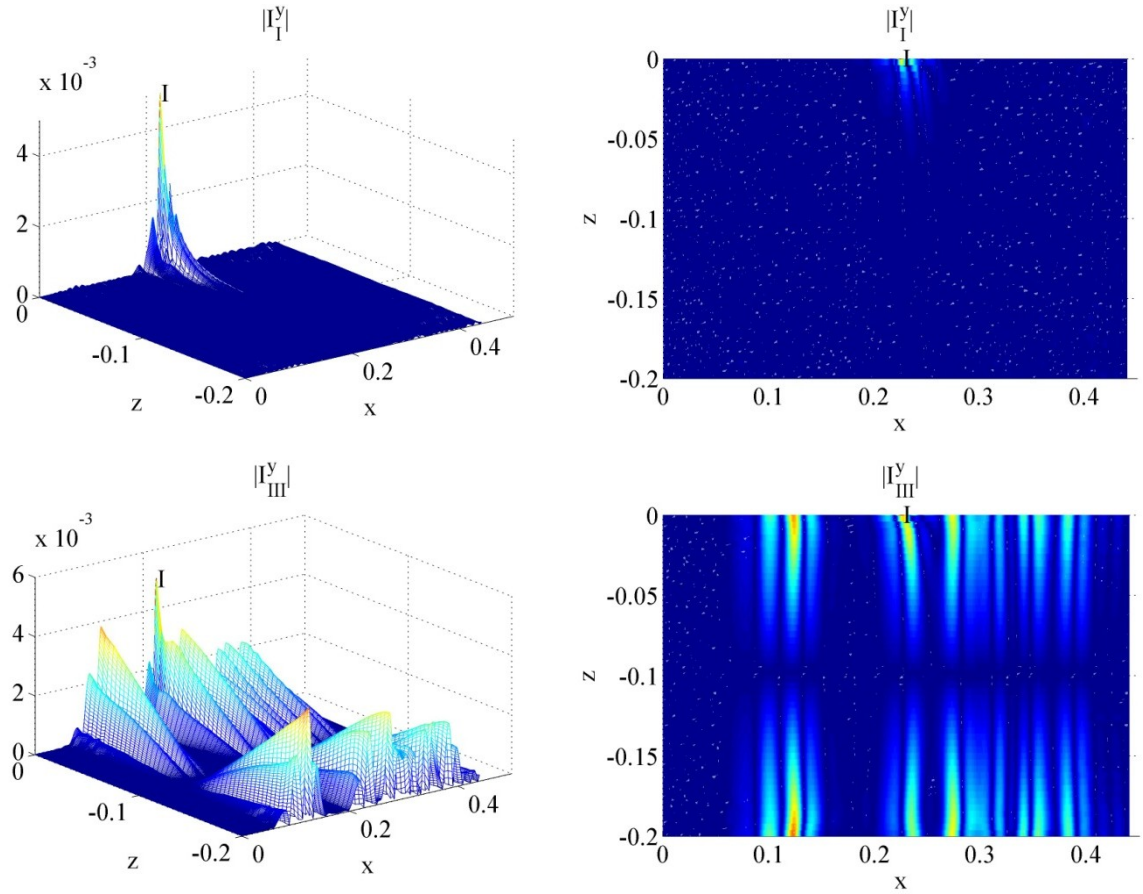


Şekil 3.54. Sac parçanın hasarlı ve sağlıklı haldeki 2. titreşim modu ve bunun satır verilerinin frekans spektrumları.

Bu mod şekli için "y" üst simgeli indis grafikleri Şekil 3.55'de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi hasar etkisi I_I^y grafiğinde daha belirgindir. I_{III}^y'de de en yüksek genlik

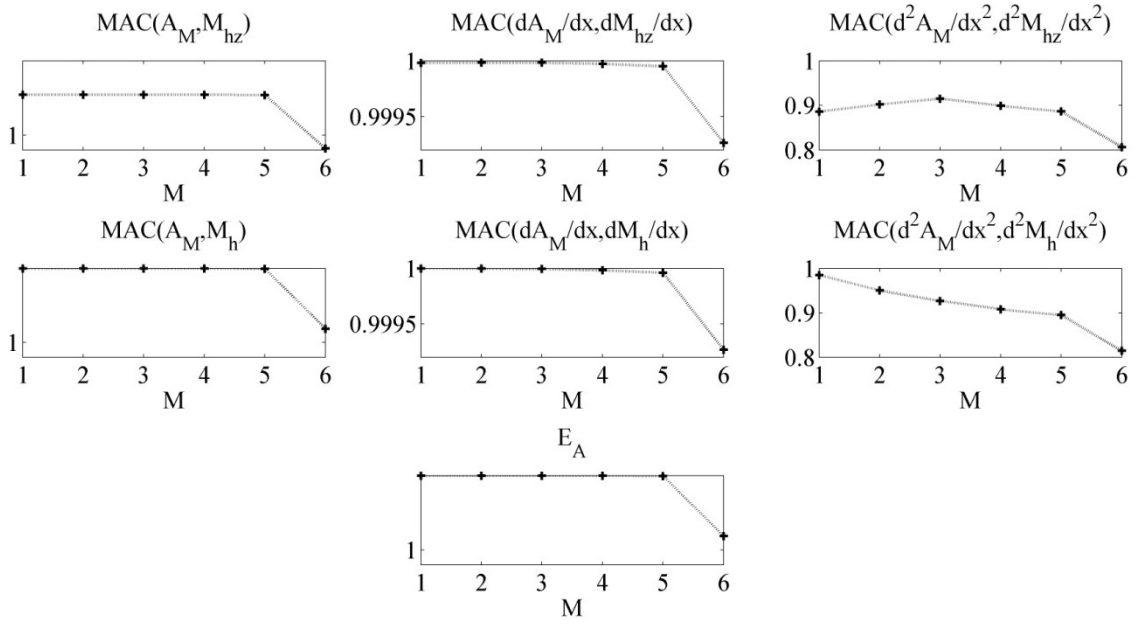
[1] Hasar etkisinin gerçekten de az olduğu doğal frekans değişimlerinden de anlaşılabilir. Parçanın sağlıklı ve hasarlı haldeki doğal frekansları (Hz) 19.78(19.77), 29.60(29.57), 39.87(39.86), 47.99(47.87), 76.63(76.61) şeklindedir (parantez içindekiler hasarlı haldeki frekanslardır). Görüldüğü gibi hasar sebebiyle doğal frekanslardaki değişim çok küçüktür.

hasar yerindedir. Fakat parçanın büküm noktalarına karşılık gelen yerlerinde de önemli genlikler mevcuttur. Bunlar hasar etkisini algılamayı zorlaştırmaktadır.



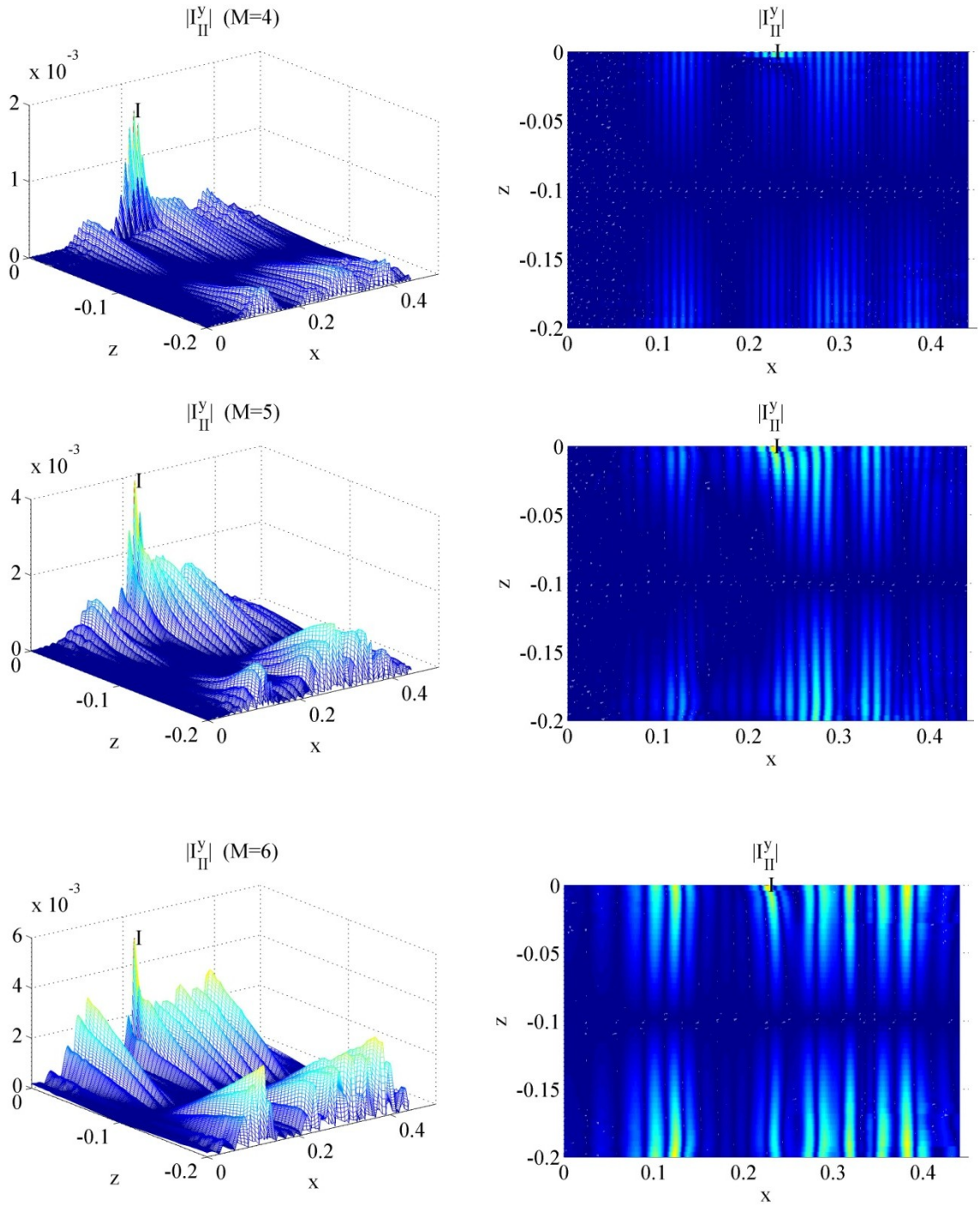
Şekil 3.55 2. Titreşim modu için I_I^y ve I_{III}^y grafikleri. (s=30 ölçeğinde sym6 dalgacığı ile hesaplanmışlardır)

I_{II}^y grafiğini hesaplamak üzere ADD'de yine sym14 dalgacığı kullanılmıştır. Yaklaşım fonksiyonları için uygun ayrışım düzeyi M=5 olarak belirlenmiştir. Böyle olduğu Şekil 3.56'dan görülebilir; indislerin çoğunda M=6 düzeyinde ani düşüşler meydana gelmiştir. Dolayısıyla, en fazla 5. düzeye kadarki yaklaşım fonksiyonları ile ilgilenilmelidir.



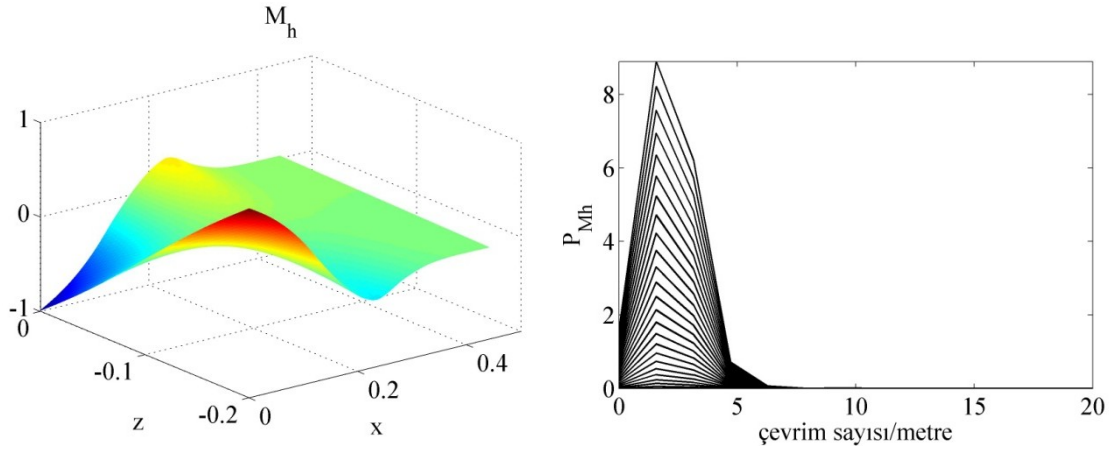
Şekil 3.56 Mod verisinin ilk satırı için indislerin ADD ayrışım düzeyi M ile değişimi.

Şekil 3.57'deki grafiklere bakıldığında M=5'den sonra I_{II}^{y}'nin Şekil 3.55'deki I_{III}^{y} grafiğine benzediği görülmektedir. M=5'deki I_{II}^{y} ile I_{III}^{y} karşılaştırılırsa hasar etkisinin I_{II}^{y}'de daha belirgin olduğu görülür. Hasar yerindeki maksimum genliğin hasar yeri dışındaki maksimum genliğe oranı I_{II}^{y} indisinde daha fazla olduğu doğrulanabilir. Öte yandan, M=4'deki I_{II}^{y} grafiğinin I_{I}^{y} ile daha uyumlu olduğu anlaşılmaktadır. Ancak, burada, metotla ilgili genel kurala uygunluk bakımından, M=5'deki yaklaşım fonksiyonlarının kullanılması önerilmektedir. Çünkü bu düzeydeki yaklaşım fonksiyonu hasarlı haldeki titreşim moduyla form bakımından yeterince uyumlu olmakla birlikte hasar bileşenlerinden daha fazla arınmıştır.



Şekil 3.57 Farklı düzeylerdeki yaklaşım fonksiyonları ile elde edilen I_{II}^{y} grafikleri.

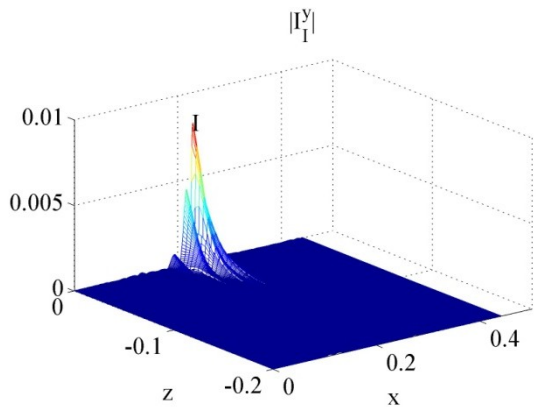
Başka bir uygulama parçanın dördüncü titreşim modu ile yapılmıştır. Hasarlı haldeki titreşim modu ve satır verilerinin spektrum grafikleri Şekil 3.58'de gösterilmiştir (benzerlikten ötürü sağlıklı haldeki grafikler verilmemiştir). Bu halde satır verilerinin spekturumu biraz daha geniştir. I_{II}^{y} indisi için ADD'de yine sym14 dalgacığı kullanılmış ve uygun ayrışım düzeyinin bu halde de M=5 olduğu tespit edilmiştir. Mod verisi için hesaplanan hasar indisleri Şekil 3.59'daki gibidir. Görüldüğü gibi yine en iyi sonuç I_{I}^{y} indisine aittir. I_{III}^{y} grafiğinde de en yüksek genlik hasar yerindedir. Ama parçanın form değişiminden kaynaklanan genlikler de önemli mertebededir. I_{II}^{y} ile ilgili grafiklerde 4. düzeyin aranan yaklaşım fonksiyonları için uygun olmadığı görülmektedir. 5. düzeyde hasar etkisi gayet belirgindir; hasar kaynaklı en yüksek genliğin hasar yeri dışındaki en yüksek genliğe oranı I_{III}^{y} grafiğindekinden daha fazladır (bu oran I_{II}^{y} için yaklaşık 2.85, I_{III}^{y} için de 1.52 civarındadır).

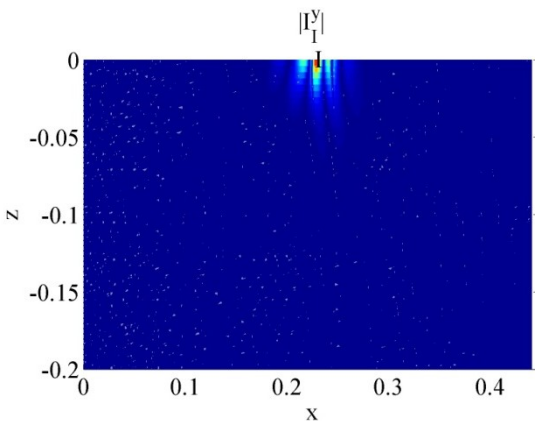


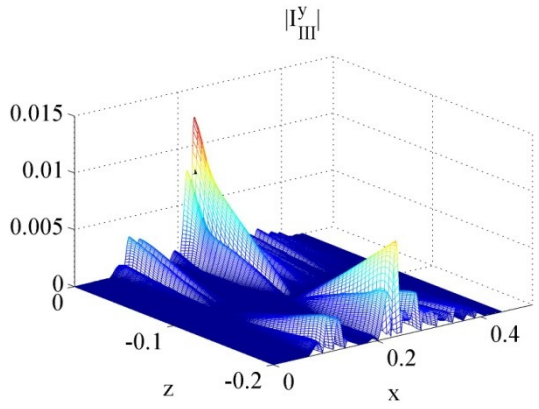
Şekil 3.58 Hasarlı haldeki titreşim modu ve satır verilerinin spektrum grafikleri

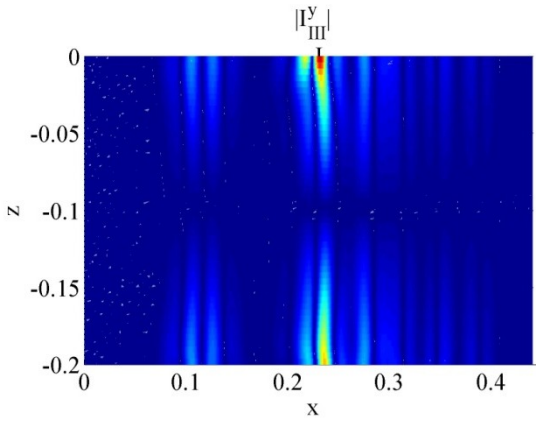
6. düzeyde indis grafiği I_{III}^{y}'e benzemektedir. Bunun sebebi bu düzeyle birlikte mod verisinden mod şeklini belirleyen temel frekanslı bileşenlerin de ayıklanmaya başlamasıdır. Böylece hasar yeri dışındaki genlikler de artmaktadır. Bu durumu izah etmek üzere Şekil 3.58'deki spektrum grafiğinde küçük genlikli bölge büyütülerek gösterilmiştir (Şekil 3.60). sym14 dalgacığının belli ölçeklerdeki merkez frekanslarına bakılırsa, 6. düzeyden itibaren merkez frekansı 16.8çs/m olan bileşenlerin ayıklandığı

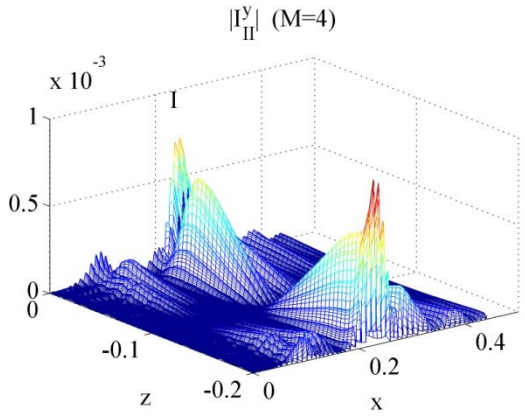
görülür. Bunların içinde frekansı 16.8'den küçük olanların da bulunduğu ve bunların mod şekli enerjisine katkı sağlayan bileşenlerden olduğu düşünülürse bu düzeydeki yaklaşım fonksiyonunun istenilen kriterleri sağlamadığı anlaşılır. Dolayısıyla, I_{II}^{y} indisi için uygun düzey M=5'tir.

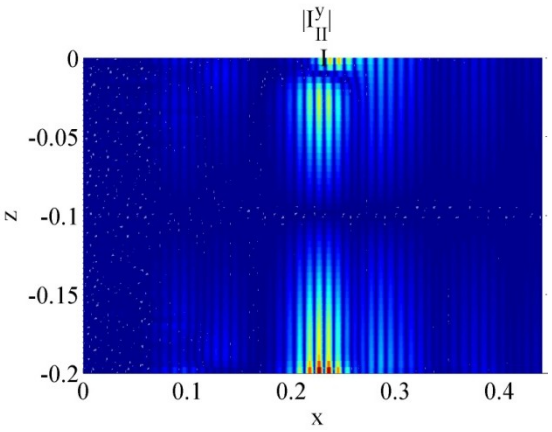


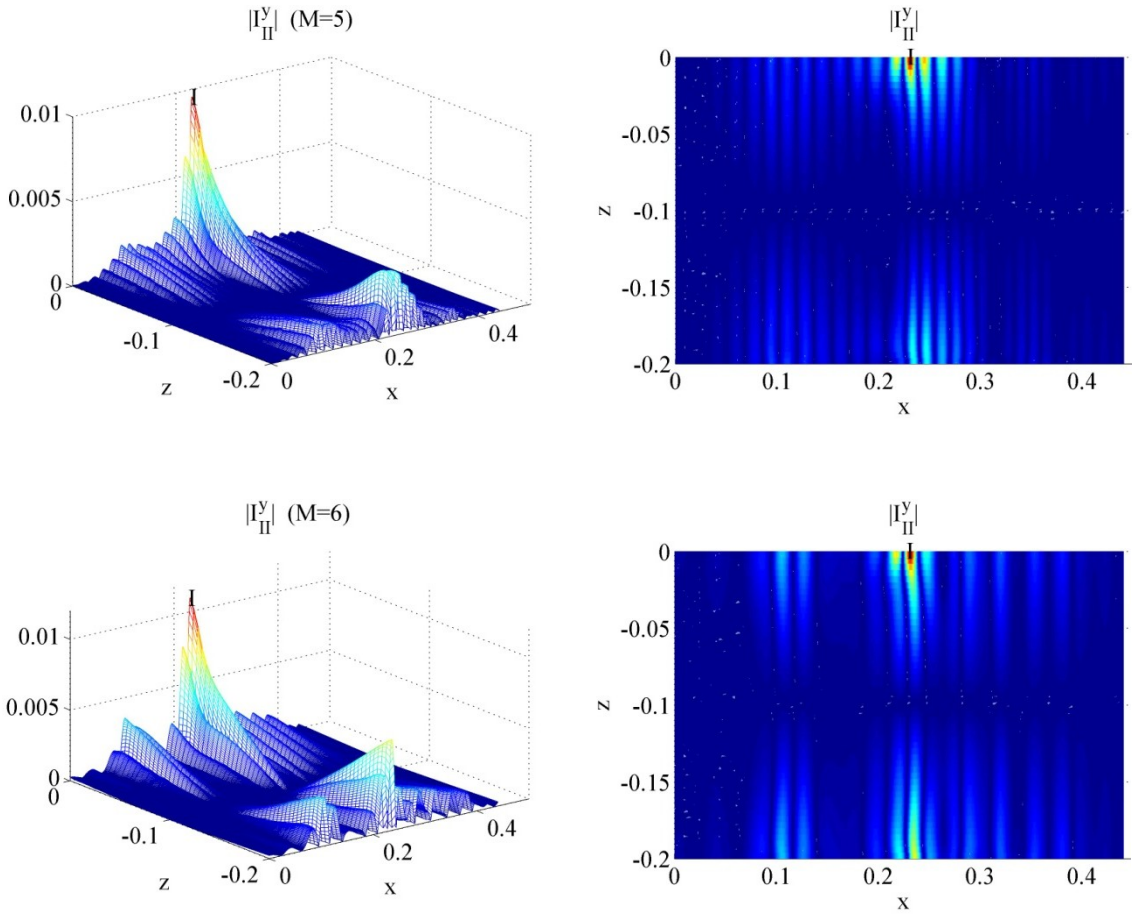




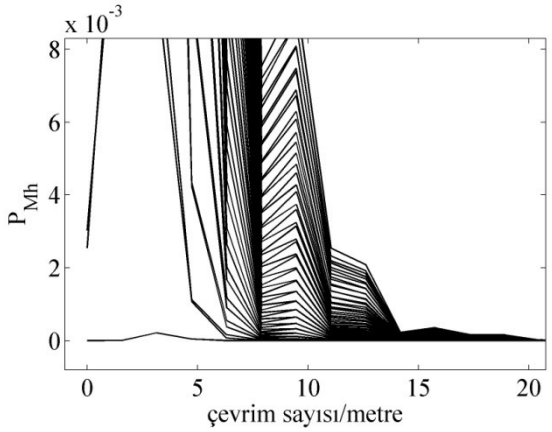








Şekil 3.59 Sac parçanın 4. titreşim modu ile hesaplanan hasar indisleri

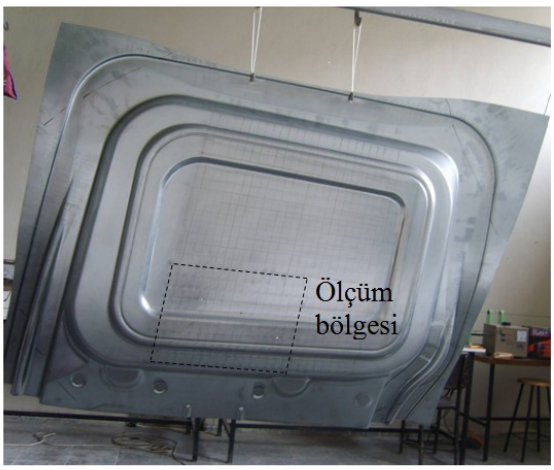


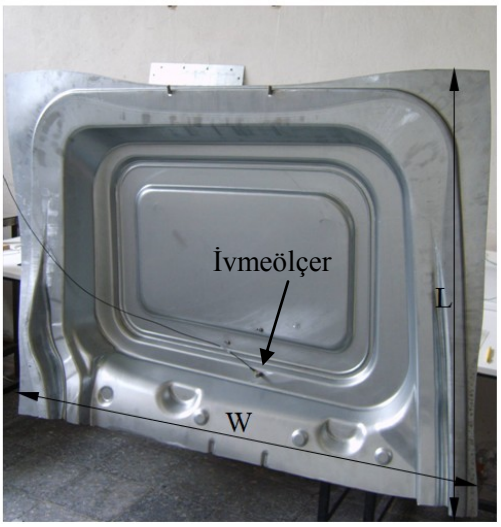
M	s	ω_s[çs/m]
1	2	538
2	4	268
3	8	134
4	16	67
5	32	33.6
6	64	**16.8**
7	128	8.4

Şekil 3.60 4. Mod verisinin spektum grafiği ve sym14 dalgacığının belli ölçeklerdeki merkez frekansları (örnekleme periyodu $\Delta=0.6189\text{x}10^{-3}\text{m}$)

Birinci, üçüncü ve beşinci mod şekilleri ile de uygulamalar yapılmış, fakat bunlar mevcut hasara çok duyarlı olmadığından I_{II}^{y} ve I_{III}^{y} indislerinin hasar yerini belirlemede yetersiz kaldığı gözlenmiştir. Bu hallerde en iyi sonuç I_{I}^{y} ile elde edilmiştir. I_{II}^{y} indisinin, yukarıdaki iki örnekte olduğu gibi, hasar etkisinin belirgin olduğu durumda bunu I_{III}^{y}'e göre daha açık hale getirdiği anlaşılmıştır. Yani bir nevi I_{III}^{y} indisinin iyileştirilmiş halidir. Fakat I_{III}^{y}'de en yüksek genlik hasar yerinde değilse I_{II}^{y}'de de olmayabilir. Dolayısıyla, karmaşık şekilli bir sac parça için I_{II}^{y} indisinin her durumda I_{I}^{y} indisine benzer bir performans göstermesi beklenmemelidir. Bununla birlikte, sağlıklı hale ait referans veri yoksa ve sadece hasarlı haldeki veriyi kullanma mecburiyeti söz konusu ise I_{II}^{y} ile hasar hakkında daha sağlıklı bir değerlendirme yapılabilir. Burada I_{II}^{y}'nin kullanımına ilişkin bir hususu belirtmekte fayda vardır: Ele alınan örnekte parçada z ekseni doğrultusunda form değişimi yoktu. Bu sebeple, tüm satır verilerinin spektrumları aynı genişlikte idi (bkz. Şekil 3.54,58). Bu durumda, uygun yaklaşım fonksiyonu bulurken her satır için aynı düzey dikkate alınmıştı. Fakat en genel durumda, parçada z ekseni doğrultusunda da gelişigüzel form değişimi olabilir. Bu durumda mod şeklinin tüm satırları (ya da sütunları) aynı spektrum genişliğine sahip olmayabilir. Dolayısıyla, her satır için uygun bir düzey belirlemek gerekebilir.

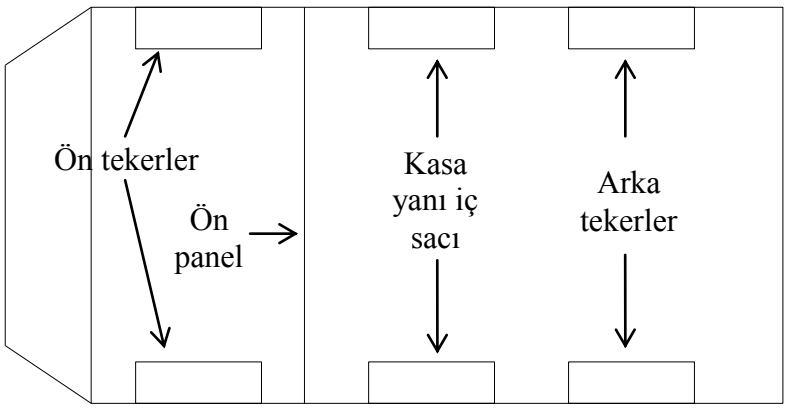
Deneysel veri ile indisleri test etmek üzere, Şekil 3.61'de verilen sac parça dikkate alınmıştır. Kabaca boyutları L=70cm, W=100cm ve bu iki boyuta dik doğrultudaki maksimum derinliği yaklaşık 13cm'dir. 0.7mm kalınlığındaki çelik sacdan (malzeme kodu FEPO4 ZNT/F/7.5/2S olup soğuk haddelenmiş çelik sacın her iki yüzeyine 7.5μm çinko kaplama yapıldığını ifade eder) imal edilen bu parça kargo tipi bir araçta "kasa yanı iç sacı" olarak kullanılmaktadır (Şekil 3.62). Amaç, yapı üzerinde belli bir alandan yüzeye dik doğrultuda modal ölçümler yapmaktır. Bu maksatla Şekil 3.61'de kesikli çizgiyle çevrelenmiş paralelkenar görünümlü bölge dikkate alınmıştır. Keyfi seçilen bu alanın ayrıntılı görünüşü Şekil 3.63'deki gibidir. x ve y eksenleri doğrultusundaki uzunluklar sırasıyla 27cm ve 18.5cm'dir. x ekseni doğrultusundaki örnekleme mesafesi ortalama 270/17=15.9mm, diğer doğrultudaki de 185/9=20.6mm civarındadır. Bu değerler her aralık için sabit olmayıp en fazla ±2mm hatalıdır. Yatay eksende 18, düşey eksende de 10 ölçüm noktası olduğundan her bir mod matrisi 10x18 boyutundadır.



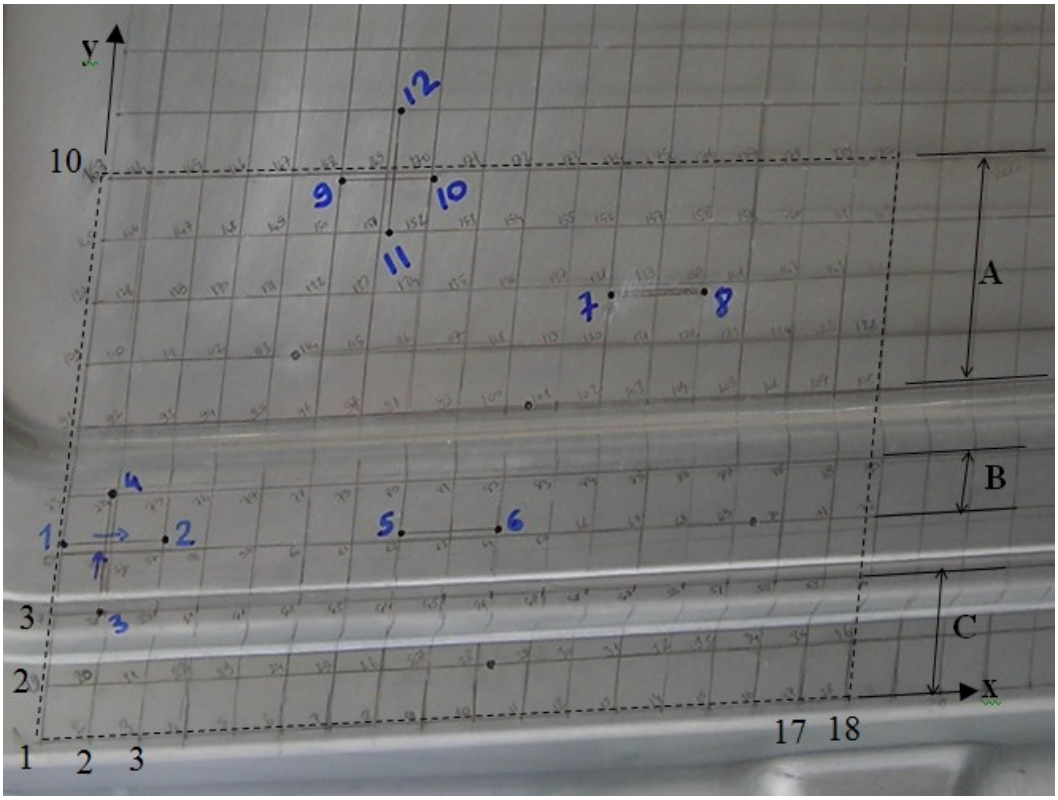


Ön görünüş Arka görünüş

Şekil 3.61 Deneyde kullanılan karmaşık şekilli sac parça.



Şekil 3.62. Parçanın araçtaki kullanım yerinin şematik gösterimi.



Şekil 3.63. Ölçüm alanı

Farklı konumlarda farklı derecede hasar elde etmek amacıyla bölge üzerinde mavi renkle gösterilen rakamlar arasında CNC lazer kesme tezgâhında 0.5mm genişliğinde yarıklar açılmıştır. Hasar durumu ile ilgili bilgiler Çizelge 3.12'de verilmiştir. Çizelgede hasar orta noktalarının mod verisinde hangi satır ve sütuna karşılık geldiği ve (x,y) koordinatları da belirtilmiştir. Hasar derecelerinin pratikte karşılaşılabilecek türden fazla olması deneyin uygulamayla örtüşmediği izlenimi verebilir. Fakat –kullanılan deney tesisatından ötürü– örnekleme mesafesini daha fazla azaltmak ve çok hassas ölçümler yapmak zordur.

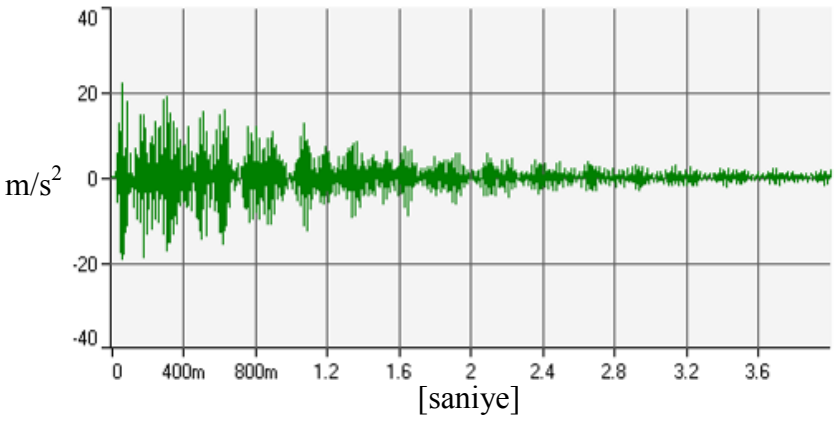
Çizelge 3.12 Sac parçadaki yarıkların uzunluğu ve yerleşimi.

Hasar No	Arasında olduğu noktalar	Yarık uzunluğu (mm)	(Satır,Sütun)	(x,y) [metre,metre]
I	1-2	34	(4,2)	(0.016,0.062)
I	3-4	40	"	"
II	5-6	33	(4,9)	(0.127,0.062)
III	7-8	32	(8,13)	(0.191,0.144)
IV	9-10	30	(10,7)	(0.095,0.185)
IV	11-12	40	"	"

Plak deneyindeki gibi yine 0-100Hz arasıyla ilgilenilmektedir. Ölçülen bir ivme verisine (deneyde B&K 4594 ivmeölçer kullanılmıştır) bakılarak (Şekil 3.64) parçadaki sönümün kiriş ve plak deneylerindekinden daha fazla olduğu anlaşılmıştır. Bu sebeple, eksponensiyel pencere sabiti belirlenirken McConnell (1995) tarafından önerilen yöntem kullanılmıştır. Buna göre, kayıt süresinin sonundaki ivme değerinin başlangıçtakine oranı kabaca belirlenir (Şekil 3.64'den bunun 1/15 civarında olduğu anlaşılmaktadır). Bu oranı %2 yapan pencere sabiti τ

$$\tau = \frac{-(ks-km)}{\ln(oran)} = \frac{-(4-0.01)}{\ln(0.3)} = 3.31 \text{saniye}$$

olarak bulunmuştur. Burada ks: kayıt süresi (4 saniye), km: zaman ekseninde kaydırma miktarı (10 milisaniye), oran=0.02/(1/15)=0.3. Deneydeki diğer ayarlar; frekans çözünürlüğü 0.25Hz, ortalama sayısı 4 şeklindedir.

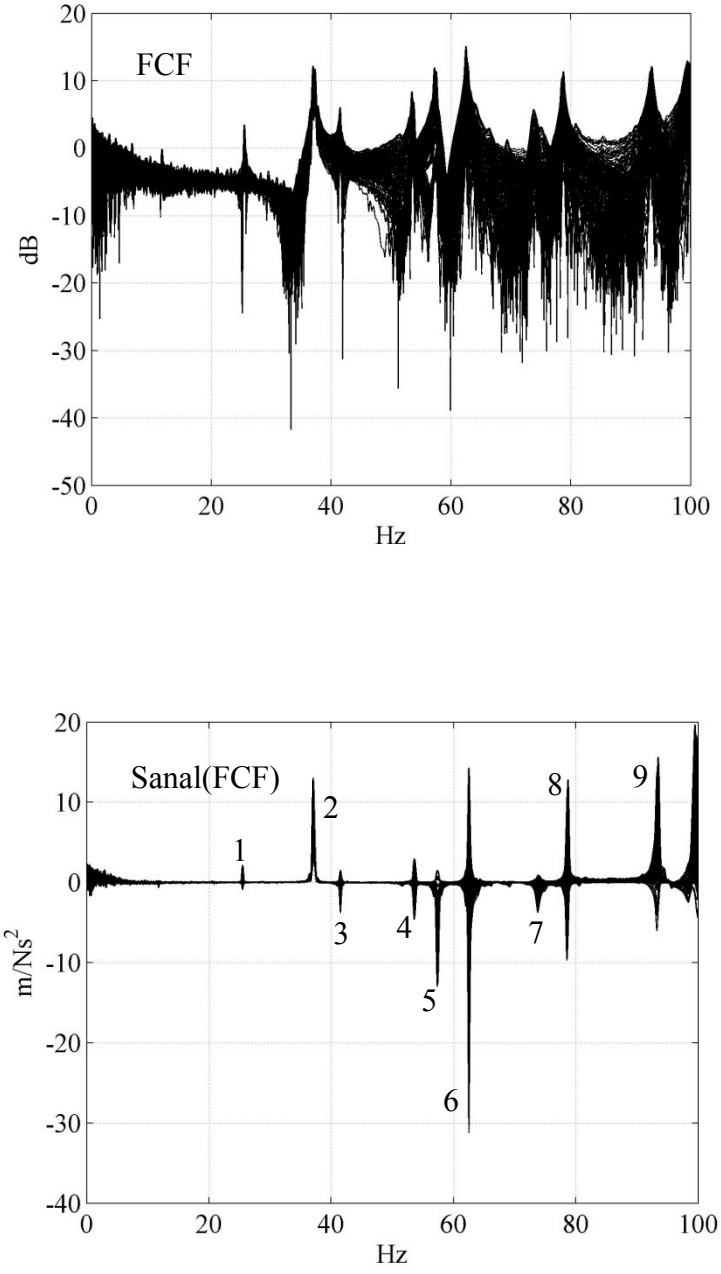


Şekil 3.64. Sac parça üzerinden ölçülen bir ivme verisi.

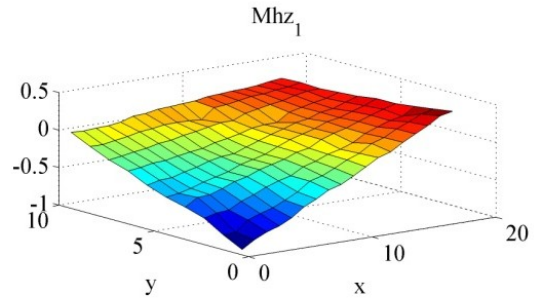
Ölçüm bölgesinde A, B ve C ile gösterilen üç bölge mevcuttur. Bir bölgedeki ölçüm noktalarının z koordinatı –yaklaşık olarak– birbirine eşittir. A'dan B bölgesine, B'den de C'ye geçerken parçada form değişimi olmaktadır. Parça Şekil 3.61'deki gibi askılandıktan sonra ölçümler için uygun bir ivmeölçer konumu belirlenmiştir. Parçanın sonlu eleman modeli mevcut değildir. Bu sebeple, önceden parçanın sayısal titreşim

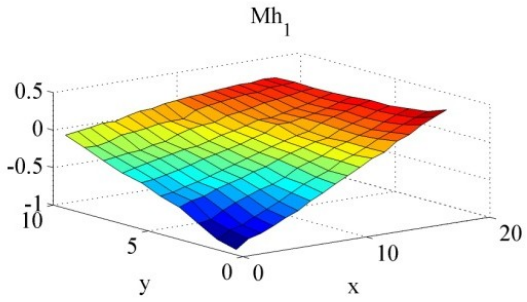
modlarını belirleyip düğüm çizgilerini tespit etmek ve buna göre uygun bir ölçüm noktası seçmek mümkün değildir. Dolayısıyla, A, B ve C bölgelerindeki farklı noktalardan FCF ölçülüp karşılaştırılmış, bunların içinden titreşim modlarına en duyarlı olanın C bölgesindeki 28 nolu noktadan (bkz. Şekil 3.61) ölçülen olduğu anlaşılmıştır.

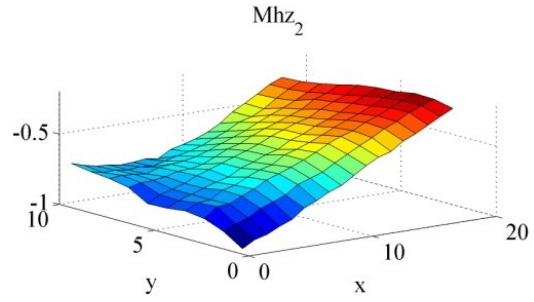
Hasarlı ve sağlıklı halde 180 noktadan akselerans formunda FCF eğrileri ölçülmüştür. Hasarlı haldeki FCF eğrileri ve sanal kısımları Şekil 3.65'deki gibidir (benzerlikten ötürü sağlıklı hale ait olanlar verilmemiştir). Görüldüğü gibi 0-100 Hz arasında dokuz adet doğal titreşim modu bulunmaktadır.

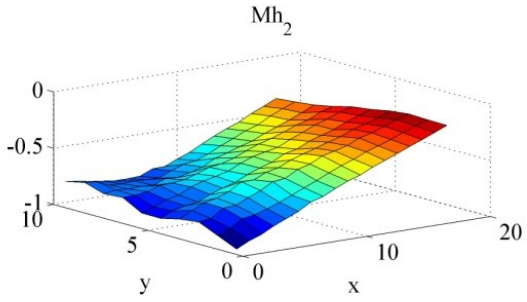


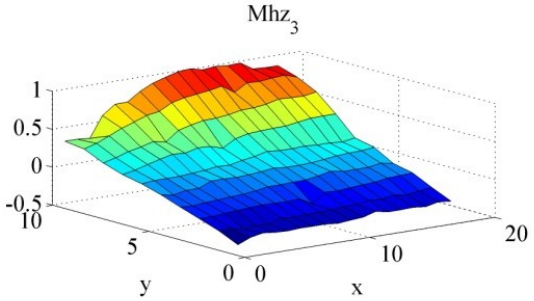
Şekil 3.65 Hasarlı sac parçadan ölçülen 180 adet FCF eğrisi ve sanal kısımları.

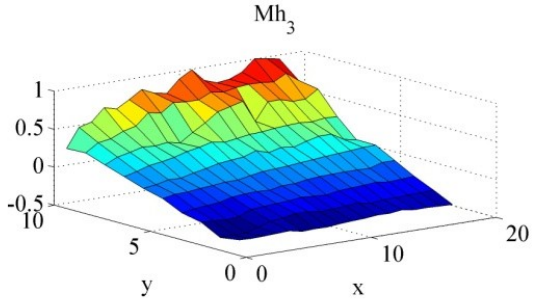

Mhz1
0.5
0
-0.5
-1
10
5
0
y
0
10
20
x

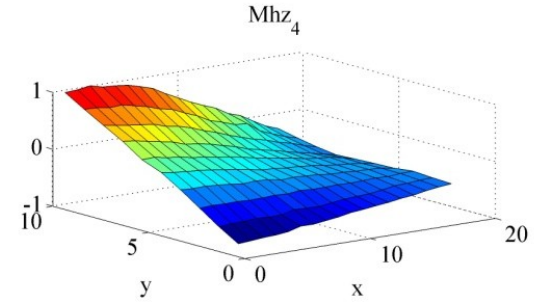

Mh1
0.5
0
-0.5
-1
10
5
0
y
0
10
20
x

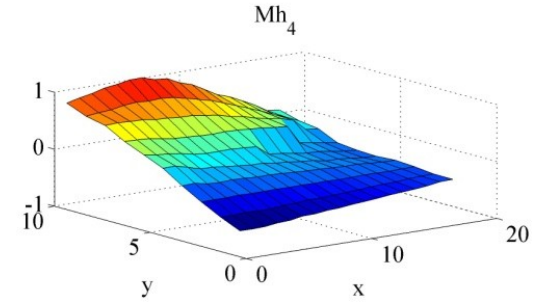

Mhz2
-0.5
-1
10
5
0
y
0
10
20
x

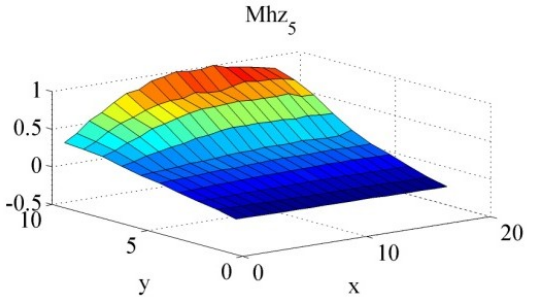

Mh2
0
-0.5
-1
10
5
0
y
0
10
20
x

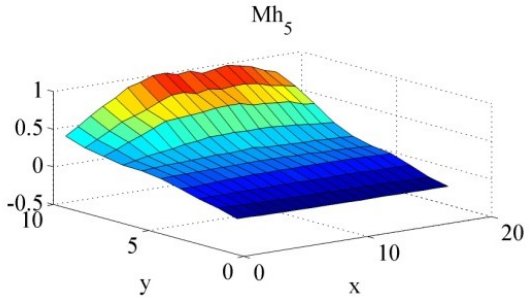

Mhz3
1
0.5
0
-0.5
10
5
0
y
0
10
20
x

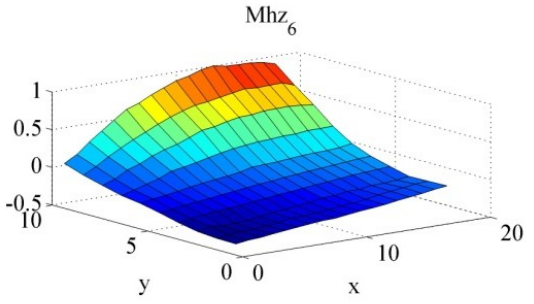

Mh3
1
0.5
0
-0.5
10
5
0
y
0
10
20
x

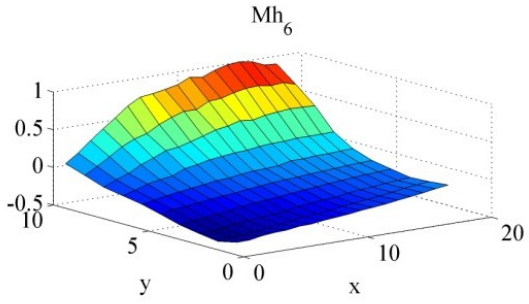

Mhz4
1
0
-1
10
5
0
y
0
10
20
x

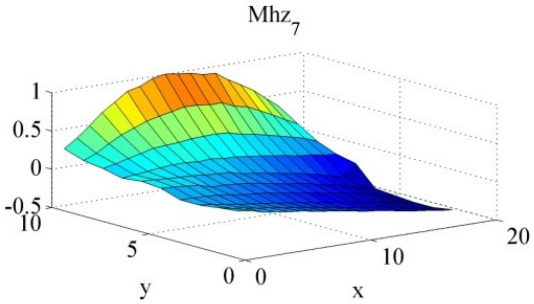

Mh4
1
0
-1
10
5
0
y
0
10
20
x

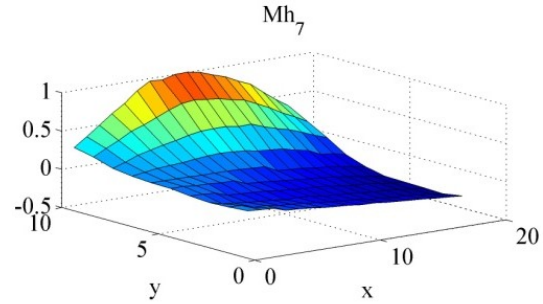

Mhz5
1
0.5
0
-0.5
10
5
y
0
0
10
20
x

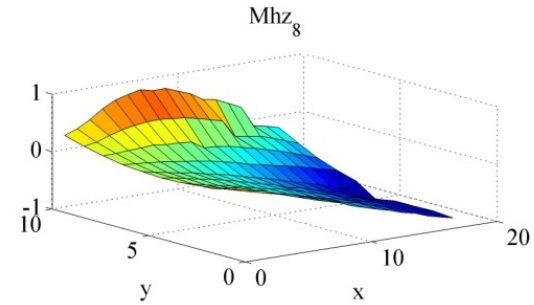

Mh5
1
0.5
0
-0.5
10
5
y
0
0
10
20
x

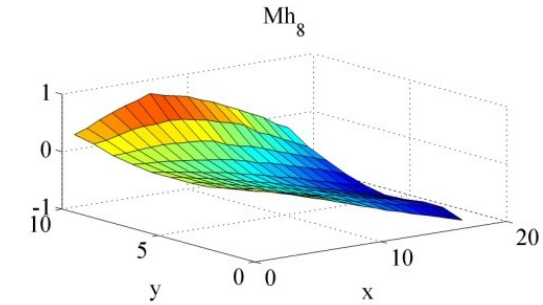

Mhz6
1
0.5
0
-0.5
10
5
y
0
0
10
20
x

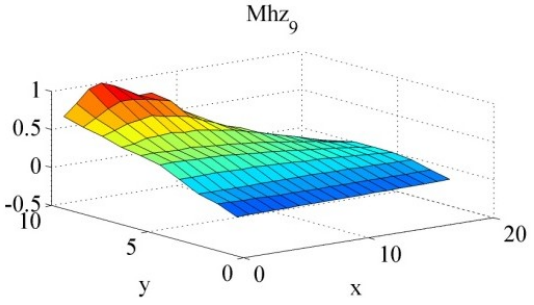

Mh6
1
0.5
0
-0.5
10
5
y
0
0
10
20
x

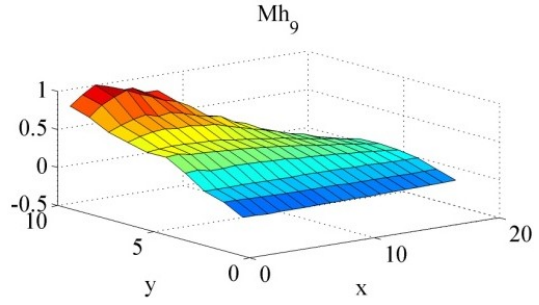

Mhz7
1
0.5
0
-0.5
10
5
y
0
0
10
20
x


Mh7
1
0.5
0
-0.5
10
5
y
0
0
10
20
x


Mhz8
1
0
-1
10
5
y
0
0
10
20
x


Mh8
1
0
-1
10
5
y
0
0
10
20
x


Mhz9
1
0.5
0
-0.5
10
5
y
0
0
10
20
x


Mh9
1
0.5
0
-0.5
10
5
y
0
0
10
20
x

100xMAC(Mhz,Mh)

	Mh								
	99.1947	36.3924	10.0667	08.6409	00.5876	28.2393	00.1609	00.0326	07.4533
	37.2431	**99.7270**	13.8689	01.7760	42.4843	01.0270	09.9815	07.4419	63.8742
	08.9017	09.7701	**97.8321**	23.1840	85.1826	87.2475	63.4577	04.2121	28.4432
	03.9833	01.5386	56.0689	**83.8963**	39.6447	46.5305	69.7193	38.6317	37.3741
Mhz	00.0041	43.4927	85.3624	09.8751	**98.9492**	61.0924	58.8510	00.2782	55.3298
	25.8212	00.0717	84.2445	23.9628	60.0396	**99.2164**	63.5759	11.4779	05.9073
	00.0350	19.3481	75.5699	32.0515	73.7389	65.2188	**94.2771**	24.6531	38.1535
	00.2595	09.5471	04.0944	55.3747	00.0286	07.5485	42.2316	**99.3292**	00.0020
	10.4767	62.6429	27.2050	13.3053	47.2227	05.8008	20.8994	00.1418	**99.1851**

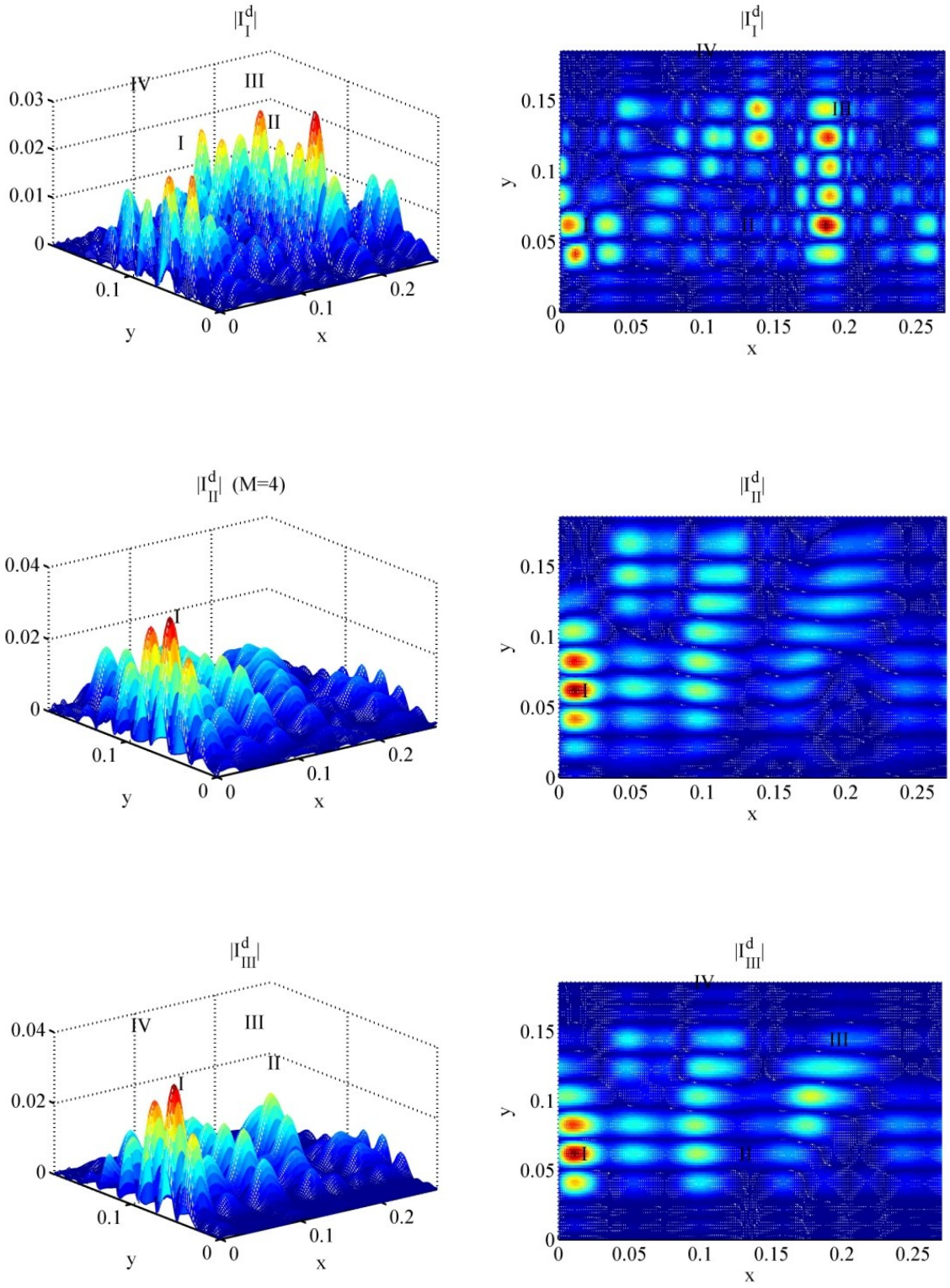
Şekil 3.66 Sac parçanın hasarlı (Mh) ve sağlıklı (Mhz) halde ilk dokuz mod şekli ve aralarındaki korelasyonu gösteren MAC matrisi.

FCF'lerden elde edilen titreşim modları Şekil 3.66'da gösterilmiştir. Mod şekillerinin benzerliğini ifade eden MAC matrisine bakıldığında köşegen elemanların genellikle 1'e çok yakın olduğu görülmektedir. Bu durum, plak deneyinde olduğu gibi (bkz. Şekil 3.48 ve ilgili açıklamalar), deneyin tekrarlanabilirlik şartını büyük ölçüde sağladığına işaret etmektedir. Diğer taraftan, köşegen dışı elemanların birçok halde %5'den fazla olması mod şekillerinin yakın aralıklı veya birbirini etkilemesiyle alakalıdır. Dolayısıyla, Şekil 3.66'daki verilere "ilgili doğal frekanslardaki titreşim modları" yerine "operasyonel şekil değiştirmeler"[1] demek daha doğru olabilir. Bu deneydeki FCF'lerden titreşim modlarını bağımsız bir şekilde elde etmek için gelişmiş bir parametre tahmin metodu kullanmak gerekir. Bununla birlikte, ODS verisi de hasar teşhisi amacıyla kullanılabilmektedir (Pai ve Young 2001). Dolayısıyla, doğrudan Şekil 3.66'daki verilerle hasar teşhisi üzerinde durulacaktır.

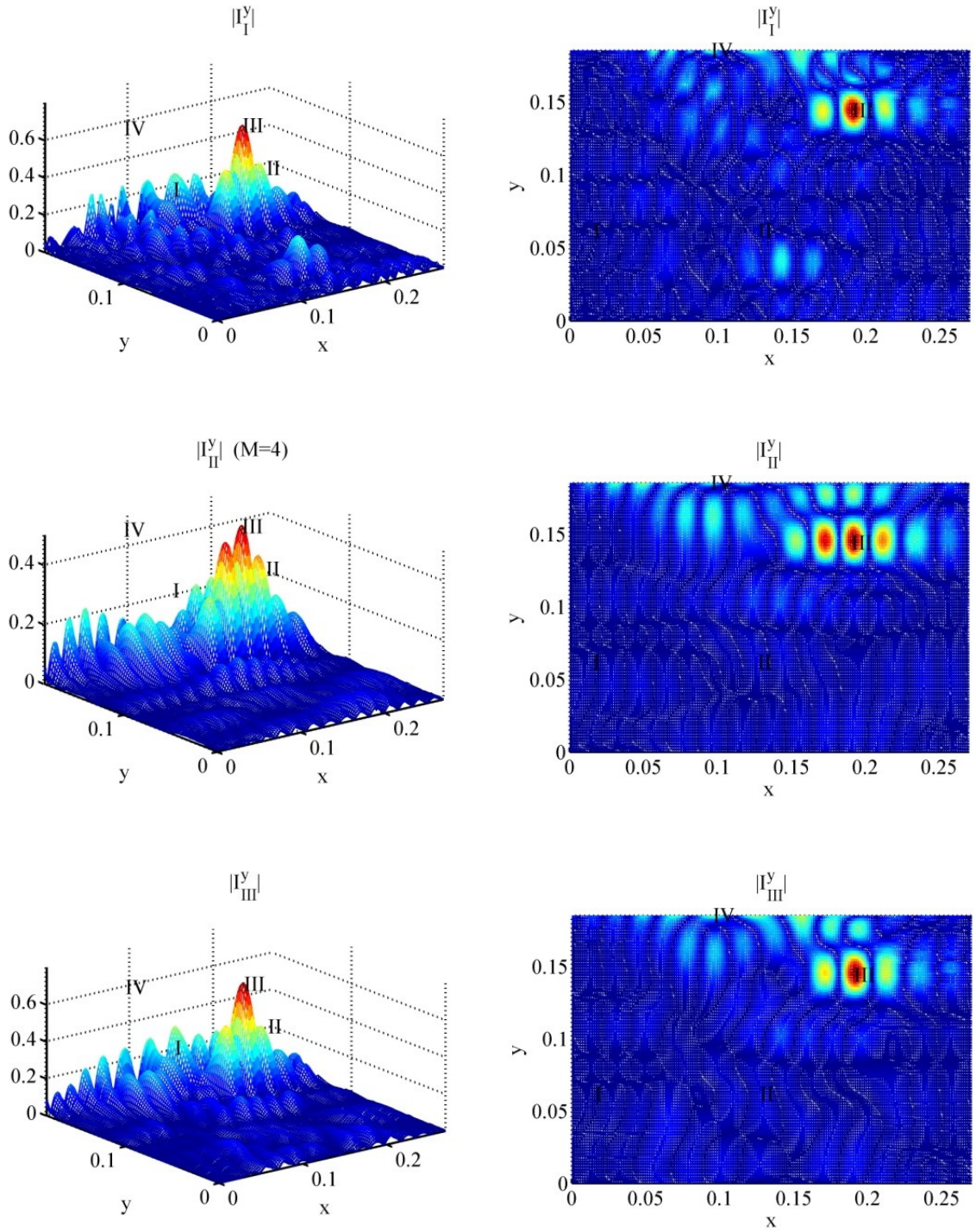
Seyrek aralıklı mod verileri yine kübik spline interpolasyonu ile 10 katına yoğunlaştırılmış, hasar indislerinin hesabında sym6 dalgacığı (ve I_{II} temelli indis için ADD'de sym14 dalgacığı) kullanılmıştır. Satır verileri sütun verilerinden daha fazla nokta sayısına sahip olduğundan, "y" üst simgeli indislerin hesabında s=20 ölçeği, "d"

[1] Operasyonel şekil değiştirme (*operational deflection shape, ODS*) belli bir frekansta tahrik edilen yapının o frekansta aldığı şekildir (Døssing 1988). Bu şekil doğal frekanslardaki titreşim modlarının süperpozisyonudur. Doğal frekansa çok yakın frekansta tahrik edilen yapıda ortaya çıkan ODS ilgili doğal frekanstaki titreşim moduna benzer. Dolayısıyla, karmaşık şekilli sac parça için Şekil 3.66'da gösterilen şekilleri "titreşim modu" olarak adlandırmaya devam edilecektir.

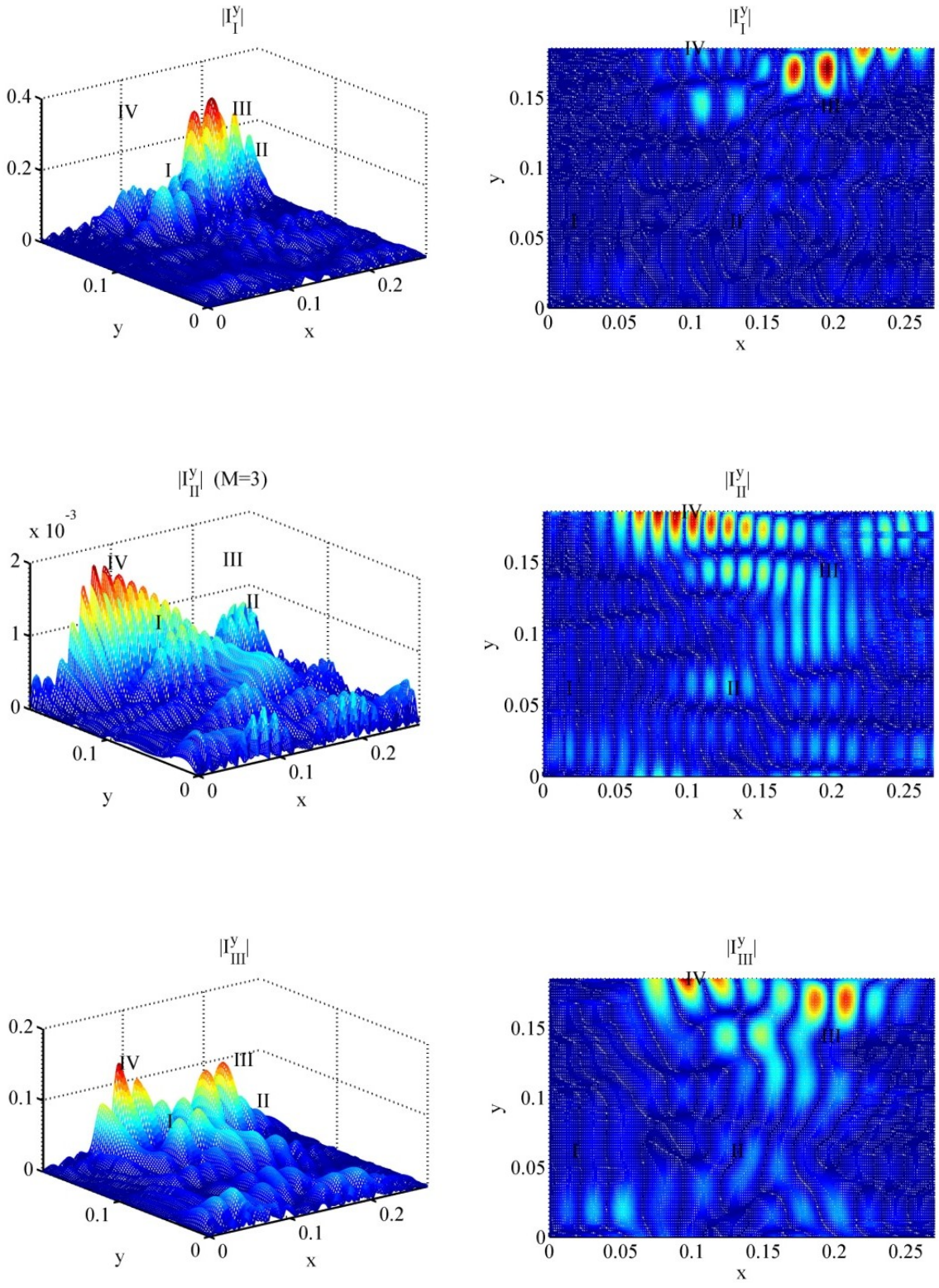
üst simgeliler için de s=10 ölçeği dikkate alınmıştır. Yapılan analizler sonucu ölçüm bölgesindeki dört hasardan sadece üç tanesinin sağlıklı bir şekilde belirlenebildiği görülmüştür (dolayısıyla sadece olumlu sonuçlara ait grafikler gösterilecektir). Burada ölçüt olarak en yüksek genliğin hasar yerinde olması göz önüne alınmıştır. Ölçüm bölgesinde hasar dışında bir süreksizlik bulunmamaktadır. Form değişimi de sadece y doğrultusundadır ve büyük bir radyüse sahiptir. Ayrıca, kullanılan ekipman sebebiyle örnekleme mesafesini daha fazla azaltmak zordur. Dolayısıyla, hasara duyarlı mod şekillerine ait indislerde en yüksek genliğin hasar yerlerinde olması beklenir. Bu düşünce ile mod şekilleri analiz edildiğinde, birinci mod şeklinin sütunlarının I nolu hasara duyarlı olduğu görülmüştür (Şekil 3.67a). Plak deneyindeki gibi I_I^d indisinin yine yeterli olmadığı görülmektedir. Fakat I_{III}^d indisine bakıldığında I civarındaki genliğin açık bir şekilde belirgin olduğu görülmektedir. I_{II}^d indisi de hasar etkisini güzel bir şekilde açığa çıkarabilmiştir (bu indis için uygun ayrışım düzeyinin M=4 olduğu tecrübe edilmiştir). 3. modun satır verilerinin III nolu hasara duyarlı olduğu görülmektedir (Şekil 3.67b). Bu kez I_I^y indisi de doğru sonuç vermiştir. Hatta bu indis grafiğinde II nolu hasar noktasına yakın bir yerde belirgin bir değişim vardır. Fakat hasar olmayan başka bir noktadaki daha yüksek genlik bu süreksizliğin sağlıklı bir şekilde belirlenmesini engellemektedir. Diğer indis grafikleri de III nolu çatlağın doğru bir şekilde belirlendiğini göstermektedir. c)'deki grafikler $-I_I^y$ hariç– IV nolu çatlak konumunda en yüksek genliğin oluştuğunu göstermektedir. I_{III}^y grafiğinde III nolu hasarın az yukarısında da önemli genliğin bulunması yanıltıcı görünmektedir. Fakat I_{II}^y 'de bu tür olumsuz değişim I_{III}^y 'e nazaran daha azdır. Sonuç olarak, IV'ün de sağlıklı bir şekilde belirlenebildiği söylenebilir.



a) 1. mod şekli ile hesaplanan indisler. (ölçek s=10, dalgacık sym6)



b) 3. mod şekli ile hesaplanan indisler. (ölçek s=20, dalgacık sym6)



c) 8. mod şekli ile hesaplanan indisler. (ölçek s=20, dalgacık sym6)

Şekil 3.67 Karmaşık şekilli sac parçanın deneysel mod şekilleri için hasar indisleri.

Bu başlık altında yapılan çalışmalardan çıkan sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Bu çalışmada öne sürülen I_{II} temelli indisin performansını sayısal veri ile değerlendirmek üzere tek bir doğrultuda form değişimi olan bir sac parça dikkate alınmıştır. Bu durumda her satır verisinin spektrum genişliğinin aynı olduğu gözlenmiştir. Dolayısıyla, her satır için I_{II} indisi hesaplanırken aynı ADD ayrışım düzeyi kullanılmıştır. Fakat gerçekte her iki doğrultuda keyfi değişim olabilir. Bu durumda satırlar için uygun ayrışım düzeyleri farklı olabilir.
- Parçadaki form değişimlerinin etkisi SDD katsayılarında ortaya çıkmıştır. Bu durum I_{II} ve I_{III} temelli indislerde hasar kaynaklı süreksizlikleri belirlemeyi zorlaştırmıştır. I_I ile ilgili indisler (I_I^y ve I_I^d) sağlıklı ve hasarlı yapının titreşim modları farkına dayandığından, çıkarma işlemi sırasında hasar dışı etkilerin SDD katsayıları birbirini götürmüştür. Dolayısıyla, teorik olarak, hasara en duyarlı indis budur.
- Sayısal uygulamalarda en iyi sonuç I_I temelli indisle elde edilmiştir. Fakat kullanılan ekipman deneysel modların bu derece doğru ölçülmesi için yeterli değildir. Dolayısıyla, Şekil 3.67'den görüldüğü gibi, I_I temelli indisler çoğu durumda yetersiz kalmıştır.
- I_{II} ve I_{III} temelli indislerde en yüksek genliğin çatlak civarında olması için form değişiminden kaynaklanan katsayı genliklerinin bundan az olması gerekir. Mod şeklinin hasara duyarlılığı hasar yeri ve derecesine bağlı olduğundan, her titreşim modu ile hasar etkisinin belirlenememesi normaldir. Ayrıca, bir deneyle tüm modlar aynı doğrulukta ölçülemeyebilir. Örneğin, güncel bir çalışmada (Qiao ve ark. 2007), LDV ekipmanı kullanılmasına rağmen, kompozit plağın ilk beş titreşim modundan ilk ikisi yeterli doğrulukta ölçülemediği gerekçesi ile sonraki analizlerde kullanılmamıştır.

SONUÇ

Bu çalışmada kiriş, düzlem plak, karmaşık şekilli sac parça gibi farklı geometrili yapıların titreşim modlarını DD ile analiz ederek hasar teşhisi üzerinde çalışılmıştır. Konuyla ilgili literatürde titreşim modlarının doğrudan DD katsayıları ile ya da sağlıklı haldeki mod şekli gibi bir referansa ait katsayıların bunlardan çıkarılması ile hasar teşhisi şeklinde iki yaklaşımın kullanıldığı görülmektedir. Bunlardan ilkinin daha çok tercih edildiği anlaşılmaktadır. Çünkü referans veriyi elde etmek zordur; her yapı için mevcut olmayabilir. Hasar titreşim modunun genel biçimini değiştirmeden lokal süreksizliğe sebep olur. Bu durumda sağlıklı ve hasarlı haldeki mod şekillerinin birbirine benzemesi beklenir. Bu iki verinin DD katsayıları farkı, özellikle hasar derecesi küçük olduğunda, tekilliklere birinci yaklaşımdan daha duyarlıdırlar. Ayrıca, yüksek mertebeden titreşim modları –ki bunların hasar hakkında daha fazla bilgiye sahip olduğu bilinmektedir– yüksek dereceli polinomlarla korelasyonlu olduğundan, doğrudan böyle bir verinin DD katsayılarından hasar bilgisi elde etmek için N_{VM} değeri yüksek dalgacık kullanmak gerektiği bilinmektedir. N_{VM} arttıkça dalgacık verideki polinom türü bileşenleri daha çok bastırır ve sürekliliklere duyarlılığı artar. Fakat konum eksenindeki lokalizasyonu azaldığından hasar yerini belirlemedeki hata miktarı da artar. Ek olarak, yüksek N_{VM} verideki parazit bileşenlerini ve sınırlardaki bozulmaları da güçlendirdiğinden aşırı N_{VM}'lerden kaçınılması tavsiye edilmektedir. Bu durumda, sadece hasarlı haldeki veriyi kullanmakla birlikte süreksizliklere duyarlılığı daha yüksek bir indise ihtiyaç duyulduğu anlaşılmaktadır. Tez kapsamında bu amaca yönelik çalışılmış ve I_{II} ile gösterilen yeni bir indis geliştirilmiştir.

I_{II} *indisinin esası; hasarlı haldeki titreşim modunu ADD'nin çok-çözünürlüklü analiz özelliğinden yararlanarak yaklaşım ve ayrıntı fonksiyonlarına ayrıştırmak, uygun bir dalgacık ve ayrışım düzeyi ile elde edilen yaklaşım fonksiyonunu sağlıklı haldeki titreşim modu yerine kullanmaktır*. Uygun yaklaşım fonksiyonu form olarak, hasarsız haldeki titreşim modu gibi, hasarlı haldeki veri ile uyumlu olmalı ve tekillik kaynaklı bileşenlerden arınmış olmalıdır. Bu iki şartı sağlayan yaklaşım fonksiyonunu elde etmek üzere bu çalışmada iki aşamalı bir yöntem sunulmuştur.

Birinci aşamada veri, uçlarındaki bozulmayı azaltmak üzere genişletilir. SDD $\pm\infty$ aralığında tanımlı bir işlem olmasına rağmen pratikte kullanılan veriler, örneğin bir titreşim modu, sınırlı uzunluktadır. Dolayısıyla, en genel halde veri uçlarındaki tüm türevler süreksizdir. DD bu tür süreksizliklere duyarlıdır; uçlardaki bozulma azaltılmazsa en yüksek genlikli SDD katsayıları buralarda olacaktır. Bu durum hasar teşhisini zorlaştırdığı gibi ADD ile elde edilen yaklaşım fonksiyonunun mod verisine benzerliğini de önemli derecede azaltır. Bu sorunu gidermek üzere mod şekli en küçük kareler anlamında en uygun polinom uydurma yaklaşımı ile genişletilmiştir. Çünkü titreşim modları polinom benzeri verilerdir, bu durumda genişletme fonksiyonunun da polinom olması doğru bir tercihtir. Bozulma üzerinde iki parametrenin etkili olduğu gözlenmiştir: Birincisi polinomun derecesi, ikincisi de eğri uydurma sırasında kullanılan veri noktalarının sayısı. Bu çalışmada, genişletme polinomunun derecesinin seçilen dalgacığın N_{VM} değerinden bir eksiğine eşit olması ($P_d=N_{VM}-1$) önerilmiştir. Çünkü N_{VM} adet sıfıra eşit momenti olan bir dalgacık en fazla N_{VM}-1. mertebeye kadarki polinomlara dik (ortogonal) olur. Başka bir deyişle, bu mertebeye kadarki türev süreksizliklerini algılayabilir. $P_d<N_{VM}-1$ halinde bazı türevlerde süreksizlik olduğundan bozulmaların arttığı gözlenmiştir. $P_d>N_{VM}-1$ durumunda bozulmanın artması ortogonallik şartının sağlanmamasından ileri gelir. Öte yandan, bozulma, veri uçlarına yakın belli bir bölgeyi ilgilendirir. Bu bölgenin genişliği seçilen dalgacık fonkiyonunun filtre uzunluğuna ve genişletme işleminin gerçekleştirildiği ölçeğe bağlıdır. Şu halde tüm veriyi en iyi temsil eden polinomun bozulmayı da en az yapması beklenemez. Polinom uydururken kullanılması gereken nokta sayısı ile ilgili kesin bir değer söylemek zor olmakla birlikte bunun genişletme ölçeği ile orantılı arttığı gözlenmiştir. Bozulma veri uçlarına yakın bir bölgeyi ilgilendirdiğinden ve bu bölgenin genişliği ölçekle arttığından eğri uydurmada kullanılması gereken nokta sayısının da artması normaldir. Metot uygulanırken belli bir polinom derecesi için eğri uydurmada kullanılan nokta sayısı birer birer arttırılmış, her defasında bozulma hesaplanıp bunların içinden bozulmayı en az yapan nokta sayısı seçilmiş, genişletme bu kadar veri noktası kullanılıp polinom uydurmak suretiyle yapılmıştır. Bozulma fonksiyonu sürekli değerler aldığından (sıçrama vs süreksizlik gözlenmediğinden) genişletme sürecini hızlandırmak için bazı hallerde nokta sayısı veri yoğunluğuna göre ikişer ikişer, dörder dörder vs arttırılmıştır. Genişletme metodunun performansı diğer sıkça kullanılan metotlarla da

karşılaştırılmıştır. Bu sırada farklı sınır şartları, veriye parazit karışması ve deneysel veri gibi durumlar dikkate alınmıştır. Yöntemlerin optimum çözüme ne kadar yakın sonuç verdiğini görmek için bozulma fonksiyonunu amaç fonksiyonu, genişletme polinomlarının katsayılarını da tasarım değişkenleri olarak kabul eden bir optimizasyon problemi çözülerek minimum bozulmayı veren polinom katsayıları elde edilmiştir. Optimizasyon probleminin çözümünde lokal minimuma yakalanma riskinden kaçınmak amacıyla bir global optimizasyon metodu kullanılmıştır. Analizler sonunda, bu çalışmada önerilen polinomla genişletme yaklaşımının her durumda optimum çözüme en yakın sonucu verdiği görülmüştür. Çoğu durumda optimum çözüm ve polinomla genişletme arasındaki farkın ihmal edilebilir düzeyde olduğu gözlenmiştir. Böylece, polinomla genişletme yaklaşımının ilave bir optimizasyon sürecine ihtiyaç bırakmayacak kadar iyi sonuç verdiği anlaşılmıştır.

İkinci aşamada, polinom uydurarak genişletilen veri ADD ile çeşitli düzeylerde yaklaşım ve ayrıntı fonksiyonlarına ayrıştırılır. Yaklaşım fonksiyonu mod şeklinin düzgün (*smooth*) kısmını, ayrıntılar süreksizlik kaynaklı tekilliklerin de içinde yer aldığı yüksek frekanslı bileşenleri içerirler. Bu çalışmada ADD için *symmlet* dalgacıkları kullanılmıştır. Bunlar belli bir N_{VM} için en kısa filtre uzunluğuna sahip dalgacıklardandır. Dolayısıyla konum eksenindeki lokalizasyonları iyidir. ADD işleminde bu dalgacıklardan N_{VM} değeri yüksek olanların kullanılması gerektiği anlaşılmıştır. Çünkü bilindiği gibi N_{VM} arttıkça dalgacığın veri sıkıştırma kabiliyeti artar. Bunun mevcut uygulamadaki sonucu, belli bir ADD ayrışım düzeyinde yaklaşım fonksiyonu ve orijinal veri arasındaki korelasyonların N_{VM} ile artmasıdır. Geliştirilmek istenen I_{II} indisinde uygun yaklaşım fonksiyonu ve orijinal veri arasındaki şekil benzerliğinin azami derecede olması istenmekteydi. ADD işleminde yüksek N_{VM}'li dalgacık kullanmanın bu amaca hizmet ettiği görülmüştür. Bununla birlikte, belli bir N_{VM}'den sonra korelasyonlardaki artışın ihmal edilebilir düzeyde olduğu gözlenmiştir. Çok sayıda veri ile yapılan analizlerle kazanılan tecrübeye dayanarak, ADD'de kullanılacak dalgacığın N_{VM}'sinin [10,20] aralığında olması tavsiye edilmiştir (örneğin bu çalışmadaki tüm analizlerde sym14 dalgacığının yeterli olduğu görülmüştür, başka çalışmalarda sym15 (Gökdağ ve Kopmaz 2009, Gökdağ 2010) ve sym20 (Gökdağ ve Kopmaz 2010) dalgacıkları ile de uygun sonuçlar elde edilmiştir). Daha yüksek N_{VM}

işlem zamanı ve hatası açısından olumsuzluk arz ettiğinden dikkate alınmamıştır. ADD için kullanılacak dalgacığın N_{VM}'si belirlendikten sonra, hangi düzeydeki yaklaşım fonksiyonunun uygun olduğuna karar verilmiştir. Bunun için yaklaşım fonksiyonu (A_M) ile hasarlı haldeki orijinal veri (M_h) arasındaki korelasyonlar ile yaklaşım enerji oranının (E_A) ADD ayrışım düzeyi (M) ile değişimi incelenmiştir. M arttıkça veriden ayrılan yüksek frekanslı bileşenlerin enerjisi artar. Bu durumda korelasyon indislerinde ve E_A'da azalma görülür. En uygun düzeyin bu indislerdeki en fazla düşüşün görüldüğü düzeyden bir önceki olduğu anlaşılmıştır. Çünkü bu düzeyde $MAC(A_M,M_h)$ hâlâ yeterince yüksek ve A_M'deki yüksek frekanslı bileşenler yeterince ayıklanmıştır. Veriye parazit karışması durumunda $MAC(A'_M,M'_h)$ ve $MAC(A''_M,M''_h)$ indislerinin gelişigüzel davrandığı gözlenmiştir. Dolayısıyla, uygun düzeyi belirlemede en çok $MAC(A_M,M_h)$ ve E_A yardımcı olmuştur. A_M ve M_{hz} arasındaki korelasyonlar, M_{hz} mevcut olmadığı zaman –ki olsa mevcut yöntemi uygulamaya da gerek kalmaz– anlamlı değildirler; bu çalışmada bunlara yer verilmesinin nedeni önerilen yöntemle bulunan A_M'nin M_{hz} ile uyumuna dikkat çekmektir. Uygun ayrışım düzeyinin mod şeklinin frekans spektrumuna bağlı olduğu da gözlenmiştir: Yüksek mertebeden titreşim modları daha fazla salınımlı olduğundan bunların spektrumu daha geniştir. Dolayısıyla, daha erken bir düzeyde A_M'den titreşim modunun şeklini belirleyen temel bileşenler ayıklanır. Özetle, ADD'de N_{VM}'si yeterince yüksek bir dalgacık kullanmak yaklaşım fonksiyonunun orijinal veri ile benzerliğini arttırmış, yeterince yüksek bir ayrışım düzeyi de yaklaşım fonksiyonunun tekilliklerden gerektiği kadar arınmasını sağlamıştır. Daha sonra, uygun yaklaşım fonksiyonu ve hasarlı verinin SDD katsayıları farkı ile I_{II} indisi tanımlanmıştır. Geliştirilen I_{II} indisi ile klasik yaklaşımları temsil eden I_I ve I_{III} iki boyutlu yapıların titreşim modlarına uyarlanarak üst "y" ve "d" simgeli indisler elde edilmiştir. I_{II}^y ve I_{II}^d hesaplanırken her satır/sütun verisi için aynı ADD ayrışım düzeyinin dikkate alınması gerektiği izah edilmiştir. Fakat karmaşık şekilli sac parçada, en genel halde, her iki doğrultuda form değişimi olacağından her satır/sütun için uygun ADD ayrışım düzeyinin farklı olabileceği belirtilmiştir.

Sayısal analizlerde, tek boyutlu veri için I_I ve I_{II} indisinin, özellikle hasar derecesi küçük iken, birbiriyle uyumlu ve hasara I_{III}'den daha duyarlı olduğu gözlenmiştir. Hasar derecesinin I_{III} ile belirlenebilecek derecede yüksek olduğu durumda üç indisin görsel

olarak birbirine çok benzediği görülmüştür. Fakat karmaşık şekilli sac parça halinde en iyi sonuç her durumda I_I ile elde edilmiştir. I_{II} ve I_{III} grafiklerinde parçadaki form değişiminden kaynaklanan yüksek genlikler de bulunduğu halde I_I'de sıfırdan farklı genlikler sadece hasar yeri civarındadır. Öte yandan, bu halde performans bakımından I_{II}'nin I_{III}'den biraz iyi olduğu gözlenmiştir. Çünkü yüksek N_{VM}'li dalgacıkların veri sıkıştırma özelliği yaklaşım fonksiyonunda parçadaki form değişimi ile alakalı yapısal bileşenlerin bir kısmının bulunmasını sağlarmıştır. Böylece, hasarlı veri ve yaklaşımın SDD katsayıları farkı hesaplanırken bunlar kısmen birbirini götürmüş, bu durum "hasar yerindeki genlik/hasar yeri dışındaki en yüksek genlik" oranının I_{II} indisinde daha fazla olmasını sağlamıştır. Dolayısıyla, parçadaki form değişiminden kaynaklanan genlikler I_{II}'de de olmasına rağmen I_{III}'dekinden daha azdır. Düzlem plağın titreşim modları ile yapılan analizlerde I_I ve I_{II} indislerinde N_{VM}'si nispeten küçük dalgacıkların da kullanılabileceği gösterilmiştir. I_{III}'de sadece hasarlı haldeki veri kullanıldığından, özellikle yüksek mertebeden titreşim modları için N_{VM}'si yüksek dalgacık kullanmak gerekmektedir. Fakat I_I ve I_{II}'de SDD katsayıları farkı hesaplandığından hasar dışı değişimlere ait bileşenler birbirini götürmekte, tekillik etkisi daha belirgin olmaktadır.

Deneysel uygulamalarda I_I'in –özellikle kiriş ve karmaşık şekilli sac parça deneylerinde– diğerlerinden hatalı sonuç verdiği gözlenmiştir. Bu durum kullanılan ekipmanın ve mod şekli belirlemede tercih edilen yaklaşımın (*quadrature picking* yöntemi) hasar teşhisi açısından yeterli olmayışındandır. I_I indisinin sadece hasar kaynaklı değişimlere duyarlı olması için parazitin daha az olması gerekir. Sağlıklı ve hasarlı haldeki verilere karışan parazitlere ait SDD katsayıları çıkarma sırasında birbirini götürmek yerine güçlendirmiştir. Dolayısıyla, aynı veri için I_I'in diğer indislerden hatalı sonuç vermesi bundandır. Plak deneyinde hasar derecesi biraz fazla olduğundan I_I de kabul edilebilir sonuçlar vermiştir. Kiriş deneyinde I_{II} ve I_{III} grafiklerinin birbirine benzediği gözlenmiştir. Fakat I_{II}'de parazit kaynaklı katsayıların daha belirgin olduğu görülmüştür. Bu durum I_{II}'nin aşırı parazitten olumsuz etkilendiğini göstermektedir. Bununla birlikte I_{III}'de ortaya çıkan hasar etkilerinin hepsi I_{II}'de de görünmüştür. Plak ve sac parça deneylerinde de bu iki indis uyumlu sonuçlar vermiştir.

Deneylerde çelik esaslı hafif sönümlü malzemeler kullanılmıştır. Fakat karmaşık şekilli sac parçada form değişiminden ötürü sönüm biraz daha fazladır. Dolayısıyla, bu parça ile ilgili deneyde eksponensiyel pencere sabiti biraz daha hassas hesaplanmıştır. Kiriş deneyinde sayısal ve deneysel modların gayet uyumlu olduğu görülmüştür. Bu durum, hafif sönüme ek olarak, titreşim modlarının bu parça için yeterince ayrık olmasındandır (bu halde *peak picking* yöntemi uygun sonuç verir). Düzlem plak deneyinde 0-100Hz arasında 5 tane, karmaşık şekilli sacda da 9 adet elastik mod şekli tespit edilmiştir. Dolayısıyla, sac parçada, genel olarak, titreşim modları daha yakın aralıklıdır ve modların birbiri ile etkileşimi daha fazladır. Bu durum hasarlı ve sağlıklı haldeki deneysel modlar arasındaki korelasyonu ifade eden MAC matrislerinden de anlaşılmaktadır. Mod şekillerinin böyle birbiri ile fazla etkileşmesi bunların hasara duyarlılıklarını olumsuz etkileyebilir.

Deneylerde ölçülen bazı mod şekillerinin hasar teşhisi açısından uygun olmayışı fazla parazitin yanı sıra ilgili modların hasara duyarsızlığı ile de alakalıdır. Buna rağmen, plak deneyindeki hasar yeri ve sac parçadaki dört hasardan üç tanesi sağlıklı bir şekilde tespit edilebilmiştir. Daha yüksek doğal frekanslardaki mod şekilleri ölçülebilseydi, büyük ihtimalle dördüncü hasar yeri de belirlenebilirdi. Bu arada, özellikle düzlem plak ve sac parça deneylerindeki hasar derecelerinin nispeten yüksek olması, kullanılan ekipman ve mod belirleme yönteminin yetersizliği düşünülerek alınmış önlem gereğidir. Yayımlanmış çalışmalara bakıldığında (Rucka ve Wilde 2006b, Qiao ve ark. 2007) hasar derecelerinin buradaki gibi yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Zaten bu konudaki çalışmalarda mod şekillerini DD ile analiz ederek hasar teşhisinden pratik fayda sağlamak için bunların yüksek çözünürlük ve doğrulukta ölçülmesi gerektiği bildirilmektedir. Ancak o zaman daha küçük dereceli hasarları belirlemek mümkün olur. Bunun için ölçümlerin LDV gibi modern yöntemlerle yapılması salık verilmektedir (Zhong ve Oyadiji 2007, Loutridis ve ark 2004). LDV teknolojisi ile yapıya temas etmeden[1] yüksek konumsal çözünürlükte[2] mod şekli veya ODS elde etmek mümkündür. Böyle bir veriyi buradaki gibi nokta nokta FCF ölçerek

[1] Bu şekilde ölçme elemanının yapıyla temasının sebep olduğu olumsuzluktan kaçınmak mümkündür.
[2] Konumsal çözünürlüğün 8 nanometreye kadar inebildiği ifade edilmektedir (Castellini ve ark. 2006). Bu durumda, bu çalışmadaki sayısal veriler gibi, yaklaşık 1mm konumsal çözünürlüklü veriler kolayca elde edilebilir.

elde etmek zaman ve veriya karışan parazit açısından uygun değildir. Bu sebeple sürekli tarama esaslı (*Continuously Scanning LDV*- CSLDV) ODS ve titreşim modu ölçme yöntemleri geliştirilmiştir. Böylece, karmaşık şekilli sac parça türü yapıların ODS'si polinomlar gibi düzgün (*smooth*) bir şekilde ve bir iki dakika gibi kısa bir sürede ölçülebilmektedir (Stanbridge ve ark 2004). Fakat söz konusu yaklaşım ölçüm bölgesinde yarık, delik gibi süreksizliklerin olmamasını gerektirir. Dolayısıyla, çatlak türü hasar halinde bu veri hasar teşhisi amacıyla kullanılamayabilir. Başka bir çalışmada, yapıda form değişimlerinin fazla olduğu bölgelerde yüksek çözünürlük sağlayacak şekilde ölçüm yaparak mod şekillerinin belirlenebildiği bilinmektedir. Bu verinin hasar teşhisi amacıyla da kullanılabildiği ifade edilmiştir (Brehmer ve Sinapus 2004). Sonuç olarak, bu çalışmadaki sayısal verilerin benzerini pratik olarak ölçmek ve böylece, geliştirilen I_{II} indisinden hasar teşhisi uygulamalarında faydalanmak mümkün görünmektedir.

KAYNAKLAR

ADDISON, P.S. 2002. The Illustrated Wavelet Transform Handbook: Introductory Theory and Applications in Science, Engineering, Medicine and Finance. IOP Publishing Ltd, Bristol, 362 p.

ALVANDI A., C. CREMONA. 2006. Assesment of Vibration-Based Damage Identification Techniques. Journal of Sound and Vibration, 292: 179-202.

ANONİM. 1997. The Fundamentals of Modal Testing. Hewlett Packard Application Notes Series 243-3, USA, 55 p.

ANONİM. 2005. Basics of Modal Testing and Analysis. TN-DSA-003, LDS Test and Measurement Ltd, UK, 12 p. (http://www.svcommunity.com/?cmd=download-item&di=28, erişim tarihi 03.06.2010)

ARI, N., Ş. ÖZEN, Ö.H. ÇOLAK. 2008. Dalgacık Teorisi. Palme Yayıncılık, Ankara, 142 s.

ATAŞİMŞEK, S. 1977. Sac Kalıpları. Bursa, 788 s.

BASU, B. 2005. Identification of Stiffness Degradation in Structures Using Wavelet Analysis. Construction and Building Materials, 19: 713-21.

BREHMER, A., M. SINAPUS. 2004. Measurement of Real Normal Modes With Adapted Resolution By Means of A Continuously Scanning Laser Vibrometer. Mechanical Systems and Signal Processing, 18: 1203-1218.

CASTELLINI, P., M. Martarelli, E.P. Tomasini. 2006. Laser Doppler Vibrometry: Development of Advanced Solutions Answering to Technology's Needs. Mechanical Systems and Signal Processing, 20:1265-1285.

CASTRO, E., M.T. GARCIA-HERNANDEZ, A. GALLEGO. 2006a. Defect Identification in Rods Subject to Forced Vibrations Using The Spatial Wavelet Transform. Applied Acoustics, 68: 699-715.

CASTRO, E., M.T. GARCIA-HERNANDEZ, A. GALLEGO. 2006b. Damage Detection in Rods by Means of Wavelet Analysis of Vibrations: Influence of The Mode Order. Journal of Sound and Vibration, 296: 1028-38.

ČERNÁ, D., V. FINĚK. 2004. On The Computation of Scaling Coefficients of Daubechies' Wavelets. Central European Journal of Mathematics, 2(3): 399-419.

CHANG, C-C., L-W. CHEN. 2003. Vibration Damage Detection of a Timoshenko Beam by Spatial Wavelet Based Approach. Applied Acoustics, 64: 1217-1240.

CHANG, C-C., L-W. CHEN. 2004. Damage Detection of Cracked Thick Rotating Blades by A Spatial Wavelet Based Approach. Applied Acoustics, 65: 1095-1111.

CHANG, C-C., L-W. CHEN. 2005. Detection of The Location and Size of Cracks in The Multiple Cracked Beam by Spatial Wavelet Based Approach. Mechanical Systems and Signal Processing, 19: 139-155.

CHONDROS, T.G., A.D. DIMARAGONAS. 1980. Identification of Cracks in Welded Joints of Complex Structures. Journal of Sound and Vibration, 69(4): 531-38.

CHOU, J-H., J. GHABOUSSI. 2001. Genetic Algorithm in Structural Damage Detection. Computers & Structures, 79(14): 1335-1353.

DAUBECHIES, I. 1988. Orthonormal Bases of Compactly Supported Wavelets. Communications on Pure and Applied Mathematics, XLI: 909-996.

DAUBECHIES, I. 1992. Ten Lectures on Wavelets. SIAM, Philadelphia, 351p.

DEBNATH, L. 2002. Wavelet Transforms and Their Applications, Birkhäuser, Boston, 575p.

DOEBLING, S.W., C.R. FARRAR, M.B. PRIME, D.W. SHEVITZ. 1996. Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems From Changes in their Vibration Characteristics: A Literature Review. Rep. LA-13070-MS, UC-900, Los Alamos National Laboratory, USA.

DØSSING, O. 1988. Structural Testing Part 1: Mechanical Mobility Measurements. Brüel&Kjaer Application Note. Denmark. 48 p.

DOUKA, E., S. LOUTRIDIS, A. TROCHIDIS. 2003. Crack Identification in Beams Using Wavelet Analysis. International Journal of Solids and Structures, 40: 3557-3569.

DOUKA, E., S. LOUTRIDIS, A. TROCHIDIS. 2004. Crack Identification in Plates Using Wavelet Analysis. Journal of Sound and Vibration, 270: 279-295.

DUAN, Q.Y., V.K. GUPTA, S. SOROOSHIAN. 1993. Shuffled Complex Evolution Approach for Effective and Efficient Global Minimization. Journal of Optimization Theory and Applications, 76: 501-521.

EWINS, D.J. 2000. Modal Testing: Theory, Practice and Application. Research Studies Press, USA, 562 p.

FARRAR, C.R., G.H. JAMES. 1997. System Identification from Ambient Vibration Measurements On A Bridge. Journal of Sound and Vibration, 205 (1): 1–18.

FAN, W., P. QIAO. 2009. A 2-D Continuous Wavelet Transform of Mode Shape Data for Damage Detection of Plate Structures. International Journal of Solids and Structures, 46:4379-4395.

GADE, S., H. HERLUFSEN, H.K. HANSEN. 1999. How to Determine the Modal Parameters of Simple Structures. Brüel&Kjaer Application Note B00428. Denmark. 8p.

GENTILE, A., A. MESSINA. 2003. On the Continuous Wavelet Transform Applied to Discrete Vibrational Data for Detecting Open Cracks in Damaged Beams. International Journal of Solids and Structures, 40: 295-315.

GÖKDAĞ, H., O. KOPMAZ. 2008. Açık Kesitli Bir Kirişte Sürekli Dalgacık Dönüşümü İle Yapısal Hasar Teşhisi. Mühendislik Bilimleri Dergisi (Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fak.), 14(1): 1-9.

GÖKDAĞ, H., O. KOPMAZ. 2009. A New Damage Detection Approach for Beam-Type Structures Based on The Combination of Continuous and Discrete Wavelet Transforms. Journal of Sound and Vibration, 324: 1158-1180.

GÖKDAĞ, H., O. KOPMAZ. 2010. A New Structural Damage Detection Index Based on Analyzing Vibration Modes by the Wavelet Transform. Structural Engineering and Mechanics, 35(2): 257-260.

GÖKDAĞ, H. 2010. Wavelet-Based Damage Detection Method for Beam-Like Structures. Gazi University Journal of Science, 23(3): 339-349.

GÖREN, B., S. ERİM. 2000. Değişken Kesitli Ankastre Timoshenko Kirişin Statik Stabilite Analizi. Fen ve Mühendislik Dergisi (Dokuzeylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi), 2(2): 75-86.

HE, J., Z-F. FU. 2001. Modal Analysis. Butterworth-Heinemann, Oxford, 291 p.

HELLIER, C.J. 2003. Handbook of Nondestructive Evaluation. McGraw-Hill Comp. Inc. USA, 593 p.

HONG, J.C., Y.Y. KIM, H.C. LEE, Y.W. LEE. 2002. Damage Detection Using The Lipschitz Exponent Estimated by The Wavelet Transform: Applications to Vibration Modes of A Beam. International Journal of Solids and Structures, 39: 1803-1816.

HOU, Z., M. NOORI, R.S.T. AMAND. 2000. Wavelet-Based Approach For Structural Damage Detection. ASCE Journal of Engineering Mechanics, 126(7): 677-683.

KIM, B.H., H. KIM, T. PARK. 2006. Nondestructive Damage Evaluation of Plates Using The Multi-Resolution Analysis Of Two-Dimensional Haar Wavelet. Journal of Sound and Vibration, 292: 82-104.

LI, H., X. DENG, H. DAI. 2007. Structural Damage Detection Using the Combination Method of Emd And Wavelet Analysis. Mechanical Systems and Signal Processing, 21: 298-306.

LI, Z., S. XIA, J. WANG, X. SU. 2006. Damage Detection of Cracked Beams Based On Wavelet Transform. International Journal of Impact Engineering, 32:1190-1200.

LIEW, K.M., Q. WANG. 1998. Application of Wavelet Theory for Crack Identification In Structures. ASCE Journal of Engineering Mechanics, 124(2): 152-157.

LOUTRIDIS, S., E. DOUKA, A. TROCHIDIS. 2004. Crack Identification in Double-Cracked Beams Using Wavelet Analysis. Journal of Sound and Vibration, 277: 1025-1039.

LOUTRIDIS, S., E. DOUKA, L.J. HADJILEONTIADIS, A. TROCHIDIS, A. 2005. A Two-Dimensional Wavelet Transform for Detection of Cracks In Plates. Engineering Structures, 27: 1327-1338.

LU, C-J., Y.T. HSU. 2002. Vibration Analysis of An Inhomogeneous String For Damage Detection by Wavelet Transform. International Journal of Mechanical Sciences, 44: 745-754.

MA, R-P., H.L. FU. 2004. Smart Active Sensing Technique Using Wavelet Analysis Method on Damage Detection of Composite Plate. Proceedings of the IEEE: International Conference on Networking, Sensing & Control, Taiwan, March 21-23, 2004, pp: 773-77.

MALLAT, S.G. 1998. A Wavelet Tour of Signal Processing. Academic Press, New York, 637p.

MALLAT, S., W.L. HWANG. 1992. Singularity Detection and Processing with Wavelets. IEEE Transactions on Information Theory, 38(2):617-643.

MCCONNELL, K.G. 1995. Vibration Testing. Theory and Practice. John Wiley & Sons Inc., New York, 606 p.

MEIROVITCH, L. 1986. Elements of Vibration Analysis. McGraw-Hill, USA, 560p.

MESSINA, A. 2008. Refinements of Damage Detection Methods Based on Wavelet Analysis of Dynamical Shapes. International Journal of Solids and Structures, 45:4068-4097.

MISITI, M., Y. MISITI, G. OPPENHEIM, J.M. POGGI. 2007. Wavelet Toolbox 4.0 User's Guide, The MathWorks, Inc, USA, 1180p.

MORI, K., N. KASASHIMA, T. YOSHIOKA, Y. UENO. 1996. Prediction of Spalling On A Ball Bearing By Applying The Discrete Wavelet Transform To Vibration Signals. Wear, 195: 162-168.

NGWANGWA, H.M., P.S. HEYNS, F.V. TONDER. 2006. Assessment of Structural Damage Using Operational Time Responses And Finite Element Simulation. Journal of Sound and Vibration, 296: 23-45.

OKAFOR, A.C., A. DUTTA. 2000. Structural Damage Detection in Beams By Wavelet Transforms. Smart Materials and Structures, 9:906-917.

OVANESOVA, A.V., L.E. SUÁREZ. 2004. Applications of Wavelet Transforms to Damage Detection in Frame Structures. Engineering Structures, 26: 39-49.

PANDEY, A.K., M. BISWAS. 1994. Damage Detection in Structures Using Changes in Flexibility. Journal of Sound and Vibration, 169(1): 3-17.

PAI, P.F., L.G. YOUNG. 2001. Damage Detection of Beams Using Operational Deflection Shapes. International Journal of Solids and Structures, 38(18): 3161-3192.

POUDEL, U.P., G. FU, J. YE. 2007. Wavelet Transformation of Mode Shape Difference Function For Structural Damage Location Identification. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 36:1089-1107.

QIAO, P., K. LU, W. LESTARI, J. WANG. 2007. Curvature Mode Shape-Based Damage Detection in Composite Laminated Plates. Composite Structures, 80: 409-428.

QUEK, S-T., Q. WANG, L. ZHANG, K-K. ANG. 2001. Sensitivity Analysis of Crack Detection in Beams By Wavelet Technique. International Journal of Mechanical Sciences, 43: 2899-2910.

RIZOS, P.F., N. ASPRAGHATOS. 1990. Identification of Crack Location And Magnitude in A Cantilever Beam From The Vibration Modes. Journal of Sound and Vibration, 138(3): 381-388.

ROBERTSON, A.N., C.R. FARRAR, H. SOHN. 2003. Singularity Detection For Structural Health Monitoring Using Hoelder Exponents. Mechanical Systems and Signal Processing, 17(6):1163-1184.

RUCKA, M., K. WILDE. 2006a. Crack Identification Using Wavelets On Experimental Static Deflection Profiles. Engineering Structures, 28: 279-288.

RUCKA, M, K. WILDE. 2006b. Application of Continuous Wavelet Transform in Vibration Based Damage Detection Method For Beams And Plates. Journal of Sound and Vibration, 297: 536-550.

SALAWU, O.S. 1997. Detection of Structural Damage Through Changes in Frequency: A Review. Engineering Structures, 19(9): 718-723.

SAMPAIO, R.P., N.M.M. MAIA, J.M.M. SILVA. 1999. Damage Detection Using The Frequency-Response-Function Curvature Method. Journal of Sound and Vibration, 226(5): 1029-1042.

STANBRIDGE, A.B., M. MARTARELLI, D.J. EWINS. 2004. Measuring Area Vibration Mode Shapes With A Continuous-Scan LDV. Measurement, 35: 181-189.

STARK, H-G. 2005. Wavelets and Signal Processing. An Appliction-Based Introduction, Springer, Netherlands, 150p.

STUBBS, N., J.T. KIM, C.R. FARRAR. 1995. Field Verification of A Non-Destructive Damage Localization And Severity Algorithm. 13th International Modal Analysis Conference, *Tennessee, February 13-16, 1995,* pp: 210-218.

TAO, J., S. FENG, H. YOU, Q. CHANGWEN, Q. RONGJIAN. 2007. Optimal Wavelet Vanishing Moments for Singular Signal Detection. 8th International Conference on Electronic Measurement and Instruments, Augest 16-18, pp: 782-786

TIMOSHENKO, S., D.H. YOUNG, W. WEAVER. 1974. Vibration Problems in Engineering. John Wiley & Sons. Canada, 521p.

TRENTADUE, B., A. MESSINA, N.I. GIANNOCCARO. 2007. Damage Detecting Through The Processing Of Dynamic Shapes Measured By A Psd-Triangular Laser Sensor. International Journal of Solids and Structures, 44: 5554-5575.

XIA, Y., H. HAO. 2003. Statistical Damage Identification of Structures With Frequency Changes. Journal of Sound and Vibration, 263: 853-870.

VIDACOVIC, B. 1999. Statistical Modelling By Wavelets. John Wiley & Sons. Inc., USA, 389p.

YAM, L.H., Y.J. YAN, J.S. JIANG. 2003. Vibration-Based Damage Detection For Composite Structures Using Wavelet Transform And Neural Network Identification. Composite Structures, 60:403-412.

YAN, Y.J., L.H. YAM. 2002. Online Detection of Crack Damage in Composite Plates Using Embedded Piezoelectric Actuators/Sensors And Wavelet Analysis. Composite Structures, 58: 29-38.

YAN, Y.J., H.N. HAO, L.H. YAM. 2004. Vibration-Based Construction and Extraction of Structural Damage Feature Index. International Journal of Solids and Structures, 41: 6661-6676.

YAN, Y.J., L. CHENG, Z.Y. WU, L.H. YAM. 2007. Development in Vibration-Based Structural Damage Detection Technique. Mechanical Systems and Signal Processing, 21(5): 2198-2211.

YİĞİT, O., M. DİLMEÇ, H.S. HALKACI. 2008. Tabaka Kaldırma Yöntemi İle Kalıntı Gerilmelerin Ölçülmesi ve Diğer Yöntemlerle Karşılaştırılmas. Mühendis ve Makina, ı49(579): 20-27.

WALNUT, D.F. 2002. An Introduction To Wavelet Analysis. Birkhäuser, Boston, 449p.

WANG, Q., X. DENG. 1999. Damage Detection With Spatial Wavelets. International Journal of Solids and Structures, 36: 3443-3468.

WANG, W.J., P.D. MCFADDEN. 1995. Application of Orthogonal Wavelets To Early Damage Detection. Mechanical Systems and Signal Processing, 9(5): 497-507.

WILLIAMS, J.R., K. AMARATUNGA. 1994. Introduction To Wavelets in Engineering. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 37: 2365-2388.

WU, X., J. GHABOUSSI, H. Jr. GARRET. 1992. Use of Neural Networks in Detection of Structural Damage. Computers & Structures, 42(4): 649-659.

ZHONG, S., S.O. OYADIJI. 2007. Crack Detection in Simply Supported Beams Without Baseline Modal Parameters By Stationary Wavelet Transform. Mechanical Systems and Signal Processing, 21: 1853-1884.

ZHONG, S., S.O. OYADIJI. 2008. Identification of Cracks In Beams With Auxiliary Mass Spatial Probing By Stationary Wavelet Transform. ASME Journal of Vibration and Acoustics, 130: 041001:1-14.

ZHU, X.Q., S.S. LAW. 2006. Wavelet-Based Crack Identification of Bridge Beam From Operational Deflection Time History. International Journal of Solids and Structures, 43: 2299-2317.

ZUMPANO, G., M. MEO. 2007. Damage Detection in An Aircraft Foam Sandwich Panel Using Nonlineer Elastic Wave Spectroscopy. Computers & Structures, 86:483-490.

EK

Malzeme ve geometri bakımından homojen bir kirişin doğal frekans ve titreşim modlarını sonlu elemanlar yöntemi ile bulan MATLAB programı.

```
% ANA PROGRAM ***********************************************************
% Bu program, üzerinde çentikler bulunduran kirişin doğal
% frekanslarını ve mod şekillerini sonlu elemanlar yöntemiyle
% hesaplar.

clear all; close all; clc

%global veriler ps hm % ps: bulmak istediğim parametre sayısı

% I Kiriş özellikleri ----------------------------------------------
ro=7800; % yoğunluk [kg/m3]
E=200e9; % Elastisite modülü [N/m2]
v=0.33; % Poisson oranı
G=E/(2*(1+v)); % Kayma modülü [N/m2]
w=20e-3; h=20e-3; % Kesit ölçüleri w(genişlik)xh(yükseklik) [m2]
A=w*h; I=w*(h^3)/12; % Alan ve atalet momenti
k=5/6; % kesit şekil faktörü
L=1; % boy [m]
EI=E*I; kGA=k*G*A;

% Sınır şartları
durum_ss=2; %1:as, 2:aa, 3:bb, 4:ss,  a:ankastre, s:serbest, b:basit
% ------------------------------------------------------------------------

nw=10; % ilk nw doğal frekans

% II- Sağlıklı elemanın kütle ve katılık matrisleri------
Ne=500; % eleman sayısı
Le=L/Ne; % eleman uzunluğu
veriler=[ro A I EI kGA Le];
[me,ke]=Me_ve_Ke(veriler);
% ----------------------------------------------------------

% III- Hasarlı elemanın kütle ve katılık matrisleri------
dc=1e-3; % Hasar derinliği [m]
xc=[.114 .32 .52]*L;    % hasar yerleri
HasEl=round(Ne*xc/L);   % hasarlı elemanlar
h=h - dc;               % hasarlı kesit yüksekliği
A=w*h; I= w*(h^3)/12; EI=E*I; kGA=k*G*A;
veriler=[ro A I EI kGA Le];
[me_h,ke_h]=Me_ve_Ke(veriler);
% ----------------------------------------------------------

% IV- Toplam kütle ve katılık matrisleri---------------------------
N=2*(Ne+1); % toplam kütle ve katılık matrislerinin boyutu
Mt=zeros(N,N);
Kt=zeros(N,N);
for i=1:Ne
    sat=2*(i-1)+1; sut=sat;
```

```
    n=0;
    for j=1:length(HasEl)
        if i==HasEl(j)
            n=n+1;
        end
    end
    if n==1
        Mt(sat:sat+3,sut:sut+3)=Mt(sat:sat+3,sut:sut+3)+me_h;
        Kt(sat:sat+3,sut:sut+3)=Kt(sat:sat+3,sut:sut+3)+ke_h;
    elseif n==0
        Mt(sat:sat+3,sut:sut+3)=Mt(sat:sat+3,sut:sut+3)+me;
        Kt(sat:sat+3,sut:sut+3)=Kt(sat:sat+3,sut:sut+3)+ke;
    end
end
% ------------------------------------------------------------------
```

% V- Sınır şartlarına göre Mt ve Kt nin modifikasyonu--------------

```
if durum_ss==1 % ank-ser
    ara=M_D(Mt,1); Mt=M_D(ara,1);
    ara=M_D(Kt,1); Kt=M_D(ara,1);
elseif durum_ss==2 %ank-ank
    ara=M_D(Mt,1); ara=M_D(ara,1);
    ara=M_D(ara,length(ara(1,:)));
    Mt=M_D(ara,length(ara(1,:)));

    ara=M_D(Kt,1); ara=M_D(ara,1);
    ara=M_D(ara,length(ara(1,:)));
    Kt=M_D(ara,length(ara(1,:)));
elseif durum_ss==3 %basit-basit
    ara=M_D(Mt,1); Mt=M_D(ara,length(ara(1,:))-1);
    ara=M_D(Kt,1); Kt=M_D(ara,length(ara(1,:))-1);
else
    disp('serbest sınır şartları')
end
% ------------------------------------------------------------------
```

% VI- İlk nw doğal frekans ve mod şeklinin bulunması --------------

```
[V,D]=eig(Kt,Mt);
for i=1:length(D(:,1))
    w(i)=sqrt(D(i,i))/(2*pi); % Hertz biriminde doğal frekanslar
end
[w,indis]=sort(w);
disp('Doğal Frekanslar [Hz]')
w(1:nw)'
n=0;
while n<=nw
    n=n+1;
    for i=1:length(V(1,:))
        if i==indis(n)
            T(n,:)=V(:,i)';
        end
    end
end
clear V D
% ------------------------------------------------------------------
```

% VII- Modal vektörlerin sınır şartlarına göre düzenlenmesi----

```
nT=length(T(1,:));
if durum_ss==1          % ankastre-serbest
    ara=zeros(n,2);
    T=[ara T];
elseif durum_ss==2      %ankastre-ankastre
    ara=zeros(n,2);
    T=[ara T ara];
elseif durum_ss==3      %basit-basit
    ara1=zeros(n,1); ara2=T(:,1:nT-1);
    ara3=T(:,nT);
    T=[ara1 ara2 ara1 ara3];
else                    %serbest-serbest
end
% ------------------------------------------------------------

% VIII- Modların normlanması ve çizdirilmesi ----------------
for i=1:length(T(:,1))
    for n=1:length(T(1,:))/2
        Y(i,n)=T(i,2*(n-1)+1); % sehim
    end
end

for i=1:length(Y(:,1))
    Y(i,:)=Y(i,:)/max(abs(Y(i,:)));
end

X=linspace(0,L,length(Y(1,:)));
plot(X,Y(1,:),'k',X,Y(2,:),'k--',X,Y(3,:),'k-.',...
    X,Y(4,:),'k:',X,Y(5,:),'b:');
title('Ilk 5 Mod');
legend('1','2','3','4','5')
xlabel('x')
Y1=Y(1,:); Y2=Y(2,:); Y3=Y(3,:); Y4=Y(4,:); Y5=Y(5,:);

if dc==0 %hasar yok
    save MODLAR0 X Y1 Y2 Y3 Y4 Y5 Y HasEl Ne L
else
    save MODLAR1 X Y1 Y2 Y3 Y4 Y5 Y HasEl Ne L
end
% Program Sonu ***********************************************************
```

ALT PROGRAMLAR

```
function [me,ke]=Me_ve_Ke(v);
% Bu alt programla bir kiriş elemanının eleman kütle ve katılık
% matrisleri hesaplanır.

%v=[ro A I EI kGA Le];
ro=v(1); A=v(2); I=v(3); EI=v(4); kGA=v(5); Le=v(6);

syms x

L1=1-x/Le;
L2=x/2 - (x^2)/(2*Le);
L3=x/Le;
L4=-L2;
```

```
L=[L1 L2 L3 L4]';

S1=0;
S2=1-x/Le;
S3=0;
S4=x/Le;

S=[S1 S2 S3 S4]';
DS1 = diff(S1); DS2 = diff(S2);
DS3 = diff(S3); DS4 = diff(S4);

DS=[0 DS2 0 DS4]';

ara11=ro*A*int(L*L',0,Le);
ara12=ro*I*int(S*S',0,Le);

me=eval(ara11)+eval(ara12);   % eleman kütle matrisi

ara21=EI*int(DS*DS',0,Le);
V=[-1/Le -0.5 1/Le -0.5]'; V=V*V';
ara22=kGA*Le*V; % V=DL-S
ke=eval(ara21)+ara22;         % eleman katılık matrisi
% Program Sonu


function M = M_D(A,n)
% Bu program gönderilen bir A matrisinin n. satır ve sütununu silerek
% yeni bir M matrisi oluşturur.

nn = length(A(1,:));
if n==1
    M=A(2:nn,2:nn);
elseif n==nn
    M=A(1:nn-1,1:nn-1);
else
    for i=1:nn
        for j=1:nn
            if i<n
                if j<n
                    M(i,j) = A(i,j);
                elseif j>n
                    M(i,j-1) = A(i,j);
                end
            elseif i>n
                if j<n
                    M(i-1,j) = A(i,j);
                elseif j>n
                    M(i-1,j-1) = A(i,j);
                end
            end
        end
    end
end
% Program Sonu
```

ÖZGEÇMİŞ

24.04.1980 Sakarya (Akyazı) doğumludur. 1997 yılında girdiği Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nü bir sene İngilizce hazırlık ve dört yıl lisans eğitminden sonra 2002 yılında, aynı bölümde 2002-2005 yılları arasında da yüksek lisansını tamamlamıştır. 6 aylık kısa dönem askerlik hizmetinden sonra 2005 yılında doktora eğitimine başlamıştır. 2547 sayılı YÖK Kanunu'nun 39. Maddesi kapsamında doktora tezi ile ilgili çalışmalar yapmak üzere 2009 Kasım – 2010 Mayıs arasında yaklaşık altı ay Londra Imperial College'de misafir öğrenci olarak bulunmuştur. Lisansüstü eğitimi sırasındaki araştırmaları sonucu ulusal ve uluslar arası dergilerde yayımlanmış çalışmaları bulunmaktadır. 2002 yılından beri U.Ü. Makine Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.

TEŞEKKÜR

Deneysel çalışmalarda kullanılan ekipman ve yazılım 107M371 nolu TÜBİTAK Projesi kapsamında tedarik edilmiştir. Projeye öncülük eden sayın hocam Prof. Dr. Osman KOPMAZ'a ve TÜBİTAK yetkililerine teşekkürlerimi arz ederim. Farklı türde bir plağın modal verisini paylaşma nezaketini gösteren Dr. Magdalena Rucka'ya (Gdańsk Teknoloji Üniversitesi, Polonya) katkılarından dolayı teşekkür ederim. Çalışma sırasında moral ve teşvik anlamındaki önemli desteğinden ötürü eşim Fatma Seymen Hanım'a ayrıca teşekkür ederim.