

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**MÜHENDİSLİK YAPILARINDA ANALİTİK, SAYISAL VE DENEYSEL
YÖNTEMLERE DAYALI HASAR TESPİTİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Fatih Yesevi OKUR

OCAK 2017

TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**MÜHENDİSLİK YAPILARINDA ANALİTİK, SAYISAL VE DENEYSEL YÖNTEMLERE
DAYALI HASAR TESPİTİ**

Fatih Yesevi OKUR

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"İNŞAAT YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 17 / 01 / 2017

Tezin Savunma Tarihi : 30 / 01 / 2017

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK

Trabzon 2017

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında
Fatih Yesevi OKUR Tarafından Hazırlanan**

**MÜHENDİSLİK YAPILARINDA ANALİTİK, SAYISAL VE DENEYSEL YÖNTEMLERE
DAYALI HASAR TESPİTİ**




**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 17/ 01 / 2017 gün ve 1685 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.**

Jüri Üyeleri

Başkan : Doç. Dr. Volkan KAHYA

Üye : Doç. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK

Üye : Doç. Dr. Barış SEVİM

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

“Mühendislik Yapılarında Analitik, Sayısal ve Deneysel Yöntemlere Dayalı Hasar Tespiti” isimli tez çalışmasını bana öneren ve her aşamasında beni destekleyen, daha iyi ve güzel çalışmalar için devamlı teşvik eden değerli Hocam Sayın Doç. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK'a teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Tez çalışmamda kullandığım laboratuvar modellerinin oluşturulmasında değerli zamanını ve emeğini benim için harcamaktan kaçınmayan Hocam Sayın Doç. Dr. Süleyman ADANUR'a ve tez ile ilgili değerli görüş ve önerilerini benimle paylaşan Hocam Sayın Doç. Dr. Volkan KAHYA'ya teşekkür ederim.

Akademik hayatım boyunca bana destek olan ve bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan hocam ve arkadaşlarım Sayın Dr. Murat GÜNAYDIN'a, Arş Gör. Ali Fuat GENÇ'e, Arş. Gör. Sebahat KARACA'ya, İnş. Yük. Müh. Ebru KALKAN'a, İnş. Yük. Müh. Ali YETİŞKEN'e, İnş. Yük. Müh. Olguhan Şevket KARAHASAN'a, İnş. Müh. Emrehan AKBULUT'a, İnş. Müh. İlker DEĞİRMENCİ'ye, İnş. Müh. Yıldırım ELMAS'a ve İnş. Müh. Burak KÖŞKEROĞLU'na çok teşekkür ederim.

Akademik ve normal hayattaki güçlüklerle birlikte göğüs gerdiğimiz, acıları ve mutlulukları birlikte paylaştığımız, en zor zamanlarımda hep yanımda olan değerli arkadaşım ve dostum İnş. Yük. Müh. Fatih YÖNDEM'e şükranlarımı sunarım.

Öğrenim hayatım boyunca bana her türlü desteği sağlayan babam Hasan OKUR'a, annem Melahat OKUR'a ve değerli abilerim Dr. Kürşat Tuğrul OKUR'a ve Makine Müh. Alperen OKUR'a müteşekkir olduğumu belirtir, bu çalışmanın ülkemize faydalı olmasını temenni ederim.

Fatih Yesevi OKUR
Trabzon 2017

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Mühendislik Yapılarında Analitik, Sayısal ve Deneysel Yöntemlere Dayalı Hasar Tespiti” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 30/01/2017

Fatih Yesevi OKUR

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	VIII
SUMMARY.....	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	X
TABLolar DİZİNİ.....	XVI
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XVIII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Hasar Tespiti Üzerine Yapılmış Çalışmalar.....	2
1.3. Tezin Amacı ve İçeriği.....	10
1.4. Analitik Yöntem Kullanılarak Dinamik Karakteristiklerin Elde Edilmesi.....	11
1.5. Sonlu Eleman Yöntemiyle Dinamik Karakteristiklerin Elde Edilmesi.....	19
1.5.1. Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması.....	19
1.5.2. Malzeme Özellikleri ve Sınır Şartlarının Belirlenmesi.....	20
1.5.3. Modal Analiz.....	21
1.6. Deneysel Modal Analiz.....	22
1.6.1. Deneysel Modal Analizinde Kullanılan Ölçüm Sistemleri.....	22
1.6.1.1. Titreştiriciler.....	22
1.6.1.2. Sarsıcılar.....	22
1.6.1.3. Darbe Çekiçleri.....	23
1.6.1.4. İvmeölçerler.....	24
1.6.1.5. Veri Toplama Sistemi ve Sinyal İşleme.....	26
1.6.2. Deneysel Modal Analiz Yöntemine ait Formülasyon.....	28
1.6.2.1. Çevresel Titreşim Yöntemi.....	28

1.6.2.1.1.	Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (GFTAA) Yöntemi	30
1.6.2.1.2.	Stokastik Altalan Belirleme (SAB) Yöntemi	31
1.6.2.2.	Zorlanmış Titreşim Yöntemi	34
1.7.	Çevresel Titreşimlere Dayalı Hasar Tespit Yöntemleri.....	35
1.7.1.	Frekans Değişimine Dayalı Hasar Tespiti	35
1.7.2.	Mod Şekillerinin Değişimine Dayalı Hasar Tespiti	36
1.7.2.1.	Modal Güvence Kriteri (MGK).....	36
1.7.2.2.	Koordinat Modal Güvence Kriteri (KMGK).....	37
1.7.2.3.	Mod Şekli Eğrilik Yöntemi	37
1.7.3.	Fleksibilite Değişimine Dayalı Hasar Tespiti.....	38
1.7.4.	Model Güncellemeye Dayalı Hasar Tespiti.....	39
1.7.4.1.	Belirsiz Parametrelerin Seçilmesi.....	40
1.7.4.2.	Duyarlılık Analizi	40
1.7.4.3.	Yakınsama Kriterlerinin Belirlenmesi	42
1.7.4.4.	Parametrik Tahmin Yöntemi	43
1.7.4.5.	İteratif Çözüm.....	44
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR.....	46
2.1.	Giriş	46
2.2.	Laboratuvar Çalışmaları	47
2.2.1.	Boru Kesitli Konsol Kiriş Modeli	47
2.2.1.1.	Modelin Özellikleri.....	47
2.2.1.2.	Hasar Verilecek Yerlerin Belirlenmesi.....	47
2.2.1.3.	Analitik Yöntemle Dinamik Karakteristiklerin Elde Edilmesi.....	49
2.2.1.4.	Sonlu Eleman Yöntemiyle Dinamik Karakteristiklerin Elde Edilmesi	50
2.2.1.5.	DeneySEL Modal Analiz Yöntemiyle Dinamik Karakteristiklerin Elde Edilmesi.....	51
2.2.1.6.	Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırılması.....	60
2.2.1.7.	Çevresel Titreşimlere Dayalı Hasar Tespit Yöntemlerinin Karşılaştırılması.....	71
2.2.2.	Kutu Kesitli Konsol Kiriş Modeli	87
2.2.2.1.	Modelin Özellikleri.....	87
2.2.2.2.	Hasar Verilecek Yerlerin Belirlenmesi.....	87

2.2.2.3.	Analitik Yöntemle Dinamik Karakteristiklerin Elde Edilmesi.....	89
2.2.2.4.	Sonlu Eleman Yöntemiyle Dinamik Karakteristiklerin Elde Edilmesi	90
2.2.2.5.	Deneyisel Modal Analiz Yöntemiyle Dinamik Karakteristiklerin Elde Edilmesi.....	91
2.2.2.6.	Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırılması.....	100
2.2.2.7.	Çevresel Titreşimlere Dayalı Hasar Tespit Yöntemlerinin Karşılaştırılması.....	111
2.2.3.	Betonarme Taşıyıcı Sisteme Sahip Düzlem Çerçeve Modeli.....	127
2.2.3.1.	Modelin Özellikleri.....	127
2.2.3.2.	Sonlu Eleman Yöntemiyle Dinamik Karakteristiklerin Elde Edilmesi	128
2.2.3.3.	Deneyisel Modal Analiz Yöntemiyle Dinamik Karakteristiklerin Elde Edilmesi	130
2.2.3.4.	Çevresel Titreşimlere Dayalı Hasar Tespit Yöntemlerinin Uygulanması	138
2.3.	Arazi Çalışmaları.....	149
2.3.1.	Trabzon Burcu	149
2.3.1.1.	Trabzon Burcu Yapısı ve Geometrik Özellikleri.....	149
2.3.1.2.	Başlangıç Sonlu Eleman Modelinin Elde Edilmesi.....	150
2.3.1.3.	Dinamik Karakteristiklerin Deneyisel Modal Analiz Yöntemiyle Elde Edilmesi.....	151
2.3.1.4.	Duyarlılığa Bağlı Model Güncellemesi	154
3.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	163
4.	KAYNAKLAR.....	167

ÖZGEÇMİŞ

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

MÜHENDİSLİK YAPILARINDA ANALİTİK, SAYISAL VE DENEYSSEL YÖNTEMLERE
DAYALI HASAR TESPİTİ

Fatih Yesevi OKUR

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK
2017, 171 Sayfa

Bu tez çalışmasında, farklı taşıyıcı sistemlere sahip mühendislik yapılarındaki yapısal hasarların analitik, sayısal ve deneysel yöntemlerle tespit edilmesi ve değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, boru ve kutu kesite sahip çelik konsol kiriş modeller ile betonarme taşıyıcı sisteme sahip düzlem çerçeve sistem üzerinde laboratuvar çalışmaları, Trabzon İli sınırları içerisinde yer alan ve yığma taşıyıcı sisteme sahip tarihi Trabzon Burcu üzerinde ise arazi çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışması başlıca dört bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde hasar tespiti üzerine yapılmış çalışmalar ile kullanılan analitik, sayısal ve deneysel formülasyonlar verilmektedir. Tez kapsamında, hasar tespiti amacıyla literatürde de yaygın olarak kullanılan Modal Güvence Kriteri, Koordinat Modal Güvence Kriteri, Mod Şekli Eğrilik Yöntemi, Modal Fleksibilite Yöntemi ve Duyarlılığa bağlı Model Güncellemesi yöntemleri kullanılmıştır. İkinci bölümde, yapılan çalışmalar ve bu çalışmalardan elde edilen bulgulara yer verilmiştir. İlk kısımda, boru ve kutu kesite sahip çelik konsol kiriş modeller ile betonarme taşıyıcı sisteme sahip düzlem çerçeve sistem üzerinde farklı hasar durumları dikkate alınmış olup, her bir hasar durumunda dinamik karakteristiklerin değişimi ve hasar bölgelerinin tespiti analitik, sayısal ve deneysel yöntemlerle incelenmiştir. İkinci kısımda ise Trabzon İli, Ortahisar İlçesi'nde yer alan ve yığma taşıyıcı sisteme sahip tarihi Trabzon Burcu'nun yapısal durumunun değerlendirilmesi yapılmıştır. Üçüncü bölümde, çalışmadan elde edilen sonuçlar ve öneriler maddeler halinde sunulmakta olup, son bölümde ise yararlanılan kaynaklar verilmektedir.

Çalışma sonunda, literatürde yaygın olarak kullanılan hasar tespit yöntemlerinin farklı taşıyıcı sisteme sahip mühendislik yapılarında oldukça etkili sonuçlar verdiği değerlendirildiği yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Hasar Tespiti, Timoshenko Kiriş Teoremi, Sonlu Eleman Yöntemi, Deneysel Modal Analiz, Çevresel Titreşim Testi, Model Güncelleme

Master Thesis

SUMMARY

DAMAGE DETECTION BASED ON ANALYTICAL, NUMERICAL AND EXPERIMENTAL
METHODS IN ENGINEERING STRUCTURES

Fatih Yesevi OKUR

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Ahmet Can ALTUNIŞIK
2017, 171 Pages

In this thesis, damage detection based on analytical, numerical and experimental methods in engineering structures is presented. For this purpose, laboratory studies are performed on cantilever beam models with box and hollow circular cross-sections, respectively, and plane frame model with reinforced concrete bearing system. In addition, on site experiments are carried out on Trabzon Bastion with masonry wall bearing system.

The thesis consists of four chapters. In the first chapter, general information and related literature by techniques are presented. Modal Assurance Criteria, Coordinate Modal Assurance Criteria, Mod Shape Curvature Method, Modal Flexibility Method and Sensitivity Modal Updating methods for damage detection are presented. In the second chapter, the studies performed and findings obtained from the studies are given. This sections is divided into two subsection as laboratory and field studies. In the first part, different damage cases are taken into consideration on the plane frame system with reinforced concrete system, steel cantilever beam model with hollow circular and box section. Change in dynamic characteristics and damage areas are determined analytically, numerically and experimentally for each damage case. In the second part, historical Trabzon Bastion with masonry wall bearing system is considered and evaluated. In the third chapter, conclusions and some suggestions are presented. Lastly, references and autobiography are given.

At the end of study, it is evaluated that damage detection methods commonly used in the literature give very effective results in structures with different bearing systems.

Key Words: Damage Detection, Timoshenko Beam Theory, Finite Element Method, Experimental Modal Analysis, Ambient Vibrations Test, Model Updating

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1.	Farklı bölgelerde çatlaklara sahip Timoshenko kirişi 11
Şekil 1.2.	Boru kesitli kirişteki kesit çatlağı 15
Şekil 1.3.	Kutu kesitli kirişteki kesit çatlağı 16
Şekil 1.4.	Farklı bölgelerde çatlaklara sahip konsol Timoshenko kirişi 17
Şekil 1.5.	Bir, iki ve üç boyutlu sonlu eleman örnekleri 20
Şekil 1.6.	Farklı modellerdeki darbe çekiçleri 23
Şekil 1.7.	B&K 8210 tipi darbe çekici 24
Şekil 1.8.	Piezoelektrik tipi ivmeölçerin iç mekanizması 25
Şekil 1.9.	a) B&K 8340 tipi tek eksenli, b) B&K 4506 tipi üç eksenli ve c) B&K 4507 tipi tek eksenli ivmeölçerler 25
Şekil 1.10.	Brüel&Kjaer 3560-C veri toplama ünitesi 27
Şekil 1.11.	Dinamik karakteristiklerinin deneysel yöntemlerle belirlenmesine ait akış şeması 29
Şekil 1.12.	Zorlanmış Titreşim Yöntemi'ne ait a) şematik gösterim b) Frekans davranış fonksiyonunun belirlenmesi 34
Şekil 2.1.	Hasar tespiti amacıyla gerçekleştirilen çalışmalara ait akış şeması 46
Şekil 2.2.	Boru kesitli çelik konsol kiriş modeline ait görünüşler 47
Şekil 2.3.	Farklı hasar durumları için hasar yerleri ve büyüklüklerine ait şematik görünüşler 48
Şekil 2.4.	Hasarlı ve hasarsız durumlar için elde edilen ilk üç mod şekli 49
Şekil 2.5.	Boru kesitli konsol kirişin hasarsız ve hasarlı durumlar için oluşturulan sonlu eleman modelleri 50
Şekil 2.6.	Boru kesitli konsol kirişin Hasar 6 durumu için sonlu eleman analizleri sonucu elde edilen ilk üç mod şekli 50
Şekil 2.7.	İvmeölçerlerin yerleşim yerleri 52
Şekil 2.8.	Laboratuvar ortamında inşa edilen boru kesitli çelik konsol kiriş modeli 52
Şekil 2.9.	Hasarsız durum için elde edilen spektral yoğunluk matrisleri ve kararlılık diyagramı 53
Şekil 2.10.	Hasar 1 durumu için elde edilen spektral yoğunluk matrisleri ve kararlılık diyagramı 54

Şekil 2.11.	Hasar 2 durumu için elde edilen spektral yoğunluk matrisleri ve kararlılık diyagramı.....	55
Şekil 2.12.	Hasar 3 durumu için elde edilen spektral yoğunluk matrisleri ve kararlılık diyagramı.....	56
Şekil 2.13.	Hasar 4 durumu için elde edilen spektral yoğunluk matrisleri ve kararlılık diyagramı.....	57
Şekil 2.14.	Hasar 5 durumu için elde edilen spektral yoğunluk matrisleri ve kararlılık diyagramı.....	58
Şekil 2.15.	Hasar 6 durumu için elde edilen spektral yoğunluk matrisleri ve kararlılık diyagramı.....	59
Şekil 2.16.	Hasarsız ve hasarlı durum için deneysel olarak elde edilen ilk üç mod şekli.....	60
Şekil 2.17.	Hasarsız durum için elde edilen (a) birinci, (b) ikinci ve (c) üçüncü mod şeklinin karşılaştırılması.....	62
Şekil 2.18.	Hasar 1 durumu için elde edilen (a) birinci, (b) ikinci ve (c) üçüncü mod şeklinin karşılaştırılması.....	63
Şekil 2.19.	Hasar 2 durumu için elde edilen (a) birinci, (b) ikinci ve (c) üçüncü mod şeklinin karşılaştırılması.....	64
Şekil 2.20.	Hasar 3 durumu için elde edilen (a) birinci, (b) ikinci ve (c) üçüncü mod şeklinin karşılaştırılması.....	65
Şekil 2.21.	Hasar 4 durumu için elde edilen (a) birinci, (b) ikinci ve (c) üçüncü mod şeklinin karşılaştırılması.....	66
Şekil 2.22.	Hasar 5 durumu için elde edilen (a) birinci, (b) ikinci ve (c) üçüncü mod şeklinin karşılaştırılması.....	67
Şekil 2.23.	Hasar 6 durumu için elde edilen (a) birinci, (b) ikinci ve (c) üçüncü mod şeklinin karşılaştırılması.....	68
Şekil 2.24.	Hasarsız durum için analitik ve deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen MGK grafiği.....	69
Şekil 2.25.	Altı farklı hasar durumu için analitik ve deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen MGK grafikleri.....	70
Şekil 2.26.	Hasarsız durum ile her bir hasar durumunun karşılaştırılması sonucu elde edilen deneysel MGK değerleri.....	72
Şekil 2.27.	Analitik, sayısal ve deneysel olarak elde edilen (1-KMGK) grafikleri.....	73
Şekil 2.28.	Mod Şekli Eğrilik Yöntemi kullanılarak analitik çözüme dayalı elde edilen hasar tespit grafikleri.....	75
Şekil 2.29.	Mod Şekli Eğrilik Yöntemi kullanılarak deneysel çözüme dayalı elde edilen hasar tespit grafikleri.....	76
Şekil 2.30.	Mod Şekli Eğrilik Yöntemi kullanılarak analitik ve deneysel çözüme dayalı elde edilen hasar tespit grafikleri.....	77

Şekil 2.31.	Modal Esneklik Yöntemi kullanılarak analitik çözüme dayalı elde edilen hasar tespiti grafikleri	79
Şekil 2.32.	Modal Esneklik Yöntemi kullanılarak deneysel çözüme dayalı elde edilen hasar tespiti grafikleri	80
Şekil 2.33.	Modal Esneklik Yöntemi kullanılarak analitik ve deneysel çözüme dayalı elde edilen hasar tespiti grafikleri	81
Şekil 2.34.	Boru kesitli çelik konsol kiriş modeline ait eleman isimleri	82
Şekil 2.35.	Boru kesitli çelik konsol modeline ait farklı hasar durumlarındaki Duyarlılık Analizi sonuçları	83
Şekil 2.36.	Farklı hasar durumları için, konsol kiriş modeline ait atalet momenti değişimleri	85
Şekil 2.37.	Boru kesitli çelik konsol kiriş modeline ait görünüşler	87
Şekil 2.38.	Farklı hasar durumları için hasar yerleri ve büyüklüklerine ait şematik görünüşler	88
Şekil 2.39.	Hasarlı ve hasarsız durumlar için elde edilen ilk üç mod şekli.....	89
Şekil 2.40.	Kutu kesitli konsol kirişin hasarsız ve hasarlı durumları için oluşturulan sonlu eleman modelleri	90
Şekil 2.41.	Kutu kesitli konsol kirişin Hasar 6 durumu için sonlu eleman analizleri sonucunda elde edilen ilk üç mod şekli	90
Şekil 2.42.	İvmeölçerlerin yerleşim yerleri.....	92
Şekil 2.43.	Laboratuvar ortamında hazırlanan kutu kesitli çelik konsol kiriş modeli	92
Şekil 2.44.	Hasarsız durum için elde edilen spektral yoğunluk matrisleri ve kararlılık diyagramı.....	93
Şekil 2.45.	Hasar 1 durumu için elde edilen spektral yoğunluk matrisleri ve kararlılık diyagramı.....	94
Şekil 2.46.	Hasar 2 durumu için elde edilen spektral yoğunluk matrisleri ve kararlılık diyagramı.....	95
Şekil 2.47.	Hasar 3 durumu için elde edilen spektral yoğunluk matrisleri ve kararlılık diyagramı.....	96
Şekil 2.48.	Hasar 4 durumu için elde edilen spektral yoğunluk matrisleri ve kararlılık diyagramı.....	97
Şekil 2.49.	Hasar 5 durumu için elde edilen spektral yoğunluk matrisleri ve kararlılık diyagramı.....	98
Şekil 2.50.	Hasar 6 durumu için elde edilen spektral yoğunluk matrisleri ve kararlılık diyagramı.....	99
Şekil 2.51.	Hasarsız ve hasarlı durum için deneysel olarak elde edilen mod şekli.....	100
Şekil 2.52.	Hasarsız durum için elde edilen (a) birinci, (b) ikinci ve (c) üçüncü mod şeklinin karşılaştırılması.....	102

Şekil 2.53.	Hasar 1 durumu için elde edilen (a) birinci, (b) ikinci ve (c) üçüncü mod şeklinin karşılaştırılması.....	103
Şekil 2.54.	Hasar 2 durumu için elde edilen (a) birinci, (b) ikinci ve (c) üçüncü mod şeklinin karşılaştırılması.....	104
Şekil 2.55.	Hasar 3 durumu için elde edilen (a) birinci, (b) ikinci ve (c) üçüncü mod şeklinin karşılaştırılması.....	105
Şekil 2.56.	Hasar 4 durumu için elde edilen (a) birinci, (b) ikinci ve (c) üçüncü mod şeklinin karşılaştırılması.....	106
Şekil 2.57.	Hasar 5 durumu için elde edilen (a) birinci, (b) ikinci ve (c) üçüncü mod şeklinin karşılaştırılması.....	107
Şekil 2.58.	Hasar 6 durumu için elde edilen (a) birinci, (b) ikinci ve (c) üçüncü mod şeklinin karşılaştırılması.....	108
Şekil 2.59.	Hasarsız durum için analitik ve deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen MGK grafiği	109
Şekil 2.60.	Altı farklı hasar durumu için analitik ve deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen MGK grafikleri.....	110
Şekil 2.61.	Hasarsız durum ile her bir hasar durumunun karşılaştırılması sonucu elde edilen deneysel MGK değerleri	112
Şekil 2.62.	Analitik, sayısal ve deneysel olarak elde edilen (1-KMGK) grafikleri.....	113
Şekil 2.63.	Mod Şekli Eğrilik Yöntemi kullanılarak analitik çözüme dayalı elde edilen hasar tespit grafikleri	115
Şekil 2.64.	Mod Şekli Eğrilik Yöntemi kullanılarak deneysel çözüme dayalı elde edilen hasar tespit grafikleri	116
Şekil 2.65.	Mod Şekli Eğrilik Yöntemi kullanılarak analitik ve deneysel çözüme dayalı elde edilen hasar tespit grafikleri	117
Şekil 2.66.	Modal Esneklik Yöntemi kullanılarak analitik çözüme dayalı elde edilen hasar tespit grafikleri	119
Şekil 2.67.	Modal Esneklik Yöntemi kullanılarak deneysel çözüme dayalı elde edilen hasar tespit grafikleri	120
Şekil 2.68.	Modal Esneklik Yöntemi kullanılarak analitik ve deneysel çözüme dayalı elde edilen hasar tespit grafikleri.....	121
Şekil 2.69.	Kutu kesitli çelik konsol kiriş modeline ait eleman isimleri	122
Şekil 2.70.	Kutu kesitli çelik konsol modelinde farklı hasar durumları ait Duyarlılık Analizi sonuçları.....	123
Şekil 2.71.	Farklı hasar durumları için konsol kiriş modeline ait atalet momentindeki değişimleri	125
Şekil 2.72.	Betonarme çerçeve sistemine ait kesit detayları (birimler cm cinsindedir)	127
Şekil 2.73.	Betonarme düzlem çerçeve sistemine ait iki ve üç sonlu eleman modeli görünüşleri	128

Şekil 2.74.	Sonlu eleman analizleri sonucunda elde edilen ilk üç frekans değeri ve mod şekilleri.....	129
Şekil 2.75.	Betonarme düzlem çerçeve modeli için gerçekleştirilen deneysel ölçümlere ait ivmeölçer yerleşim planı.....	130
Şekil 2.76.	Betonarme düzlem çerçeve sistemi üzerinde gerçekleştirilen deneysel ölçümlere ait bazı fotoğraflar.....	131
Şekil 2.77.	Betonarme çerçeve sistemine ait hasarsız durum için elde edilen spektral yoğunluk matrisleri ve kararlılık diyagramları.....	132
Şekil 2.78.	Betonarme düzlem çerçeve sisteminin hasarsız durumuna ait elde edilen ilk üç mod şekli	133
Şekil 2.79.	Hasarlı durumdaki betonarme düzlem çerçeve sisteme ait elde edilen bazı görünüşler	134
Şekil 2.80.	Betonarme düzlem çerçeve sistemi üzerinde hasarlı durum için gerçekleştirilen deneysel ölçümlere ait bazı fotoğraflar	135
Şekil 2.81.	Betonarme düzlem çerçeve sistemi üzerinde hasarlı duruma ait elde edilen spektral yoğunluk matrisleri ve kararlılık diyagramları	136
Şekil 2.82.	Betonarme düzlem çerçeve sistemi üzerinde hasarlı duruma ait elde edilen ilk üç mod şekli	137
Şekil 2.83.	Betonarme düzlem çerçeve sistemi için, hasarsız ve hasarlı durumlar için deneysel olarak elde edilen MGK matrisi	139
Şekil 2.84.	Betonarme düzlem çerçeve sisteminde hasarsız ve hasarlı durumlar için deneysel olarak elde edilen 1-KMGK değerleri.....	139
Şekil 2.85.	Hasarsız duruma ait Bütünsel Güncelleme için elde edilen Duyarlılık Analiz sonuçları.....	141
Şekil 2.86.	Betonarme düzlem çerçeve sistemi için hasarsız duruma dikkate alınarak Yerel Güncelleme ile elde edilen Duyarlılık Analizi sonuçları	143
Şekil 2.87.	Betonarme düzlem çerçeve sistemine ait hasarsız durum dikkate alınarak Yerel Güncelleme ile elde edilen parametrelerin değişim sonuçları	144
Şekil 2.88.	Betonarme düzlem çerçeve sistemine ait hasarsız durum dikkate alınarak Yerel Güncelleme ile elde edilen parametrelerin değişim sonuçlarının sonlu eleman modeli üzerindeki dağılımları	145
Şekil 2.89.	Betonarme düzlem çerçeve sistemine ait hasarlı durum dikkate alınarak Yerel Güncelleme ile elde edilen Duyarlılık Analizi sonuçları	146
Şekil 2.90.	Hasarlı duruma ait Yerel Güncelleme ile elde edilen parametre değişimleri.....	147

Şekil 2.91.	Betonarme düzlem çerçeve sistemine ait hasarlı durum dikkate alınarak Yerel Güncelleme ile elde edilen parametre değişim sonuçlarının sonlu eleman modeli üzerindeki dağılımları.....	148
Şekil 2.92.	Trabzon Burcuna ait bazı röleve çizimleri.....	149
Şekil 2.93.	Trabzon Burcuna ait elde edilen bazı görünüşler	150
Şekil 2.94.	Trabzon Burcunun sonlu eleman modeline ait bazı görünüşler....	151
Şekil 2.95.	Trabzon Burcuna ait ivmeölçer yerleşim planı	152
Şekil 2.96.	Trabzon Burcuna ait spektral yoğunluk matrisleri ve kararlılık diyagramları	152
Şekil 2.97.	Trabzon Burcuna ait elde edilen mod şekilleri	154
Şekil 2.98.	Trabzon Burcunun sonlu eleman analizlerine dayalı sayısal olarak elde edilen ilk üç mod şekli	155
Şekil 2.99.	Trabzon Burcuna ait Bütünsel Güncelleme ile elde edilen Duyarlılık Analizi sonuçları.....	156
Şekil 2.100.	Trabzon Burcuna ait Bütünsel Güncelleme ile elde edilen parametrelerin yüzdesel değişim grafiği.....	157
Şekil 2.101.	Trabzon Burcuna ait Yerel Güncelleme ile elde edilen Duyarlılık Analizi sonuçları.....	159
Şekil 2.102.	Trabzon Burcuna ait Yerel Güncelleme ile elde edilen parametrelerin değişim oranları	159
Şekil 2.103.	Yığma duvarlarda Yerel Güncelleme ile elde edilen elastisite modülü değişimleri	160
Şekil 2.104.	Taş kemer ve betonarme döşemelerde Yerel Güncelleme sonucunda elde edilen elastisite modülü değişimleri.....	161

TABLolar DİZİNİ

	Sayfa No
Tablo 1.1. B&K 8210 tipi darbe çekicisine ait bazı özellikler.....	24
Tablo 1.2. B&K 8340 ve B&K 4507 B 005 tipi tek eksenli ivmeölçerler ile B&K 4506 B003 tipi üç eksenli ivmeölçerlere ait bazı özellikler	26
Tablo 2.1. Boru kesitli çelik konsol kirişe ait malzeme özellikleri.....	49
Tablo 2.2. Analitik olarak elde edilen doğal frekansların karşılaştırılması ...	49
Tablo 2.3. Sonlu eleman analizleri sonucu elde edilen doğal frekans değerleri	51
Tablo 2.4. Deneysel olarak elde edilen frekansların karşılaştırılması.....	60
Tablo 2.5. Hasarlı ve hasarsız durumlar için analitik, sayısal ve deneysel yöntemlerle elde edilen doğal frekansların karşılaştırılması	61
Tablo 2.6. Hasarsız ve farklı hasar durumları için Model Güncelleme ile elde edilen frekans değerleri	84
Tablo 2.7. Sonlu eleman model güncellemesine ait parametre değişimleri...	86
Tablo 2.8. Kutu kesitli çelik konsol kirişin malzeme özellikleri	89
Tablo 2.9. Analitik olarak elde edilen doğal frekansların karşılaştırılması ...	89
Tablo 2.10. Sayısal olarak elde edilen frekansların karşılaştırılması	91
Tablo 2.11. Deneysel olarak elde edilen frekansların karşılaştırılması.....	100
Tablo 2.12. Hasarlı ve hasarsız durumlar için analitik, sayısal ve deneysel yöntemlerle elde edilen doğal frekansların karşılaştırılması	101
Tablo 2.13. Hasarsız ve farklı hasar durumları için model güncelleme ile elde edilen frekans değerleri	124
Tablo 2.14. Sonlu eleman model güncellemesine ait parametre değişimleri...	126
Tablo 2.15. Betonarme çerçeve sistemine ait malzeme özellikleri	128
Tablo 2.16. Betonarme düzlem çerçeve sisteminin hasarsız durumuna ait GFTAA ve SAB yöntemleriyle elde edilen frekans değerleri	134
Tablo 2.17. Betonarme düzlem çerçeve sisteminin hasarlı durumuna ait GFTAA ve SAB yöntemleriyle elde edilen frekans değerleri	138
Tablo 2.18. Betonarme düzlem çerçeve sistemine ait hasarlı ve hasarsız durumlar için deneysel olarak elde edilen frekansların karşılaştırılması	138
Tablo 2.19. Bütünsel Güncelleme için seçilen belirsiz parametreler ve sınır değerleri	140

Tablo 2.20.	Betonarme düzlem çerçeve sistemi için hasarsız durum dikkate alınarak elde edilen sayısal ve deneysel frekansların karşılaştırılması	141
Tablo 2.21.	Betonarme düzlem çerçeve sistemi için hasarsız durum dikkate alınarak elde edilen parametrelerin değişim sonuçları.....	142
Tablo 2.22.	Betonarme düzlem çerçeve sistemi için hasarsız durum dikkate alınarak Bütünsel Güncelleme ile deneysel olarak elde edilen frekans değerleri arasındaki farklılıklar	143
Tablo 2.23.	Hasarsız duruma ait Yerel Güncelleme ve deneysel olarak elde edilen frekansların karşılaştırılması	144
Tablo 2.24.	Başlangıç sonlu eleman modeli ile hasarlı duruma ait deneysel frekansların karşılaştırılması.....	146
Tablo 2.25.	Betonarme düzlem çerçeve sistemine ait hasarlı durum dikkate alınarak Yerel Güncelleme ve deneysel olarak elde edilen frekansların karşılaştırılması	147
Tablo 2.26.	Trabzon Burcuna ait başlangıç sonlu eleman modelinin malzeme özellikleri	151
Tablo 2.27.	Trabzon Burcuna ait deneysel olarak elde edilen frekans değerleri	154
Tablo 2.28.	Trabzon Burcuna ait başlangıç sonlu eleman analizleri ile deneysel ölçümlerden elde edilen frekans değerlerinin karşılaştırılması	155
Tablo 2.29.	Trabzon Burcuna ait Bütünsel Güncelleme için seçilen belirsiz parametreler ve sınır değerleri	156
Tablo 2.30.	Trabzon Burcuna ait Bütünsel Güncelleme ile elde edilen parametrelerin değişim oranları	157
Tablo 2.31.	Trabzon Burcuna ait Bütünsel Güncelleme ile deneysel olarak elde edilen frekansların karşılaştırılması	158
Tablo 2.32.	Trabzon Burcuna ait Yerel Güncelleme için seçilen belirsiz parametrelere ait sınır değerleri	158
Tablo 2.33.	Trabzon Burcuna ait Yerel Güncelleme ve deneysel olarak elde edilen frekansların karşılaştırılması	162

SEMBOLLER DİZİNİ

A_*	Durum matrisi
a_0, a_n, b_n	Fourier serisi katsayıları
$[C]$	Sönüm matrisi
C_{R_i}	Beklenen hata oranı
C_*	Sistem davranış matrisi
ÇTY	Çevresel Titreşim Yöntemi
D_*	Doğrudan iletişim matrisi
E	Elastisite modülü
FDF	Frekans Davranış Fonksiyonu
f_i	Frekans
F^d	Hasarlı durum için elde edilen fleksibilite matrisi
F^u	Hasarsız durum için elde edilen fleksibilite matrisi
f_d	Deneysel ölçümlerden elde edilen frekans değerleri
f_a	Analitik veya sayısal olarak elde edilen frekans değerleri
ΔF	Fleksibilite matris değişimi
G	Kayma modülü
GFTAA	Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma
GSY	Güç Spektral Yoğunluğu
$G_{xx}(j\omega)$	Etki sinyalinin Güç Spektral Yoğunluk Fonksiyonu
$G_{yy}(j\omega)$	Tepki sinyalinin Güç Spektral Fonksiyonunu
$[G]$	Kazanım matrisi
H	Ağırlaştırılmış hata fonksiyonu
\bar{H}	Kompleks eşleneği
$H(j\omega)$	Frekans davranış fonksiyonu
$H_{ik}(i\omega)$	Frekans davranış fonksiyonu
$[K]$	Rijitlik matrisi

k'	Kesmede düzeltme katsayısı
KMGK	Koordinat Modal Güvence Kriteri
[M]	Kütle matrisi
MGK	Modal Güvence Kriteri
P_j	Parametre değerleri
R_i	Tepki değerlerini
R_k	Artık değer fonksiyonu
[S]	Duyarlılık matrisi
SAB	Stokastik Altalan Belirleme
SEY	Sonlu Eleman Yöntemi
u_{ij}	Tekil vektörler
u_k	Belirgin etki sinyal vektörü
YK	Yakınsama Kriteri
$[Z]_{(i)}$	Transfer matrisi
ZTY	Zorlanmış Titreşim Yöntemi
ρ	Birim hacim ağırlık
θ_i	Çatlak kesitin fleksibilite katsayısı
$\{x(t)\}$	Yerdeğiştirme vektörü
$\{\dot{x}(t)\}$	Hız vektörü
$\{F(t)\}$	Kuvvet vektörü
$\{R^0\}$	Başlangıç modelin parametre vektörü
$\{P\}$	Güncellenen modelin parametre vektörü
$\{\Delta P\}$	Tasarım parametresi
$\{\Delta R\}$	Deneysel ve sayısal tepkileri arasındaki değişimi
$y(x,t)$	Enine doğrultuda oluşan yerdeğiştirme fonksiyonu
$\psi(x, t)$	Eğilmeden dolayı oluşan yerdeğiştirmenin eğimi
ϕ_{xi}	Analitik veya sayısal mod şekil vektörü
ϕ_{aj}	Deneysel mod şekil vektörü
ϕ_{ji}''	i. modun j. düğüm noktasına ait mod şekli eğriliği değeri

ϕ_{ji}	i. modun j. düğüm noktasındaki modal yerdeğiştirme değeri
$\phi_{ji}''^d$	Hasarlı duruma ait mod şekli eğrilik vektörü
ϕ_i	i. modun mod şekil vektörü
λ_k	Kutup fonksiyonu
Δ	Değişim oranı



1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Mühendislik yapılarının farklı malzeme özelliklerine sahip taşıyıcı sistem elemanlarında sıklıkla karşılaşılan hasar durumları, imalat aşamasında yapılan işçilik hataları, malzemenin zamanla yaşlanıp dayanım kaybetmesi, nem, korozyon, sıcaklık gibi çevresel etkiler, tasarım aşamasında dikkate alınmayan yüklemeler gibi nedenlerden dolayı ortaya çıkmaktadır. Yapılarda ve/veya bazı taşıyıcı sistem elemanlarında meydana gelen bu hasar durumları, ilgili yapının performansının azalarak deprem veya herhangi bir dinamik kuvvet altında beklenmedik yıkıcı sonuçların ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Hasar gören yapıların onarım-güçlendirme çalışmaları ile tekrar kullanım durumuna gelmesi ve yıkılan yapıların yeniden inşa edilmesi için çok büyük maddi kaynakların ayrılması gerekmektedir. Belirtilen bu maliyetleri azaltmanın yanında can ve mal kayıplarını da önlemek amacıyla, mühendislik yapılarının yapısal davranışlarının deneysel yöntemler kullanılarak izlenmesi ve gerektiği anda da çok küçük maddi kaynaklar harcanarak ilgili önlemlerin alınması önemlidir.

Yapı Sağlığı İzlemesi, farklı tür malzeme ve taşıyıcı sisteme sahip mühendislik yapılarının yapısal davranışlarının deneysel yöntemler ile birlikte sürekli izlenmesi, kontrol edilmesi, oluşabilecek değişimler göz önünde bulundurularak hasar tespiti yapılması esasına dayanan ve son yıllarda inşaat mühendisliği alanında yaygın kullanım alanı bulan bir yöntemdir. Literatürde bu yöntem, yıkıcı ve yıkıcı olmayan yöntemler olmak üzere başlıca iki kısma ayrılmaktadır. Yapılar üzerinde, deneysel ölçümlerden sonra herhangi bir hasarın meydana gelmesi istenmediğinden dolayı yıkıcı olmayan yöntemler tercih edilmektedir. Bu amaç doğrultusunda en yaygın kullanılan yöntem, Deneysel Modal Analiz Yöntemidir.

Yapıların mevcut durumlarına ait frekans, mod şekli ve sönüm oranı gibi dinamik karakteristikleri elde etmek için kullanılan Deneysel Modal Analiz Yöntemi, Çevresel Titreşim Yöntemi ve Zorlanmış Titreşim Yöntemi olarak ikiye ayrılmaktadır. Bu yöntemler kapsamında, seçilen yapı üzerine sonlu eleman analizleri sonucunda elde edilen modal hareket noktaları göz önünde bulundurularak hassas ivmeölçerler yerleştirilmektedir. İvmeölçerlerden gelen tekrarlı ve tekrarsız titreşim sinyalleri, veri

toplama ünitesinde toplanmakta ve güncel yazılımlar kullanılarak dinamik karakteristikler elde edilmektedir.

Deneysel yöntemler kullanılarak elde edilen dinamik karakteristiklerin, analitik ve sonlu eleman yöntemine dayalı sayısal yöntemlerle karşılaştırılması ve elde edilen farklılıkların sınır değerler içerisinde olup olmadığının belirlenmesi gerekmektedir. Ayrıca, farklı zaman aralıklarında gerçekleştirilen deneysel ölçüm sonuçlarının da kendi içerisinde değerlendirilmesi gerekmektedir. Çünkü dinamik karakteristikler yapının kütle ve rijitliğine bağlı olduğu için bu değerlerdeki değişim, oluşabilecek bir hasarın açık bir göstergesi olabilmektedir.

Çevresel titreşim verilerinin yorumlanmasına dayalı hasar tespiti için kullanılan yöntemler kapsamında belirtilen formül ve bağıntılar; frekans, mod şekli, modal yerdeğiştirmeler ve sönüm oranlarındaki değişimleri içermektedir. Bu parametrelerde meydana gelen farklılıklar dikkate alınarak, yapıda veya herhangi bir taşıyıcı sistem elemanında hasarın meydana gelip gelmediği, hasar oluşmuş ise hasarın yeri ve büyüklüğü hakkında detaylı bir bilgi edinilebilmektedir.

1.2.Hasar Tespiti Üzerine Yapılmış Çalışmalar

Çevresel titreşimlere dayalı hasar tespit yöntemleri, frekans, mod şekli ve sönüm oranı gibi dinamik karakteristiklerin değişimine dayanmaktadır. Yapılarda imalat aşamasında yapılan işçilik hataları, malzemenin zamanla yaşlanıp dayanım kaybetmesi, nem, korozyon, sıcaklık gibi çevresel etkiler, tasarım aşamasında dikkate alınmayan yüklemeler gibi nedenlerden dolayı yapının performansının azalarak deprem veya herhangi bir dinamik kuvvet altında yıkıcı sonuçların ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, mühendislik yapılarının yapısal davranışlarının deneysel yöntemler kullanılarak periyodik veya sürekli olarak incelenip hasarın erkenden tespit edilmesi gerekmektedir. Rytter (1993) hasar tespitiyle ilgili dört ayrı seviye sınıflandırması yapmıştır:

1. *Seviye:* Yapıda hasarın var olup olmadığının belirlenmesi
2. *Seviye:* Hasar varsa hasar bölgesinin belirlenmesi
3. *Seviye:* Hasar şiddetinin belirlenmesi
4. *Seviye:* Yapının kalan ömrünün belirlenmesi

Hasar tespiti üzerine analitik, sayısal ve deneysel yöntemlere dayalı birçok araştırma gerçekleştirilmiştir. Analitik veya matematik modellere dayalı gerçekleştirilen

çalışmalarda, hasarın olup olmadığı ve/veya hasar var ise hasar bölgesinin tespit edilmesi kesin çözümler kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Sonlu eleman yöntemine dayalı sayısal yöntemlerde ise, farklı hasar durumlarına bağlı olarak dinamik karakteristiklerin değişimlerinden hasar durumu ve büyüklüğü yaklaşık olarak değerlendirilebilmektedir. Deneysel yöntemler ise yapılar üzerine direk uygulandığından dolayı mevcut davranışın belirlenmesinde en gerçekçi sonuçları vermektedir. Bu yöntemde, hasarlı ve hasarsız durumlar için gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda elde edilen dinamik karakteristikler birbirleriyle karşılaştırılmakta ve belirlenen frekans değerleri ile mod şekilleri yorumlanarak hasar durumları ve bölgeleri hakkında değerlendirmeler yapılabilmektedir. Farklı tip malzeme ve taşıyıcı sisteme sahip mühendislik yapılarında ve/veya taşıyıcı sistem elemanlarında, analitik, sayısal ve deneysel yöntemler kullanılarak gerçekleştirilen başlıca çalışmalar aşağıda özetlenmektedir.

Adams vd. (1975), kompozitlerle güçlendirilmiş plastik malzemelerdeki hasar bölgelerinin, sönüm oranının artması ve rijitliğin azalmasıyla tespit edilebileceğini göstermişlerdir.

Lin (1990), yüksek frekanslı modların rijitlik matrisi üzerindeki etkisinin büyük olduğunu göstermiştir. Deneysel olarak elde edilen rijitlik matrisini analitik çözüme yakın elde etmek için, yüksek frekanslı modların dikkate alınması gerektiğini vurgulamıştır. Fakat deneysel cihazların sınırlı kapasitelerinden olayı hasar tespiti için rijitlik matrisinin bulunmasında uygulamanın önemli bir eksiklik olduğu ifade edilmiştir.

Srinivasan ve Kot (1992), kabuk türü yapılarda hasarlı ve hasarsız durumlar için elde edilen mod şekillerinin, hasar durumlarının değerlendirilmesinde frekans değişimine oranla daha iyi sonuçlar verdiğini göstermişlerdir. Bu değişimler, hasarlı ve hasarsız durumlar için elde edilen mod şekilleri arasındaki Modal Güvence Kriteri (MGK) değerlerini karşılaştırarak verilmiştir.

Salawu ve Williams (1994), mod şekillerinden elde edilen modal yerdeğiştirme değerlerini merkezi fark yaklaşımında kullanarak mod şekli eğriliklerini elde etmişlerdir. Çalışmada, analitik olarak iyi sonuçlar elde edilmesine rağmen deneysel verileri kullanarak mod şekil eğriliklerinin iyi sonuç vermediği belirtilmiştir. Bunun en önemli nedeninin analizlerde dikkate alınan modların seçiminden kaynaklandığı ifade edilmiştir. Ayrıca, mod şekli eğrilik yönteminin büyük yapılara uygulanması sırasında ivmeölçer sayının yeterli sayıda seçilmesinin gerektiği de vurgulanmıştır.

Pandey ve Biswas (1994), konsol, basit ve iki ucu serbest kirişler için hasarlı ve hasarsız durumlar ile farklı sınır koşullar altında fleksibilite matrisindeki değişimi incelemiştir. Çalışma kapsamında, Modal Fleksibilite Yöntemi ile maksimum eğilme momentinin olduğu kesit bölgelerinde yöntemin daha etkili sonuçlar verdiği vurgulanmıştır. Fakat hasarın küçük olması durumunda ise yöntemin istenildiği ölçüde verimli çalışmadığı ifade edilmiştir.

Toksoy ve Aktan (1994), deneysel ölçüm sonuçlarını kullanarak bir köprünün fleksibilite matrisini hesaplamış ve referans veriler olmadan kesitlerdeki dönme rijitliklerini incelemiştir. Çalışma sonunda, referans verileri olmadan kesitlerde oluşan çok büyük dönme rijitliklerinin hasarı gösterebileceğini ifade etmişlerdir.

Lee ve Chung (2000), hasarlı bir konsol kirişteki frekans verilerini kullanarak hasar bölgesinin yerini gösteren bir yöntem geliştirmişlerdir. Çalışmada, konsol kirişin ilk dört doğal frekansı için, Armonun Sıralı Yöntemi ile birlikte hasarın yerini yaklaşık olarak tespit etmiş ve hasarın büyüklüğünü belirlemek için de yaklaşık bir sonlu eleman modeli oluşturmuşlardır. Frekansa ve çatlak büyüklüğüne bağlı Gudmundson denklemini kullanarak gerçek hasarın yerini de bulmuşlardır. Çalışma sonunda, yöntemin hasar büyüklüğü ve yeri için sırasıyla yaklaşık %25 ve %12 oranında hatalı sonuç verdiğini göstermişlerdir.

Brownjohn vd. (2001), Duyarlılığa Bağlı Model Güncelleme Yöntemi'ni kullanarak, laboratuvar ortamında inşa edilen bir köprü modelinin yapısal durumunu değerlendirmişlerdir. Çalışmada, sonlu eleman modelinin göstereceği davranışın, yapıdaki parametrelere bağlı olduğu ve belirsiz parametrelerin doğru seçilmesi gerektiği belirtilmiş olup, bu durumun sağlanamaması halinde güncellenen sonlu eleman modelinin yapının gerçek davranışını temsil etmeyeceği vurgulanmıştır. Laboratuvar modeli üzerinde hasarlı ve hasarsız dinamik karakteristikler Deneysel Modal Analiz yöntemiyle elde edilmiştir. Sonlu eleman yöntemiyle sayısal ve deneysel olarak elde edilen dinamik karakteristikler üzerinde duyarlılık analizi de gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonunda, güncellenen sonlu eleman modeli üzerinde hasar durumları değerlendirilmiştir.

Peter ve Karsten (2001), iki katlı bir binanın çevresel titreşim verilerini kullanarak dinamik yük altında oluşabilecek hasarların tespiti için sonlu eleman yöntemine dayalı bir yöntem geliştirmişlerdir. Çalışmada, Duyarlılık Analizi kullanılarak birçok hasar parametreleri formüle edilmiştir. Değerlendirilen parametre, hasar bölgeleriyle ilgili olduğu için alt gruplara ayrılmıştır. Çalışmada, yöntemin hasarlı bölgelerin yerini tam

olarak tespit etmesine rağmen, hasar olmayan bazı bölgelerde de hasarlı bölge tespiti yaptığı belirtilmiştir. Bu durumun sinyal işlenmesinden oluşabilecek gürültü sinyalleri, modelleme hataları veya plastik şekildeğiştirmeden meydana gelebilecek geometrik değişimlerden kaynaklanabileceği ifade edilmiştir. Ayrıca, simülasyon çalışmaları sırasında ivmeölçer sayısının sonuçların doğruluğuyla ilgili olduğu da vurgulanmıştır. İvmeölçerlerin yeri ve sayısının Fisher bilgi matrisinden elde edilebileceği ifade edilmiştir.

Yip vd. (2002), bir fabrika binası üzerinde gerçek zamanlı optimizasyona dayalı bir model güncelleme yöntemi üzerinde çalışmışlardır. Çalışmada, gerçek zamanlı optimizasyonun akış şeması, optimum çözüm için kullanılan yöntem ve model güncelleme için tekli ve çoklu veri setleri detaylı olarak açıklanmış olup, uygulamadaki problemlerinde sunulmuştur. Ayrıca, çoklu veri setleri kullanılarak, model güncelleme için kullanılan yaklaşım da gösterilmiştir. Bu yaklaşımın, filtreleme ve parametrelerin gözlenebilirliği olmak üzere iki avantajı bulunmaktadır. Filtreleme özelliği, çoklu veri setlerinden dolayı belirsiz parametrelerin değişimini azaltmaktadır. Parametrelerin gözlenebilirliği ise farklı koşullarda çoklu veri setleri kullanılarak parametrelerdeki değişimi tahmin etmek için kullanılmaktadır. Çalışma sonunda, binanın model güncelleme yöntemi ile tekli ve çoklu veri setleri kullanılarak gerçek zamanlı optimizasyon yardımıyla yapısal durumu değerlendirilmiştir.

Ren ve Deroeck (2002a-2002b), frekans ve mod şekillerindeki değişimleri kullanarak sonlu eleman yöntemine dayalı bir hasar tespit yöntemi geliştirmişlerdir. Çalışmada, sunulan yöntemle ait çözüm teknikleri anlatılmış ve sonuçlar tartışılmış olup, tekil değer ayrışmasına (TDA) dayanan TDA-R yönteminin en etkili yöntem olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca, yöntemin kullanılabilirliği için farklı hasar durumlarındaki basit ve sürekli kirişler için sayısal çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, yöntemin etkinliği laboratuvar ortamında üretilen betonarme kiriş modelleri üzerinde de gösterilmiştir.

Kao ve Hung (2003), yapısal hasarları tespit etmek için yapay sinir ağlarına dayalı bir yaklaşım sunmuşlardır. İlk olarak, yapıya ait hasarlı ve hasarsız durumları tanımlamak için sinir sistem tanımlama ağları (SSTA) kullanılmıştır. Bu yöntemle yapının dinamik karakteristiklerine ait frekans değerleri elde edilmiştir. Çalışmada, yapıdaki hasarlı ve hasarsız durumlara ait hasar tespiti için yapıya ait frekans ve modal yerdeğiştirmeler karşılaştırılmıştır. Çalışma sonunda, yöntemin yapısal hasar tespitinde kullanılabilirliğini analitik ve deneysel olarak göstermişlerdir.

Wu ve Li (2004), Çin'de bulunan ve 310m yüksekliğindeki Nanjing televizyon kulesinin sonlu eleman modelini duyarlılığa bağlı yöntemler kullanılarak güncellemişlerdir. Çalışmada, altı farklı sonlu eleman model güncelleme yöntemi kullanılmış olup, elde edilen sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmış ve yüksek yapılar için En Küçük Kareler Metodu ile Bayesian Parametre Tahmin Metodu'nun daha yakın sonuçlar verdiği ifade edilmiştir.

Hamey vd. (2004), hasarlı kompozit kirişler üzerinde dört farklı hasar tespit algoritmasını (Mutlak Fark Yöntemi (MFY), Eğrilik Hasar Faktörü (EHF), Hasar İndeks Yöntemi (HIY), Frekans Tepki Fonksiyonu Eğrilik Yöntemi (FEY)) değerlendirmişlerdir. Çalışma sonunda, modal eğriliğe dayalı metotların hasar tespitinde kullanılabileceği ve Hasar İndeks Metodunun diğer metotlara göre daha iyi sonuç verdiği ifade edilmiştir.

Loutridis vd. (2004), iki çatlaklı konsol kirişte Dalgacık Dönüşümü Yönteminin uygunluğunu test etmişlerdir. Dalgacık Dönüşümü Yönteminde hasardan dolayı oluşan yapısal davranışın ve yerel bozulmaları elde edebileceği gösterilmiştir. Çalışmada, plastik cam malzemeli dikdörtgen kesitli konsol kirişte deneysel ve sayısal olarak yöntemin kullanılabilirliğini test edilmiştir. Çalışma sonunda, ölçüm hataları, gürültü sinyalleri dalgacık katsayısı ve ölçüm sonuçlarını etkilese de iki çatlaklı konsol kirişin hasar bölgesinin yerinin tespit edilebildiği fakat hasar şiddetinin ölçüm ve belirsizlik hatalarından dolayı belirlenmesinin zor olduğunu vurgulanmıştır.

Dutta ve Talukdar (2004), çok açıklıklı köprüler için hasarlı ve hasarsız durumlardaki frekans, mod şekilleri ve eğriliklerindeki değişimini incelemişlerdir. Hasar tespiti için mod şekillerinin daha az hassas olduğu ve mod şekilleri yerine mod şekli eğriliklerini kullanarak hasar bölgesinin daha iyi tespit edileceği gösterilmiştir. Ayrıca, çoklu hasar durumundaki yapıların hasar tespitinde, dikkate alınacak mod sayısının oldukça önemli olduğu vurgulanmıştır.

Jaishi ve Ren (2005), 6m uzunluğundaki hasarlı bir basit kiriş ile 90m uzunluğundaki çelik bir kemer köprünün duyarlılığa bağlı otomatik model güncellemesini gerçekleştirmişlerdir. Model güncelleme sırasında belirsiz parametrelere ait Duyarlılık Analizi için Özdeğer Duyarlılık Yöntemini, kütle normalleştirilmesi ve mod şekillerini bulmak için ise Guyan Azaltma Yöntemini kullanmışlardır. Çalışma sonunda, sonlu eleman modeli ve deneysel sonuçlar arasındaki farklılıkların, model güncelleme ile birlikte istenilen seviyelere kadar azaltıldığı ve güncellenen modellerin uygulama için seçilen örneklerin mevcut durumlarını daha iyi bir şekilde yansıttığı belirtilmiştir.

Yan ve Golinval (2005), bir uçak modeli üzerinde modal parametrelerden elde edilen esneklik matrisini, Ortak Değişkenli Altalan Yöntemi ile hesaplamışlardır. Hasarlı ve hasarsız modeller arasındaki rijitlik matrisine ait diyagonal verilerdeki değişimler kullanılmıştır. Bu yöntemin en önemli dezavantajının ise yeterli sayıda ivmeölçer sayısının kullanılmasının gerektiği ve yapılarda oluşabilecek küçük ve yapısal olmayan hasarların elde edilmesinde etkin olmadığı vurgulanmıştır.

Nasser vd. (2005), sıcaklık değişiminin modal parametreler üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışmada, sıcaklık etkisiyle yapı üzerindeki dinamik karakteristiklerinin ve eğilme rijitliğinin nasıl değiştiğini incelemiştir. Çalışma sonunda, istatistiksel yöntemler kullanılarak sıcaklık etkisiyle modal parametreler üzerinde meydana gelen değişimler karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir.

Huth vd. (2005), hasarlı öngermeli betonarme köprüler üzerinde deneysel ölçüm verilerini kullanarak çevresel titreşim sonuçlarına dayalı yedi farklı hasar tespit yöntemini karşılaştırmışlardır. Çalışmada, öngermeli köprülerdeki hasar şiddeti arttığında frekans ve mod şekillerinde önemli değişiklikler olduğu görülmüştür. Fakat mod şekilleri arasındaki rölatif farkın frekans değerleri arasındaki farktan daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca çalışma kapsamında, mod şekillerine dayalı Mod Şekli Alan İndeks Yöntemini geliştirmişlerdir. Yöntemin kullanılabilirliği test edilmiş, fleksibilite matrisinin değişimiyle elde edilen hasar tespit yönteminin frekans veya mod şekillerine göre daha iyi sonuç verdiği ifade edilmiştir.

Liv vd. (2006), Gabor dalgacık yayılımına dayanan bir hasar tespit yöntemi geliştirmişlerdir. Hasar tespit yöntemini, sayısal ve deneysel olarak plastik cam kesitli konsol giriş modeli üzerinde uygulamışlardır. Çalışmada, hasar bölgesinin yerinin yanı sıra çatlak yönlerinin de bulunabileceği ifade edilmiştir. Dalgacıklar arasındaki ilişkiler düşünülerek, çatlakların yansıtma ve yayılma oranlarıyla hasarın şiddetinin tespit edilebileceği de gösterilmiştir.

Deng ve Cai (2010), 6m uzunluğundaki basit bir giriş ile 50m uzunluğundaki I kesitli bir karayolu köprüsünün tepki yüzeyi yöntemini kullanarak genetik algoritma ile birlikte sonlu eleman model güncellemesini yapmışlardır. Tepki yüzey yöntemi, yapının tepki ve parametreleri arasındaki belirgin ilişkisini bulmak için kullanılmıştır. Çalışma sonunda, basit girişin ve köprünün sonlu eleman modelinin otomatik model güncellemesi yapılarak, genetik algoritmanın model güncelleme yöntemleri arasındaki kullanılabilirliği gösterilmiştir.

Gökdağ (2010), ortogonal ve süreklilik dalga dönüşümüne dayalı iki hasar tespit yöntemi geliştirmiştir. Yöntemde, yapıda sadece hasarlı mod göz önüne alınarak, bu modun yaklaşık bir fonksiyonu oluşturulmuştur. Süreklilik dalga dönüşümü yönteminde hem hasarlı mod hem de yaklaşık fonksiyonlar hesaplanabilmektedir. Çalışma sonunda, yöntemlerde ankastre kirişler için kötü sonuçlar elde edilmesine rağmen mafsallı bağlantılarda ilgili yöntemlerin uygulanabilirliği gösterilmiştir.

Huang vd. (2012), bina türü yapılarda frekans tepki fonksiyonuna (FTF) ve yarı aktif sönüme dayanan hasar tespit yöntemleri geliştirmişlerdir. Bu yöntemler, FTF'ye dayalı olan Tam ve Tek Çıkış Yöntemler olarak adlandırılmıştır. Çalışmada, 5 katlı bir bina sonlu eleman yöntemiyle sayısal olarak incelenmiştir. Çalışma sonunda, FTF'ye dayalı bu yöntemlerde hasarın yerinin ve şiddetinin tespitinde maksimum hata oranının %1-2 seviyelerinde olduğu gösterilmiştir. Ayrıca, deneysel olarak yapılardaki rijitliğin belirlenmesinde FTF'ye dayalı yöntemlerin frekans ve mod şekillerine dayalı yöntemlere göre daha doğru sonuçlar verdiğini de ifade edilmiştir.

Fotia vd. (2012), İtalya'daki tarihi bir yapının durumunu belirlemek ve performansını tahmin etmek için istatistiksel model güncelleme yöntemini kullanmışlardır. Yapının tarihi bir özelliğe sahip olmasından dolayı, analizlerde homojen olmayan malzeme karakteristikleri dikkate alınmıştır. Sonlu eleman model güncellemesi için, belirsiz parametre olarak elastisite modülü ve birim hacim ağırlığı kullanılmıştır. Çalışma kapsamında, her iki yöntemle elde edilen dinamik karakteristikleri birbirleriyle karşılaştırılmış olup, elde edilen sonuçlar güncellenip tarihi yapının yapısal davranışı durumu değerlendirilmiştir.

Sanayei ve Rohela (2014), otomatik model güncelleme için optimizasyon tekniklerini kullanarak Parametre Belirleme Sistemi (PARIS) isiminde yeni bir yazılım geliştirmişlerdir. Yazılım, MATLAB programında hazırlanmış olup, SAP2000 sonlu eleman analiz programıyla da etkileşimli olarak çalışabilmektedir. Üç farklı yapı için hasarsız durum ve çeşitli hasar durumları dikkate alınarak çalışmalar gerçekleştirilmiş ve yazılımın güvenilirliği teyit edilmiştir.

Chen vd. (2014), Yeni Zelanda'da bulunan ve üzerinde uzun süreli yapı sağlığı izleme sistemi bulunan Newmarket Viyadüğü'nün sonlu eleman modelini çevresel titreşim verilerini kullanarak güncellemişlerdir. 20m uzunluğunda ki olan Newmarket Viyadüğünün başlangıç sonlu eleman modeline ait malzeme özellikleri, laboratuvar deneyleri, proje dökümanları ve saha incelemeleri sonucunda belirlenmiştir. Altmış adet

kablosuz sensör ile birlikte sürekli olarak izlenen köprü, yüksek yoğunluklu üç boyutlu mod şekilleriyle haritalandırılmaktadır. Elde edilen uzun süreli veriler doğrultusunda köprünün otomatik model güncellemesi yapılmış olup, köprüye ait anlık performanslar ve durumlar incelenmiştir.

Zordan vd. (2014), Douglas-Reid metodu ile Rosenbrock optimizasyon algoritmasını kullanarak, İtalya'da bulunan ve çelik taşıyıcı sisteme sahip Canonica Köprüsü'nün sonlu eleman modelini oluşturmuşlardır. Köprünün frekans tanım aralığında çevresel titreşim analizleri yapılarak ilk sekiz mod şekli elde edilmiştir. MIDAS programı kullanılarak köprünün sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Model güncellemesinde kullanılacak olan belirsiz parametrelerin seçiminde, Duyarlılık Analizi yapılmış olup, seçilen sekiz parametrenin frekans değişiminde oldukça önemli olduğu belirtilmiştir. Çalışma sonunda, frekanslar arasındaki maksimum farkın %8.16'dan %3.50'e azaltıldığı, Modal Güvence Kriteri de %73.05'ten %96.15'e seviyelerine yükseltildiği belirtilmiştir.

Jin vd. (2015), farklı çevresel koşullar altında çok değişkenli istatistiksel analizlerde kullanılan Uyarlanabilir Referans Güncelleme Yöntemiyle birlikte, basit bir kiriş üzerinde otomatik model güncelleme çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen sonuçlar, geleneksel yakınsama yöntemlerden biri olan sabit referans düzeniyle karşılaştırılmıştır. Çalışma başlıca, i) durağan çevre koşulları altında lineer davranış, ii) durağan olmayan çevre koşulları altında lineer davranış ve iii) durağan olmayan çevre koşulları altında bi-lineer davranış aşamalarından oluşmaktadır. Çalışma sonucunda, uyarlanabilir referans güncelleme yöntemiyle elde edilen sonuçların geleneksel yöntemle göre gerçek sonuçlara daha fazla yakınsadığı vurgulanmıştır.

Boulkaibet vd. (2015), simetrik olmayan H kesitli bir kirişin ve uzay havacılığında kullanılan SM-AG19 tipi bir modelin Gölge Hibrit Monte Carlo yöntemi ile model güncellemesi üzerinde çalışmışlardır. Gölge Hibrit Monte Carlo yöntemi, Hibrit Monte Carlo yönteminin geliştirilmiş halidir. Numune alma tekniklerinden bir tanesi de Markov-Zincir Monte Carlo yöntemi olup, bu yöntem daha fazla belirsiz parametreler altında çözümü zorlaştırmaktadır. Bu amaç doğrultusunda çalışmada bazı sınırlandırmadan dolayı Gölge Hibrit Monte Carlo algoritması kullanılmıştır.

Sanayei vd. (2015), laboratuvar ortamında inşa edilen çelik köprü modeli üzerinde çevresel titreşim ölçümleri yardımıyla Çok Tepkili Yapısal Parametre Tahmin Yöntemini kullanarak köprü modelinin sonlu eleman modelini otomatik olarak güncellemişlerdir.

Sun ve Büyüköztürk (2016), laboratuvar ortamında sekiz ve on katlı modellerin istatistiksel model güncellemesini yapmışlardır. Markov Zinciri Monte Carlo yöntemi ile birlikte seçilen yapının hangi parametreler altında nasıl davranış gösterdiği sunulmuştur. Belirtilen algoritma, laboratuvar ortamında oluşturulmuş modeller kullanılarak doğrulanmıştır. Çalışma sonunda, ilgili algoritmanın istatistiksel model güncellemede oldukça etkili bir algoritma olduğu belirtilmiş olup, daha karmaşık yapılarda da uygulanabilirliği hakkında değerlendirmelerde bulunulmuştur.

1.3. Tezin Amacı ve İçeriği

Literatüre bakıldığında, analitik, sonlu eleman ve deneysel yöntemler kullanılarak hasar tespiti üzerine yapılmış çok sayıda çalışma olduğu görülmektedir. Bu çalışmalarda, farklı hasar tespit algoritmaları geliştirilmiş ve test edilmiştir. Fakat hasarın ve ilgili hasar bölgesinin analitik, sayısal ve deneysel yöntemlerle elde edilmesi ve hasar tespit üzerine geliştirilen algoritmalar arasındaki farklılıkların karşılaştırılması olarak irdelenmesi hakkında yeterli bir çalışmanın olmadığı görülmektedir.

Literatüre katkı sağlayacağı düşünülen bu tez çalışmasında, farklı taşıyıcı sisteme ve malzeme özelliğine sahip mühendislik yapılarında yapısal hasarların analitik, sayısal ve deneysel yöntemlerle elde edilmesi ile çevresel titreşimlere dayalı beş farklı hasar tespit algoritması kullanılarak elde edilen sonuçların karşılaştırılması olarak irdelenmesi amaçlanmaktadır. Bu amaç doğrultusunda, boru ve kutu kesite sahip çelik konsol kiriş modeller, betonarme düzlem taşıyıcı çerçeve modeli ve Trabzon ili sınırları içerisinde yer alan ve yığma taşıyıcı sisteme sahip tarihi Trabzon Burcu üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda hazırlanan tez başlıca dört bölümden oluşmaktadır.

Birinci bölümde, genel bilgiler üzerinde durulmakta olup, bu bölümde hasar tespiti üzerine yapılmış çalışmalar ile analitik, Sonlu Eleman Yöntemi ve Deneysel Modal Analiz yöntemlerine ait formülasyonlar verilmektedir. Ayrıca, hasar tespiti amacıyla literatürde de yaygın olarak kullanılan Modal Güvence Kriteri, Koordinat Modal Güvence Kriteri, Mod Şekli Eğrilik Yöntemi, Modal Fleksibilite Yöntemi ve Duyarlılığa Bağlı Model Güncellemesi yöntemleri kullanılmıştır.

İkinci bölümde, yapılan çalışmalar ve bu çalışmalardan elde edilen bulgulara yer verilmekte olup, ilgili bölüm laboratuvar ve arazi çalışmaları olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. İlk kısımda, boru ve kutu kesite sahip çelik konsol kiriş modeller ile

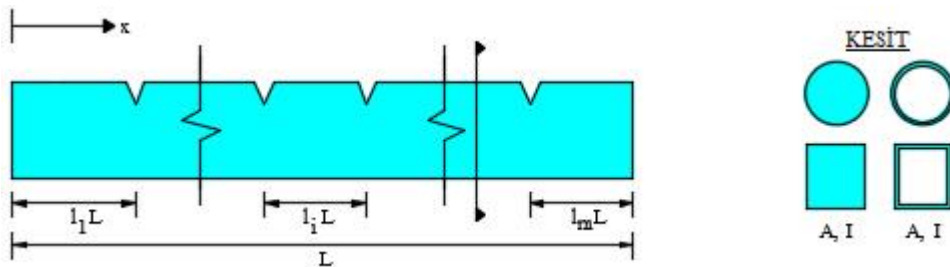
betonarme taşıyıcı sisteme sahip düzlem çerçeve sistem üzerinde farklı hasar durumu dikkate alınmış olup, her bir hasar durumunda dinamik karakteristiklerin değişimi ve hasar bölgelerinin tespiti analitik, sayısal ve deneysel yöntemlerle elde edilmiştir. İkinci kısımda ise Trabzon İli, Ortahisar İlçesi'nde yer alan ve yığma taşıyıcı sisteme sahip tarihi Trabzon Burcu'nun yapısal durumunun değerlendirilmesi amaçlanmaktadır.

Üçüncü bölümde, çalışmadan elde edilen sonuçlar ve öneriler maddeler halinde sunulmakta olup, son bölümde ise yararlanılan kaynaklar verilmektedir.

1.4. Analitik Yöntem Kullanılarak Dinamik Karakteristiklerin Elde Edilmesi

Elastik kirişlerin analizlerinde Euler-Bernoulli veya Timoshenko teorileri yaygın olarak kullanılmaktadır. Euler-Bernoulli teoreminde kesme şekildeğiştirmesi ihmal edilmekte ve düzlem kesitlerin uzama doğrultusunda normal ve düzlem kaldığı kabul edilmektedir. Timoshenko kiriş teoreminde ise, düzlem kesitler düzlem kalmakta ancak uzama doğrultusunda normal kalmamaktadırlar. Narin kirişlerde (kiriş uzunluğunun kesit yüksekliğinden çok fazla olması durumu) her iki yöntemde de iyi sonuç vermesine rağmen, yüksek kirişlerde Timoshenko kiriş teoremi gerçeğe daha yakın sonuç vermektedir. Bu nedenle, tez çalışması kapsamında Timoshenko Kiriş teoremine dayanarak, hasarsız ve hasarlı durum için konsol kirişlere ait dinamik karakteristikler Transfer Matris Yöntemi kullanılarak elde edilmiştir.

Şekil 1.1'de uzunluğu L , kesit alanı A , atalet momenti I , sağ ve sol kenarlarında sınır koşullarına ve farklı bölgelerde çatlaklara sahip Timoshenko kirişi şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 1.1. Farklı bölgelerde çatlaklara sahip Timoshenko kirişi

Burulma rijitliği ve kesme şekildeğiştirme etkisi dikkate alınarak Timoshenko kirişinin eğilme titreşimleri Hamilton prensibi yardımıyla aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir (Timoshenko vd., 1974).

$$k'G \left(\frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} - \frac{\partial \psi(x,t)}{\partial x} \right) - \rho \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} = 0 \quad (1.1)$$

$$EI \frac{\partial^2 \psi(x,t)}{\partial x^2} + k'GA \left(\frac{\partial y(x,t)}{\partial x} - \psi(x,t) \right) - \rho I \frac{\partial^2 \psi(x,t)}{\partial t^2} = 0 \quad (1.2)$$

Burada, $y(x,t)$ enine doğrultuda oluşan yerdeğiştirme fonksiyonunu, $\psi(x,t)$ eğilmeden dolayı kesit dönmesini, E elastisite modülünü, G kayma modülünü, ρ birim hacim ağırlığı ve k' ise kesit özelliklerine bağlı Timoshenko kesme katsayısını göstermektedir. y ve ψ ifadeleri denklem (1.1) ve (1.2)'den birbirinden ayrılırsa aşağıdaki gibi y ve ψ 'ye bağlı iki ayrı diferansiyel denklem elde edilmektedir.

$$EI \frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} - \rho I \left(1 + \frac{E}{k'G} \right) \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2 \partial x^2} + \frac{\rho^2 I}{k'G} \frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial t^4} = 0 \quad (1.3)$$

$$EI \frac{\partial^4 \psi(x,t)}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 \psi(x,t)}{\partial t^2} - \rho I \left(1 + \frac{E}{k'G} \right) \frac{\partial^2 \psi(x,t)}{\partial t^2 \partial x^2} + \frac{\rho^2 I}{k'G} \frac{\partial^4 \psi(x,t)}{\partial t^4} = 0 \quad (1.4)$$

Kısmi diferansiyel denklemlerin çözümü için değişken parametreler

$$y(x,t) = L U(x) e^{i\omega t} \quad (1.5)$$

$$\psi(x,t) = \psi(x) e^{i\omega t} \quad (1.6)$$

olarak birbirinden ayrılmaktadır. Burada, ω doğal frekansı, $U(x)$ ve $\psi(x)$ sırasıyla $y(x,t)$ ve $\psi(x,t)$ 'nin normal fonksiyonunu göstermektedir. Denklem (1.5) ve (1.6), Denklem (1.3) ve (1.4)'te yerine yazılıp düzenlenirse,

$$\xi = \frac{x}{L}, \quad \zeta = \frac{t}{\sqrt{L}}, \quad \vartheta = \frac{E}{k'G}, \quad r = \frac{I}{AL^2}, \quad s = \vartheta r, \quad \alpha = \frac{\rho A}{EI} L^4 \omega^2 \quad (1.7)$$

$$U^{iv}(\xi) + \alpha(r+s)U''(\xi) + \alpha(\alpha rs - 1)U(\xi) = 0 \quad (1.8)$$

$$\psi^{iv}(\xi) + \alpha(r+s)\psi''(\xi) + \alpha(\alpha rs - 1)\psi(\xi) = 0 \quad (1.9)$$

ifadeleri elde edilir. Sınır koşulları, Denklem (1.8) ve (1.9)'da yerine yazılarak ilgili denklemler çözülebilmektedir. Aşağıda belirtilen parametreler tanımlanarak Denklem (1.8) ve (1.9)'un genel çözümü,

$$a = \frac{\alpha(r+s)}{2}, \quad b = \alpha(\alpha rs - 1), \quad \beta_1 = \sqrt{\sqrt{a^2 - b} - a}, \quad \beta_2 = \sqrt{\sqrt{a^2 - b} + a} \quad (1.10)$$

$$m_1 = \frac{\alpha s + \beta_1^2}{\beta_1}, \quad m_2 = \frac{\alpha s - \beta_2^2}{\beta_2} \quad (1.11)$$

olmak üzere Denklem (1.8) ve (1.9)'un genel çözümleri

$$U(\xi) = A \cosh \beta_1 \xi + B \sinh \beta_1 \xi + C \cos \beta_2 \xi + D \sin \beta_2 \xi \quad (1.12)$$

$$\psi(\xi) = A m_1 \sinh \beta_1 \xi + B m_1 \cosh \beta_1 \xi + C m_2 \sin \beta_2 \xi - D m_2 \cos \beta_2 \xi \quad (1.13)$$

şeklindedir. Burada A, B, C, D terimleri bilinmeyen sabitlerdir. Denklem (1.12) ve (1.13) kirişin hasarsız olması durumu için geçerlidir. Şekil 1.1'deki gibi farklı bölgelerde çatlaklara sahip Timoshenko kirişinde, kirişin m tane elemana ayrıldığı düşünülmektedir. Her bir çatlak, $\xi_i = e_i$ olarak sembolize edilmektedir. Her eleman için hareket denklemi,

$$U_i^{iv}(\xi) + \alpha(r+s)U_i''(\xi) + \alpha(\alpha rs - 1)U_i(\xi) = 0, \quad e_{i-1} < \xi < e_i \quad (1.14)$$

$$\psi_i^{iv}(\xi) + \alpha(r+s)\psi_i''(\xi) + \alpha(\alpha rs - 1)\psi_i(\xi) = 0, \quad e_{i-1} < \xi < e_i \quad (1.15)$$

olarak ifade edilmektedir. Burada, U_i ve ψ_i sırasıyla her elemandaki enine doğrultuda oluşan yerdeğiştirme fonksiyonunu ve eğim fonksiyonunu göstermektedir. Bu şekilde, Denklem (1.14) ve (1.15)'in genel çözümü,

$$U_i(\xi - e_{i-1}) = A_i \cosh \beta_1(\xi - e_{i-1}) + B_i \sinh \beta_1(\xi - e_{i-1}) \\ + C_i \cos \beta_2(\xi - e_{i-1}) + D_i \sin \beta_2(\xi - e_{i-1}) \quad (1.16)$$

$$\begin{aligned} \psi_i(\xi) = & A_i m_1 \sinh \beta_1 (\xi - e_{i-1}) + B_i m_1 \cosh \beta_1 (\xi - e_{i-1}) \\ & + C_i m_2 \sin \beta_2 (\xi - e_{i-1}) - D_i m_2 \cos \beta_2 (\xi - e_{i-1}) \end{aligned} \quad (1.17)$$

olarak elde edilmektedir. Burada, A_i , B_i , C_i ve D_i i. elemanın bilinmeyen sabitlerini göstermektedir. Çatlaklı kesitte yerdeğiştirme, moment ve kesme kuvvetinin sürekliliğinin sağlanması için

$$U_{i+1} \Big|_{\xi=e_i} = U_i \Big|_{\xi=e_i} \quad (1.18)$$

$$\psi'_{i+1} \Big|_{\xi=e_i} = \psi'_i \Big|_{\xi=e_i} \quad (1.19)$$

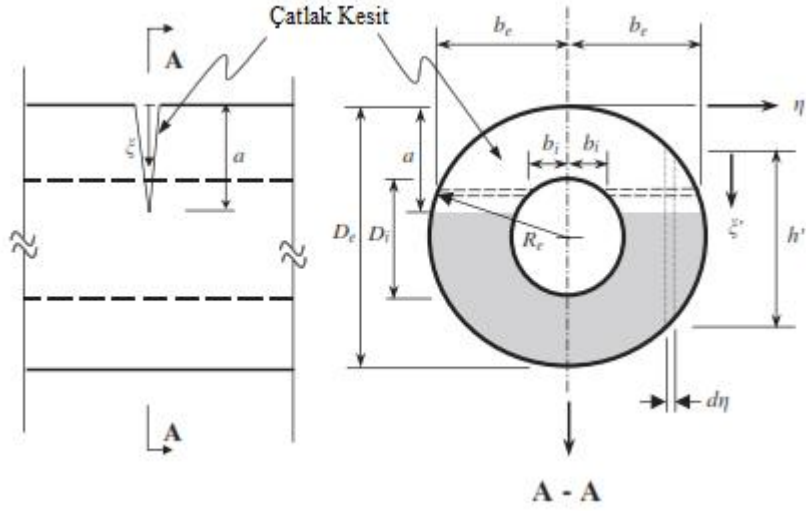
$$(U'_{i+1} - \psi_{i+1}) \Big|_{\xi=e_i} = (U'_i - \psi_i) \Big|_{\xi=e_i} \quad (1.20)$$

olmalıdır. Ayrıca, çatlak bulunan kesitte çatlağı temsilen dönül yay kullanılmıştır. Çatlaklı kesitin eğimindeki süreksizlik,

$$(U'_{i+1} - U'_i) \Big|_{\xi=e_i} = \theta_i \psi'_{i+1} \Big|_{\xi=e_i} \quad (1.21)$$

ile ifade edilir. Burada, θ_i çatlak derinliğine bağlı ve birimsiz çatlak kesit esnekliğini göstermektedir. Şekil 1.2 ve Şekil 1.3 boru ve kutu kesitte derin çatlağı (çatlağın, kesitin et kalınlığını geçmesi durumu) göstermekte olup, bu çatlak kesitlerine ait kesit esnekliği aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır (Zheng and Fan, 2003).

Boru kesitli malzemenin derin çatlaklı olması durumunda θ_i , F' , x' , β ve t parametreleri



Şekil 1.2. Boru kesitli kirişteki kesit çatlak (Zheng ve Fan, 2003).

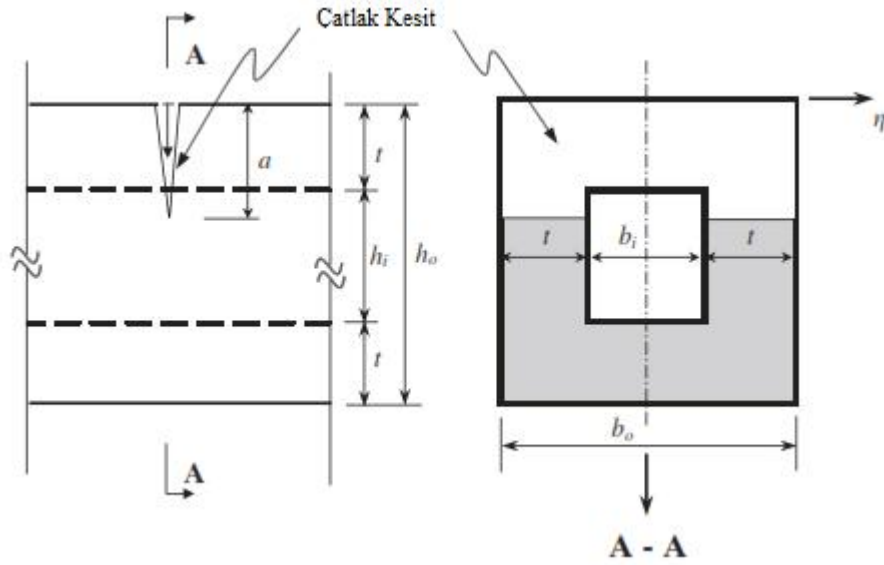
$$\theta_i = \frac{1024I}{\pi D_e^3 (1-\gamma^4)^2} \left(\int_0^{t/D_e} \int_{-\sqrt{x-x^2}}^{\sqrt{x-x^2}} + \int_{t/D_e}^{a/D_e} \int_{-\sqrt{x-x^2}}^{-\beta} + \int_{t/D_e}^{a/D_e} \int_{\beta}^{\sqrt{x-x^2}} \right) x \left\{ (1-4y^2) \left(2x + \sqrt{1-4y^2} - 1 \right) F'^2 dy dx \right\} \quad (1.22)$$

$$F' = \frac{\sqrt{2/\pi x' \tan \pi x'/2} \left[0.923 + 0.199(1 - \sin \pi x'/2)^4 \right]}{\cos \pi x'/2}, \quad (1.23)$$

$$x' = \frac{2x + \sqrt{1-4y^2} - 1}{2\sqrt{1-4y^2}}, \quad \beta = \sqrt{x-x^2 - (1-\gamma^2)/4}, \quad t = (D_e - D_i)/2 \quad (1.24)$$

olarak tanımlanmaktadır. Burada, a , D_e , D_i sırasıyla çatlak derinliği ile kesitin dış ve iç çaplarını göstermektedir.

Kutu kesitli kirişte derin çatlak olması durumunda ise θ_i , F ve r_t parametreleri



Şekil 1.3. Kutu kesitli kirişteki kesit çatlakları (Zheng ve Fan, 2003).

$$\theta_i = \frac{72\pi I}{h_0^3 [r_b - (r_b - 2r_t)(1 - 2r_t)^3]^2} \left\{ r_b \int_0^{r_t} x F^2 dx + 2r_t \int_{r_t}^{a/h_0} x F^2 dx \right\} \quad (1.25)$$

$$F = \frac{\sqrt{2/\pi} \tan(\pi x/2) \left[0.923 + 0.199 \left(1 - \sin(\pi x/2) \right)^4 \right]}{\cos(\pi x/2)} \quad (1.26)$$

$$r_t = t/h_0, \quad r_b = b_0/h_0, \quad (1.27)$$

olarak tanımlanmaktadır. Burada, a , t , b_0 , h_0 sırasıyla çatlak derinliğini, kesit kalınlığını, genişliğini ve yüksekliğini göstermektedir.

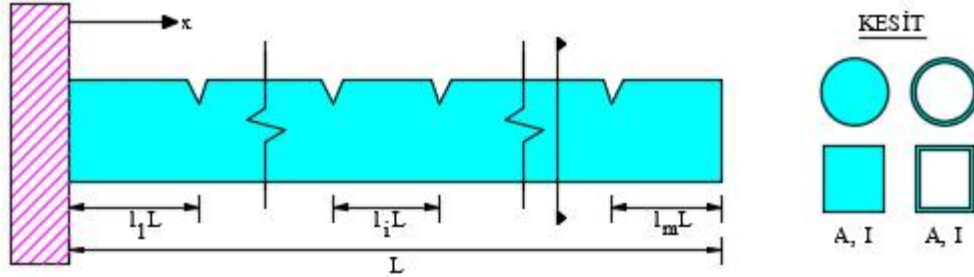
Denklem (1.18)-(1.21) kullanılarak, $(i+1)$. elemanındaki sabitler i . elemanındaki sabitlere bağlanmakta ve ilgili denklem,

$$\{A\}_{(i+1)} = [Z]_{(i)} \{A\}_{(i)} \quad (1.28)$$

olarak yazılmaktadır. Burada, $\{A\}_{(i)}$ ve $\{A\}_{(i+1)}$ sırasıyla kirişin i . ve $(i+1)$. elemanındaki bilinmeyen vektörlerini, $[Z]_{(i)}$ ise 4×4 transfer matrisini göstermektedir. z_{ij} , $[Z]_{(i)}$ transfer matrisinin bir bileşeni olmak üzere aşağıdaki şekilde elde edilmektedir.

$$\begin{aligned}
z_{11} &= \cosh \beta_1 l_1, \quad z_{12} = \sinh \beta_1 l_1, \quad z_{13} = 0, \quad z_{14} = 0, \\
z_{21} &= \frac{\beta_2 m_2}{\beta_2 m_1 + \beta_1 m_2} \left(\frac{\beta_1}{\beta_2} m_1 \theta_i \cosh \beta_1 l_1 + \frac{\beta_1}{\beta_2} \sinh \beta_1 l_1 + \frac{m_1}{m_2} \beta_1 \theta_i \cosh \beta_1 l_1 + \frac{m_1}{m_2} \sinh \beta_1 l_1 \right), \\
z_{22} &= \frac{\beta_2 m_2}{\beta_2 m_1 + \beta_1 m_2} \left(\frac{\beta_1}{\beta_2} m_1 \theta_i \sinh \beta_1 l_1 + \frac{\beta_1}{\beta_2} \cosh \beta_1 l_1 + \frac{m_1}{m_2} \beta_1 \theta_i \sinh \beta_1 l_1 + \frac{m_1}{m_2} \cosh \beta_1 l_1 \right), \\
z_{23} &= \frac{\beta_2 m_2}{\beta_2 m_1 + \beta_1 m_2} \theta_i (m_2 + \beta_2) \cos \beta_2 l_1, \quad z_{24} = \frac{\beta_2 m_2}{\beta_2 m_1 + \beta_1 m_2} \theta_i (m_2 + \beta_2) \sin \beta_2 l_1, \\
z_{31} &= 0, \quad z_{32} = 0, \quad z_{33} = \cos \beta_2 l_1, \quad z_{34} = \sin \beta_2 l_1, \\
z_{41} &= \frac{\beta_1 m_1}{\beta_2 m_1 + \beta_1 m_2} \theta_i (m_1 - \beta_1) \cosh \beta_1 l_1, \quad z_{42} = \frac{\beta_1 m_1}{\beta_2 m_1 + \beta_1 m_2} \theta_i (m_1 - \beta_1) \sinh \beta_1 l_1, \\
z_{43} &= \frac{\beta_1 m_1}{\beta_2 m_1 + \beta_1 m_2} \left(\frac{\beta_2}{\beta_1} m_2 \theta_i \cos \beta_2 l_1 - \frac{\beta_2}{\beta_1} \sin \beta_2 l_1 - \frac{m_2}{m_1} \beta_2 \theta_i \cos \beta_2 l_1 - \frac{m_2}{m_1} \sin \beta_2 l_1 \right), \\
z_{44} &= \frac{\beta_1 m_1}{\beta_2 m_1 + \beta_1 m_2} \left(\frac{\beta_2}{\beta_1} m_2 \theta_i \sin \beta_2 l_1 + \frac{\beta_2}{\beta_1} \cos \beta_2 l_1 - \frac{m_2}{m_1} \beta_2 \theta_i \sin \beta_2 l_1 + \frac{m_2}{m_1} \cos \beta_2 l_1 \right)
\end{aligned} \tag{1.29}$$

Bu tez çalışması kapsamında konsol kirişler için analitik çözümler gerçekleştirilmiştir. Şekil 1.4'te farklı bölgelerde çatlakları bulunan konsol kirişe ait bilgiler gösterilmektedir.



Şekil 1.4. Farklı bölgelerde çatlaklara sahip konsol Timoshenko kirişi

Şekil 1.4'de gösterilen konsol kiriş için sınır koşulları

$$U_1 \Big|_{\xi=0} = 0 \tag{1.30}$$

$$\psi_1 \Big|_{\xi=0} = 0 \tag{1.31}$$

$$\psi_n' \Big|_{\xi=1} = 0 \tag{1.32}$$

$$(U_n' - \psi_n) \Big|_{\xi=1} = 0 \tag{1.33}$$

şeklindedir. Denklem (1.30) ve (1.31) ifadeleri Denklem (1.16) ve (1.17)'de yerine yazılırsa

$$\begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & m_1 & 0 & -m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_1 \\ B_1 \\ C_1 \\ D_1 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} - \\ - \end{bmatrix} \{A\}_{(1)} \quad (1.34)$$

ifadesi elde edilmektedir. Ayrıca serbest uca sahip sağ kenarın sınır koşulları düşünülerek, m. elemanın bilinmeyen sabitleri, aşağıda belirtilen ifadeler kullanılarak ilk elemanın sabitlerine bağlı olarak ifade edilebilmektedir.

$$\begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1 \beta_1 \cosh \beta_1 l_m & (\beta_1 - m_1) \sinh \beta_1 l_m \\ m_1 \beta_1 \sinh \beta_1 l_m & (\beta_1 - m_1) \cosh \beta_1 l_m \\ m_2 \beta_2 \cos \beta_2 l_m & -(\beta_2 + m_2) \sin \beta_2 l_m \\ m_2 \beta_2 \sin \beta_2 l_m & (\beta_2 + m_2) \cos \beta_2 l_m \end{bmatrix}^T \times \begin{Bmatrix} A_m \\ B_m \\ C_m \\ D_m \end{Bmatrix} = [\Lambda]_{(m)} \{A\}_{(m)} \quad (1.35)$$

$$\{A\}_{(n)} = \left[\prod_{i=1}^{n-1} [Z]_{(i)} \right] \{A\}_{(1)} \quad (1.36)$$

$$\left[\prod_{i=1}^{n-1} [Z]_{(i)} \right] = \{Z\}_{(1)} \{Z\}_{(2)} \{Z\}_{(3)} \cdots \{Z\}_{(n-1)} \quad (1.37)$$

$$\{A\}_{(m)} = \left[\prod_{i=1}^{m-1} [Z]_{(i)} \right] \{A\}_{(1)} \quad (1.38)$$

Problemin çözümü için aşağıda belirtilen dördüncü dereceden determinanı,

$$\begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{\Lambda}_{11} & \bar{\Lambda}_{12} & \bar{\Lambda}_{13} & \bar{\Lambda}_{14} \\ \bar{\Lambda}_{21} & \bar{\Lambda}_{22} & \bar{\Lambda}_{23} & \bar{\Lambda}_{24} \\ \bar{\Lambda}_{31} & \bar{\Lambda}_{32} & \bar{\Lambda}_{33} & \bar{\Lambda}_{33} \\ \bar{\Lambda}_{41} & \bar{\Lambda}_{42} & \bar{\Lambda}_{43} & \bar{\Lambda}_{44} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_1 \\ B_1 \\ C_1 \\ D_1 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} - \\ - \\ - \\ - \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_1 \\ B_1 \\ C_1 \\ D_1 \end{Bmatrix} = [\Lambda_T] \{A\}_{(1)} \quad (1.39)$$

olarak ifade edilmektedir. Burada,

$$[\Gamma] = [\Lambda]_{(m)} \left[\prod_{i=1}^n [Z]_{(i)} \right] \quad (1.40)$$

olarak ifade edilmektedir. Timoshenko kirişine ait doğal frekansları elde etmek için, Denklem (1.39)'daki transfer matrisi ifadesinin determinantının sıfıra eşit olması gerekmektedir.

$$\det[\Lambda_T] = 0 \quad (1.41)$$

Bu determinantın verdiği karakteristik denklemin kökleri yardımıyla doğal frekanslar elde edilir.

1.5. Sonlu Eleman Yöntemiyle Dinamik Karakteristiklerin Elde Edilmesi

1.5.1. Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması

Model kelimesi bir nesnenin ölçeklendirilmiş kopyası veya temsili anlamına gelmektedir. Bir yapının davranışını simüle etmek için model, sembolik bir araç olarak kullanılmaktadır. Modeli analiz etmek için sonuçlarının dikkate değer bir fark oluşmayacak şekilde matematiksel olarak bazı kabuller yapılmalıdır. Fakat büyük modellerin kısmı diferansiyel denklemlerle çözülmesi oldukça zordur. Büyük modelleri daha kolaylıkla analiz etmek için Sonlu Eleman Yöntemi son yıllarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bir modelde sonsuz tane nokta bulunmakta olup, bu noktaları analiz etmek hem zaman kaybı oluşturmakta hem de oluşacak denklemlerin çözülmesini zorlaştırmaktadır. Sonlu Eleman Yönteminde ise sonsuz sayıda noktası bulunan modelin sonlu sayıda parçalara bölünmesiyle birlikte analizler gerçekleştirilmektedir. Bu nedenle, oluşturulan model ne kadar fazla sayıda sonlu parçaya bölünürse, yapının gerçek davranışı o kadar iyi temsil edilmiş olmaktadır. Fakat modelin çok sayıda parçaya bölünmesi demek, o kadar fazla işlem hacminin de oluşturulması demektir. Ayrıca, belirli bir aralıktan sonra

sonuçlarda herhangi bir farklılaşma da oluşmamaktadır. Bu nedenle, oluşturulan modelin sonlu eleman sayısının yapıyı en iyi şekilde temsil edecek şekilde ve optimum seviyede olmasına özen gösterilmelidir. Yani model, yeterli sonlu sayıda ayrılmazsa sonlu eleman modelin hassas sonuç vermeyeceği ifade edilmektedir (Zienkiewicz, 2000).

Sonlu Eleman Yönteminde, yapının gerçek davranışını temsil edecek elemanların seçilmesi önemli bir yer teşkil etmektedir. Şekil 1.5’ de bir, iki ve üç boyutlu sonlu eleman örnekleri verilmektedir. Bu eleman tipleri genellikle, kafes sistemler için bir boyutlu, perde ve plaklar için iki boyutlu, köprü, baraj ve tarihi yapılar için ise üç boyutlu eleman tipleridir.

a) 1D	b) 2D		c) 3D		
<p>Çubuk</p> <p>2 D.N.</p> <p>3 D.N.</p> <p>D.N.: Düğüm Nokası</p>	<p>Üçgen</p> <p>3 D.N.</p> <p>6 D.N.</p>	<p>Dörtgen</p> <p>4 D.N.</p> <p>8 D.N.</p>	<p>Dörtüzlü</p> <p>4 D.N.</p> <p>10 D.N.</p>	<p>Beşyüzlü</p> <p>6 D.N.</p> <p>15 D.N.</p>	<p>Altıyüzlü</p> <p>8 D.N.</p> <p>20 D.N.</p>

Şekil 1.5. Bir, iki ve üç boyutlu sonlu eleman örnekleri

1.5.2. Malzeme Özellikleri ve Sınır Şartlarının Belirlenmesi

Mühendislik yapılarının gerçek davranışlarının elde edilmesinde seçilen malzemenin davranışı ve sınır şartları önemli bir yer teşkil etmektedir. Çünkü sonlu eleman modeli ile deneysel ölçümlerde oluşabilecek farklılıklar sadece sayısal model üzerinde yapılan kabullerden kaynaklanmamakta, aynı zamanda malzeme özellikleri, sınır koşulları ve süreklilik koşullarının da bu farklılıklar üzerinde önemli bir etkisi olduğu bilinmektedir (Aktan vd., 1998). Bu nedenle, oluşturulan sonlu eleman modelinde yükleme durumları, mesnetlenme koşulları, malzeme karakteristikleri, yapının zeminle etkileşimi gibi koşullar göz önünde bulundurulmalı ve mümkün olduğunca oluşturulan model gerçek yapıyı yansıtacak şekilde hazırlanmasına özen gösterilmelidir.

1.5.3. Modal Analiz

Sonlu Eleman Yönteminde, çok serbestlik dereceli sistemlerin hareket denklemi,

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{F(t)\} \quad (1.42)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada, $[M]$ kütle matrisini, $[C]$ sönüm matrisini, $[K]$ rijitlik matrisini, $\{x(t)\}$ yerdeğiştirme vektörünü, $\{\dot{x}(t)\}$ hız vektörünü, $\{\ddot{x}(t)\}$ ivme vektörünü ve $\{F(t)\}$ kuvvet vektörünü göstermektedir.

Sönümsüz serbest titreşime ait hareket denklemi kullanılarak bir yapının dinamik karakteristikleri olarak adlandırılan doğal frekans ve mod şekilleri belirlenebilmektedir. Serbest titreşim hareketinde, dış kuvvetin olmadığı kabul edilmektedir. Sistemin zamana bağlı sönümsüz serbest titreşim hareket denklemi,

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{0\} \quad (1.43)$$

şeklindedir. Denklem çözümü için,

$$\{x(t)\} = \{X\}e^{i\omega t} \quad (1.44)$$

(1.44) ifadesi (1.43)'de yerine yazılırsa,

$$([K] - \omega^2 [M])\{x\}e^{i\omega t} = \{0\} \quad (1.45)$$

denklemi elde edilmektedir. Bu denklemin sıfırdan farklı çözümleri için aşağıda belirtilen karakteristik determinant elde edilmektedir.

$$\det|[K] - \omega^2 [M]| = 0 \quad (1.46)$$

(1.46) denkleminin çözümünden n serbestlik derecesi kadar sönümsüz doğal açılal frekans (özdeğer) $(\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n)$ elde edilmektedir. Doğal frekansların küçükten büyüğe doğru

sıralanmasıyla elde edilen ek küçük frekans hakim frekans ve bu hakim frekansa karşılık gelen mod şekli ise (özvektör) hakim mod şekli olarak adlandırılmaktadır.

1.6. Deneysel Modal Analiz

Deneysel Modal Analiz yöntemi yapılardaki titreşimleri dikkate alarak frekans, mod şekli ve sönüm oranı gibi yapının dinamik karakteristiklerinin deneysel olarak belirlenmesinde kullanılan tahribatsız bir yöntemdir. Bu yöntem, titreşim kaynağının tipine bağlı olarak Çevresel Titreşim Yöntemi ve Zorlanmış Titreşim Yöntemi olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

1.6.1. Deneysel Modal Analizde Kullanılan Ölçüm Sistemleri

1.6.1.1. Titreştiriciler

Deneysel Modal Analiz yöntemi, yapılarda meydana gelen titreşimlerden yararlanmaktadır. Bu titreşimler çevresel titreşimler olabileceği gibi yapay titreşimler de olabilmektedir. Çevresel titreşimler gürültü, rüzgar, deprem, trafik gibi yapıyı titreştirmek için dışardan herhangi bir müdahale gerektirmeyen doğal titreşimlerdir. Yapay titreşimler ise sarsıcı, darbe çekici, tokmak gibi dışardan müdahale gerektiren yapay titreşimlerdir. Ölçüm kolaylığı, maliyet, yapısal işlevin devam edilebilmesi gibi nedenlerden dolayı çevresel titreşimlere dayalı deneysel ölçümler tercih edilmektedir.

1.6.1.2. Sarsıcılar

Sarsıcılar, mekanik, elektro-manyetik, elektro-hidrolik gibi farklı türlerle olmakla birlikte uçak sanayi, otomotiv, uzay teknolojileri, gemi sanayisi, telekomünikasyon gibi hizmet alanlarındaki modellerin titreşim testlerinde de kullanılmaktadır. Bu cihazlar, seçilen yapıya göre istenilen seviyede dalga hareketleri uygulayabilmektedir. Sarsıcılar yapı üzerinde büyük kuvvetlere sebep oldukları için buldukları yerlere iyi bir şekilde mesnetlenmeleri gerekmektedir. Büyük yapıları istenilen seviyede titreştirebilmek için çok sayıda sarsıcı kullanılabilir fakat bu durumda maliyet de önemli ölçüde artar. Sarsıcı

kullanımında yapının özelliklerinin iyi bilinmesi gerekmektedir. Aksi takdirde hem yapıya hem de cihaza ciddi derecede hasarlar verilebilmektedir.

1.6.1.3. Darbe Çekiçleri

Darbe çekiçleri genellikle orta ölçekli mühendislik yapılarını veya laboratuvar modellerini titreştirmek amacıyla kullanılmaktadır. Darbe çekiçlerinin esas özelliği başlık kısmının değiştirilebilir olmasıdır. Bu kısımlarda kuvvetölçer ve uç kısımlar bulunmaktadır. Yapıya uygulanan kuvvet, kuvvetölçer yardımıyla ölçülmektedir ve bu kuvvet momentumun korunumu ilkesiyle kütle ve hıza bağlı olarak hesaplanabilmektedir. Bu sayede istenilen kuvveti elde etmek için ya darbe çekiçinin başlık kısmının ağırlığı ya da vuruş hızı değiştirilmelidir. Bu aletlerle yapıyı titreştirmek daha kolay olmaktadır. Darbe çekiçinin genel özellikleri Tablo 1.1’ de verilmektedir. Şekil 1.6 darbe çekiçlerine ait farklı model görünümleri verilmektedir. Ayrıca tez çalışması kapsamında kullanılan Brünel&Kjaer 8210 tipi darbe çekiçine ait fotoğrafta Şekil 1.7’de gösterilmektedir.



Şekil 1.6. Farklı modellerdeki darbe çekiçleri



Şekil 1.7. B&K 8210 tipi darbe çekici

Tablo 1.1. B&K 8210 tipi darbe çekicine ait bazı özellikler

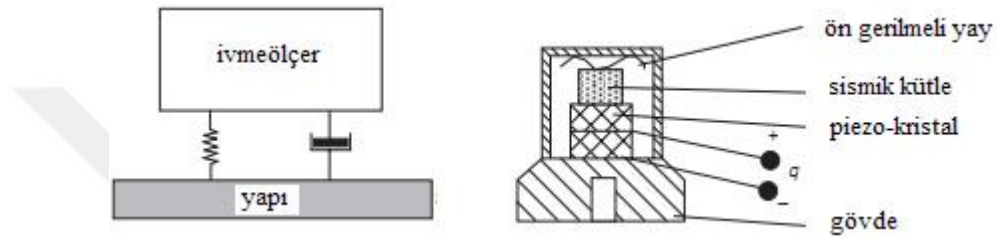
Model	B&K 8210
Hassasiyet	0.225 mV/N
Maksimum Kuvvet	22200 N
Çalışma Sıcaklığı	-73 ile +60 °C arası
Toplam Uzunluk	0.8966 m
Toplam Kütle	5.44 kg

1.6.1.4. İvmeölçerler

Deneysel Modal Analiz yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen deneysel ölçümlerde en önemli nokta, seçilen yapının tipine ve frekans aralığına göre belirlenen ivmeölçerlerdir. İvmeölçerler yerleştirildikleri yapıdaki titreşimleri ölçmek için kullanılmaktadırlar. Farklı tipte ivmeölçerler mevcut olup, yapısal titreşimlerin ölçümlerinde genellikle piezoelektrik ivmeölçerler kullanılmaktadır. Şekil 1.8’te görüldüğü gibi bu tip ivmeölçerler, yay-kütle sönümleyici sisteminden oluşmaktadır (Ramos, 2007). İvmeölçerlerin aktif kısmı ise kuartz veya seramik kristallerinden yapılmaktadır. Kuartz ya da seramik kristaller bir kuvvet altında kaldığında picocoulomb ($2.78E-12$ Amper saat) seviyesinde elektrik yükü üretmektedirler. Bu elektrik yükünün kristal üzerindeki değişimi yer çekimi ivmesinin değişimi ile doğru orantılıdır. İvmeölçerlerdeki sismik kütlenin ivme altında maruz kaldığı atalet kuvveti, piezoelektrik kristale etkimekte ve ivme ile doğru orantılı bir elektrik sinyali

çıkışı vermektedir. Bu ivmeölçerlerin içinde sinyali taşınabilir voltaj sinyaline çeviren bir sinyal koşullayıcı devre bulunmaktadır. Bu şekilde üretilen sinyal veri toplama ünitesine aktarılmaktadır (Altunışık, 2010; Sevim, 2010).

Deneysel ölçümlerde kullanılan ivmeölçerlerin türleri frekans aralığı, hassasiyeti, ölçebileceği maksimum ivme değerini ve çalışma sıcaklığında göre değişmektedir. Bu yüzden titreşim verilerin doğru bir şekilde elde etmek için kullanılacak ivmeölçer tipinin dikkatli seçilmesi gerekmektedir.



Şekil 1.8. Piezoelektrik tipi ivmeölçerin iç mekanizması

Tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalarda kullanılan B&K 8340, B&K 4506 B 003, B&K 4507 B 005 ivmeölçerlere ait görüntüler Şekil 1.9'te verilmekte olup, bu ivmeölçerlere ait genel özellikler ise Tablo 1.2'de sunulmaktadır.



a) B&K 8340

b) B&K 4506

c) B&K 4507

Şekil 1.9. a) B&K 8340 tipi tek eksenli, b) B&K 4506 tipi üç eksenli ve c) B&K 4507 tipi tek eksenli ivmeölçerler

Tablo 1.2. B&K 8340 ve B&K 4507 B 005 tipi tek eksenli ivmeölçerler ile B&K 4506 B003 tipi üç eksenli ivmeölçerlere ait bazı özellikler

Model	B&K 8340	B&K 4507 B 005	B&K 4506 B 003
Hassasiyet	10 V/g	1 V/g	0.5 V/g
Frekans Aralığı	0.1-1500 Hz	0.4-6000 Hz	0.3-2000 Hz
Maksimum İvme	0.5 g	7 g	14 g
Çalışma Sıcaklığı	-51 ile +74 arası	-54 ile +100 arası	-54 ile +100 arası
Boyutlar	50.3 x 50.3 x 91.9 mm	10 x 10 x 10 mm	17 x 17 x 17 mm
Toplam Kütle	775 gram	4.6 gram	18 gram

1.6.1.5. Veri Toplama Sistemi ve Sinyal İşleme

Veri toplama sistemi, veri toplama ünitesi ve bilgisayardan oluşmaktadır. Veri toplama ünitesi, ivmeölçerlerden gelen sinyalleri toplayarak bilgisayar programına aktarmaktadır. Sinyaller program arayüzü yardımıyla işlenmektedir. Sinyal toplama ve işleme kısaca şu şekilde açıklanabilir: İvmeölçerlerden veri toplama sistemine ham veriler aktarılmaktadır, yani verilerin içinde tekrarlı ve tekrarsız titreşimler bulunmaktadır. Yapının dinamik karakteristiklerinin belirlenebilmesi için bu ham verilerin ayıklanması gerekmektedir. Bu durum, veri toplama sisteminin içinde bulunan sinyal koşullaması ile giderilmektedir. Bu işlem genellikle düşük seviyeli bir sinyalin kalitesini artırmak, gürültü sinyallerinin etkisini azaltmak, istenmeyen sinyalleri filtrelemek, gerekli durumlarda ivmeölçerlerdeki elektrik gücünü ayarlamak veya ivmeölçerlerin davranışlarını kontrol etmek için yapılmaktadır (Altunışık, 2010; Sevim 2010). Sinyal koşullamanın içinde bulunan istenmeyen sinyallerin filtrelenmesi özelliği önemli derecede rol oynamaktadır. İstenmeyen sinyaller, seçilen frekans ölçüm aralığı dışında kalan yüksek frekans sinyalleridir. Eğer sinyaller düşük bir hızda ölçülüyorsa yüksek frekans içeriğine sahip sinyaller, düşük frekanslara sahipmiş gibi algılanmakta ve yapılan ölçüm hatalı olmaktadır.

Tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel ölçümlerde, veri ünitesi olarak B&K 3560 C tipi 17 kanallı cihaz kullanılmıştır. Bu portatif cihaz, iki adet batarya ile çalıştırılmakta ve elektrik olmadığı durumlarda 1-1.5 saat kadar ölçüm yapılabilmektedir. Ayrıca, zorlanmış titreşim testlerinde darbe çekicinden gelen etki sinyallerini ölçmek için bir adet kuvvet sensörü girişi bulunmaktadır. Büyük yapılarda ivmeölçer sayısının yetersiz olması

durumunda referans ölçümlerde gerçekleştirilebilmektedir. Referans ölçüm, yapıda bir ivmeölçerin yeri sabit tutularak (referans) farklı zamanlarda alınan ölçümlerin birleştirilmesi ve böylece tek seferde ölçüm yapılmış gibi dikkate alınması işlemidir.



Şekil 1.10. Brüel&Kjaer 3560-C veri toplama ünitesi

Veri toplama ünitesinden sinyal koşullama yapıldıktan sonra yapı dinamik karakteristiklerinin belirlenebilmesi için kaydedilen sinyallerin işlenmesi gerekmektedir. Sinyal işleme bilgisayarlarda gerçekleştirilen özel yazılımlar yardımıyla yapılmaktadır. Sinyaller, bilgisayara zaman ortamında aktarılmaktadır. Fakat pratik sebeplerden dolayı frekans ortamı daha çok tercih edilmektedir. Zaman ortamındaki sinyallerin frekans ortamına aktarılmasında Fourier serilerinden yararlanılmaktadır. $x(t)$ ile gösterilen bir sinyal sonsuz Fourier serisine açıldığında

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cos\left(\frac{2\pi n}{T}t\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi n}{T}t\right) \right] \quad (1.47)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Ramos, 2007). Burada, a_0, a_n, b_n sırasıyla aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= \frac{2}{T} \int_0^T x(t) dt \\ a_n &= \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos\left(\frac{2\pi n}{T}t\right) dt \\ b_n &= \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin\left(\frac{2\pi n}{T}t\right) dt \end{aligned} \right\} \quad (1.48)$$

Sonsuz Fourier serisine açılan sinyal t_k ($k=1,2,3,\dots,N$) gibi sonlu elemana karşılık gelmektedir. Bu durumda sonlu Fourier serisi açıldığında

$$x_k = x(t_k) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{N/2} \left[a_n \cos\left(\frac{2\pi k}{N} n\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi k}{N} n\right) \right], k=1,2,\dots,N \quad (1.49)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada, a_0 , a_n , b_n sırasıyla aşağıdaki gibidir.

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N x_k \\ a_n &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k \cos\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) \\ b_n &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k \sin\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) \end{aligned} \right\} \quad (1.50)$$

Sinyal işleme sırasında, sinyallerin periyodik olmamasından dolayı sızıntı hatasıyla karşılaşmaktadır. Bu hatayı azaltmak için ölçüm süresi uzun tutulmalıdır. Başka bir çözüm ise pencereleme yöntemini kullanmaktır. Pencereleme yöntemi, sinyal periyodlarının tam katlı haline getirerek sızıntı problemini ortadan kaldırmaktadır (Heylen vd., 2007; Ramos, 2007).

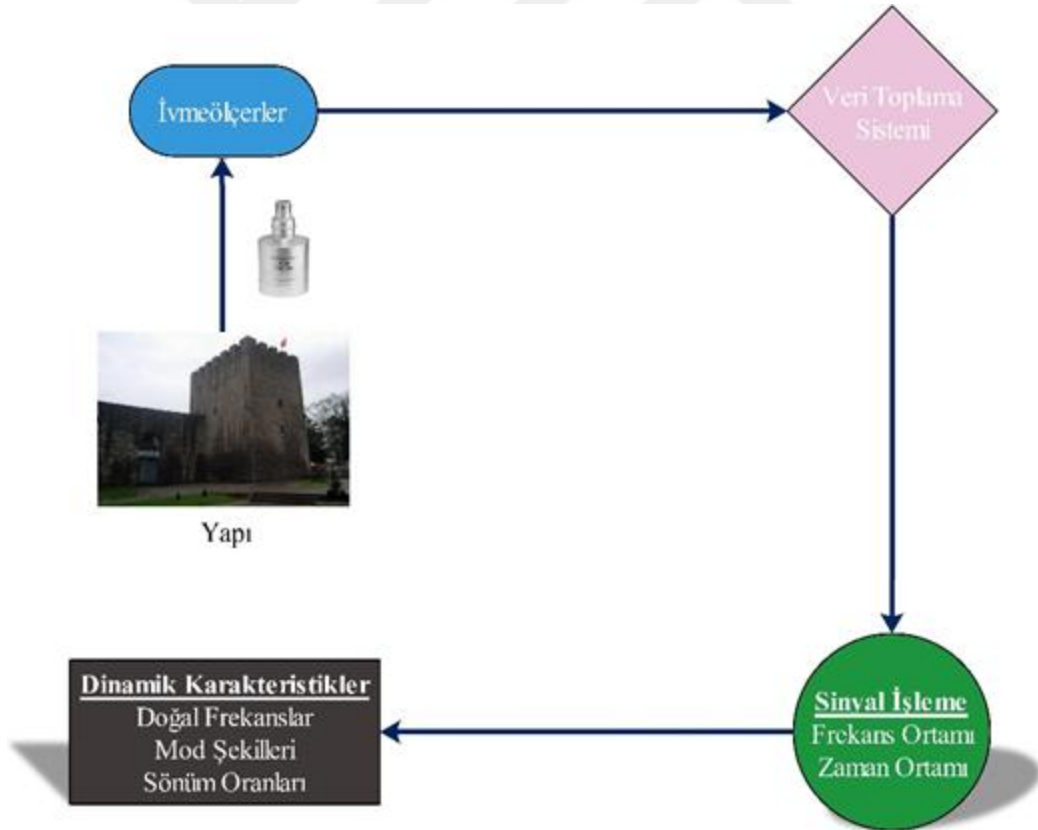
Bu tez çalışmasında, ivmeölçerlerinin veri toplama ünitesine tanıtılması, ivmeölçerlerden alınan sinyallerin veri toplama cihazına depolanmasında, depolanan sinyallerin sinyal işleme programına aktarılmasında PULSE (PULSE, 2006) yazılımı kullanılmıştır. Kaydedilen sinyallerin işlenmesi ve yapının dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde ise Operational Modal Analysis (OMA, 2006) yazılımı kullanılmıştır.

1.6.2. Deneysel Modal Analiz Yöntemine Ait Formülasyon

1.6.2.1. Çevresel Titreşim Yöntemi

Deneysel Modal Analiz yönteminde yapının çevresel etki kuvvetleriyle titreştirildiği kabul edilmekte ve yapının bu titreşime gösterdiği tepki ölçülmektedir. Çevresel Titreşim Yönteminde etki kuvveti ölçülemediğinden Etki Davranış Fonksiyonu

belirlenmemektedir. Bu sebeple bu yöntem literatürde Operasyonel Modal Analiz veya Sadece Tepki Modal Analizi şeklinde ifade edilmektedir (Brincker vd., 2003). Bu yöntemde yapıya etkiyen titreşimlerin genliği ve zamanla değişimi bilinmediği için, frekans ve zaman tanım alanında algoritmalar kullanılarak yapının dinamik karakteristikleri belirlenmektedir. Frekans Tanım Alanındaki yöntemler başlıca Piklerin Seçilmesi Yöntemi, Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma Yöntemi, Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma Yöntemi ve Polimaks Yöntemleridir. Zaman ortamındaki yöntemler ise başlıca Rastgele Azalım Yöntemi, Rekürsif Teknikler, En Büyük Olabilirlik Yöntemleri ve Stokastik Altalan Belirleme yöntemleridir (Ramos, 2007). Bu tez kapsamında, dinamik karakteristiklerin elde edilmesinde frekans ortamında Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma Yöntemi ile zaman ortamında Stokastik Altalan Belirleme Yöntemleri kullanılmıştır. Dinamik karakteristiklerin deneysel yöntemlerle belirlenmesi ile ilgili akış şeması Şekil 1.11’te gösterilmiştir.



Şekil 1.11. Dinamik karakteristiklerinin deneysel yöntemlerle belirlenmesine ait akış şeması

1.6.2.1.1. Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (GFTAA) Yöntemi

Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (GFTAA) yöntemi kullanımı kolay olan Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (FTAA) yönteminin genişletilmiş halidir. Bu yöntemde, spektral yoğunluk fonksiyonundan hesaplanan tekil değer ayırıştırma grafiklerindeki piklerin seçilmesiyle modlar elde edilmektedir. FTAA yöntemi, Hızlı Fourier Dönüşümü'nden (HFD) tek bir frekans hattının kullanımına dayalı olduğundan, belirlenen doğal frekansın kesinliği HFD'nin çözünürlüğüne bağlıdır. FTAA yönteminde yapının sönüm oranları belirlenmemektedir. Diğer taraftan ise GFTAA yönteminde, belirlenen doğal frekansların ve mod şekillerinin kesinliği artırılmakta, sönüm oranları da ayrıca elde edilebilmektedir (Jacobsen vd., 2006).

Doğal frekansları zamana bağlı sıfır geçiş sayısının belirlenmesiyle elde edilirken sönüm ise tek serbestlik dereceli normalize edilmiş oto korelasyon fonksiyonunun logaritmik azalışıyla elde edilmektedir (Jacobsen vd., 2006). GFTAA yönteminde ölçülmeyen etki kuvveti ve ölçülen davranış fonksiyonu arasındaki ilişki

$$G_{yy}(j\omega) = H^*(j\omega)G_{xx}(j\omega)H^T(j\omega) \quad (1.51)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Bendat ve Piersol, 2004). Burada $G_{xx}(j\omega)$ etki sinyalinin Güç Spektral Yoğunluk Fonksiyonunu (GSY), $G_{yy}(j\omega)$ tepki sinyalinin Güç Spektral Fonksiyonunu ve $H(j\omega)$ frekans davranış fonksiyonunu göstermektedir. Denklem (1.51)'deki * ve T sırasıyla ifadelerin kompleks eşleniğini ve transpozisini göstermektedir. Matematiksel düzenlemelerden sonra tepki sinyaline ait GSY fonksiyonu tek kutuplu artık değer fonksiyonu formunda aşağıdaki şekilde elde edilmektedir.

$$H(j\omega) = \sum_{k=1}^n \frac{R_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{R_k^*}{j\omega - \lambda_k^*} \quad (1.52)$$

Burada n mod sayısını, λ_k kutup fonksiyonunu ve R_k artık değer fonksiyonunu göstermektedir. Gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra (1.51) denklemi

$$G_{yy}(j\omega) = \sum_{k=1}^n \sum_{s=1}^n \left[\frac{R_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{R_k^*}{j\omega - \lambda_k^*} \right] G_{xx}(j\omega) \left[\frac{R_s}{j\omega - \lambda_s} + \frac{R_s^*}{j\omega - \lambda_s^*} \right]^{\bar{H}} \quad (1.53)$$

şeklinde elde edilmektedir (Brinker vd., 2000). Burada, s tekil değerleri, \bar{H} kompleks eşleniğini ifade etmektedir. Matematiksel ifadeler sadeleştirildiğinde tepki sinyaline ait GSY fonksiyonu tek kutuplu artık değer fonksiyonu formunda

$$G_{yy}(j\omega) = \sum_{k=1}^n \frac{A_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{A_k^*}{j\omega - \lambda_k^*} + \frac{B_k}{-j\omega - \lambda_k} + \frac{B_k^*}{-j\omega - \lambda_k^*} \quad (1.54)$$

şeklinde elde edilmektedir (Brinker vd., 2000). Burada; A_k tepki sinyalinin GSY fonksiyonuna ait k. artık değer matrisini göstermektedir. GFTAA yönteminde ilk adım GSY matrisini belirlemektir. Ayrık frekanslarda tepki sinyalinin GSY'sinin tahmini = (i) olarak bilinmekte ve tekil değer ayrışım matrisi alınarak ayrıştırılmaktadır (Brincker vd., 2000). Buna göre denklem

$$G_{yy}(j\omega_i) = U_i S_i U_i^{\bar{H}} \quad (1.55)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada. u_{ij} tekil vektörleri, $U_i = [u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{im}]$ tekil vektörleri içeren bütün matrisi, s_{ij} skaler tekil değerleri ve $S_i = [s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{im}]$ skaler tekil değerleri içeren diyagonal matrisi göstermektedir. Denklem (1.55)'te verilen GSY fonksiyonunda, pik değer yapan noktalar doğal frekanslara karşılık gelmektedir. Pik noktaları oluşturan tekil vektörler ise doğal mod şekillerine karşılık gelmektedir.

1.6.2.1.2. Stokastik Altalan Belirleme (SAB) Yöntemi

Stokastik Altalan Belirleme (SAB) yöntemi korelasyon veya spektruma gerek duymadan doğrudan zaman verileriyle çalışan, zaman tanım alanına dayalı bir yöntemdir. Bu yöntem dinamik karakteristiklerin belirlenmesi için çok uygun olup, yaygın kullanım alanı bulunmaktadır (Overschee ve Moor, 1996; Peeters, 2000). Bu yöntemde yapı sisteminin dinamik davranışı lineer, sabit katsayılı ikinci derecede diferansiyel denklem

$$M\ddot{U}(t) + C\dot{U}(t) + KU(t) = R(t) = Bu(t) \quad (1.56)$$

olarak ifade edilmektedir. Burada M , C , K sırasıyla kütle, sönüm ve rijitlik matrisleridir. $R(t)$ titreşim kuvvetini, $U(t)$, $\dot{U}(t)$, $\ddot{U}(t)$ ise zamana bağlı yer değiştirme, hız ve ivme vektörlerini göstermektedir. $R(t)$ kuvvet vektörü olarak, ortamdaki verileri simgeleyen B matrisi ve $u(t)$ vektörü cinsinden ifade edilmektedir. Dinamik denge denklemi, denklem (1.56), titreşen yapının davranışını temsil etmesine rağmen bu şekliyle SAB yöntemine uygun değildir. Bu yüzden, denklem (1.56) daha uygun bir form olan ayrık-zaman stokastik durum-uzay modeline dönüştürülmektedir (Yu ve Ren, 2005). Aşağıdaki tanımlamalar kullanılarak (1.56) denklemi

$$\left. \begin{aligned} x(t) &= \begin{pmatrix} U(t) \\ \dot{U}(t) \end{pmatrix} \\ A_* &= \begin{pmatrix} 0 & I_{n_2} \\ -M^{-1} & -M^{-1}C \end{pmatrix} \\ B_* &= \begin{pmatrix} 0 \\ -M^{-1}B \end{pmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (1.57)$$

$$\dot{x}(t) = A_*x(t) + B_*u(t) \quad (1.58)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada, A_* durum matrisini, B_* veri matrisini ve $x(t)$ durum vektörünü göstermektedir. Çevresel titreşim testlerinde, yapının bütün serbestliklerini ölçmek pek mümkün olmamaktadır. Dolayısıyla durum-uzay vektörünün eleman sayısı, sistemin durumunu tanımlayan bağımsız değişken sayısına eşittir ve gözlem denklemi

$$y(t) = C_*x(t) + D_*u(t) \quad (1.59)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Yu ve Ren, 2005). Burada C_* sistem davranış matrisini, D_* doğrudan iletişim matrisini göstermektedir. Denklem (1.58) ve (1.59) sürekli-zaman belirli durum-uzay modelini oluşturmaktadır. Örnekleme süresi ve ortamdaki gürültü sinyal verilerini her zaman için etkilemektedir. Örneklemeden sonra durum-uzay modeli

$$\left. \begin{aligned} x_{k+1} &= A_*x_k + B_*u_k \\ y_k &= C_*x_k + D_*u_k \end{aligned} \right\} \quad (1.60)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Yu ve Ren, 2005). Burada, $x_k=x(k\Delta t)$ ayrık-zaman durum vektörünü, u_k belirgin etki sinyal vektörünü göstermektedir. Gerçek operasyonel koşullarda yapılan ölçümler, yapıya ve dış ortamdaki gürültüye ait sinyalleri içermektedir. Dolayısıyla Denklem (1.60)'a stokastik gürültü bileşenleri eklendiğinde belirli-stokastik durum-uzayı modeli

$$\left. \begin{aligned} x_{k+1} &= A_*x_k + B_*u_k + w_k \\ y_k &= C_*x_k + D_*u_k + v_k \end{aligned} \right\} \quad (1.61)$$

şekline dönüşür. Burada, w_k modeldeki belirsizlikler ve kusurlar nedeniyle işlenen gürültü sinyallerini, v_k ise ivmeölçer kusurlarından dolayı işlenen gürültü sinyalini göstermektedir. Her iki vektörde değeri ölçülemeyen sinyallerden oluşmaktadır. Etkisi olmayan beyaz gürültü ve kovaryans matrisleri

$$E_x \left[\begin{pmatrix} w_p \\ v_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_q^T & v_q^T \end{pmatrix} \right] = \begin{pmatrix} Q & S \\ S^T & R \end{pmatrix} \delta_{pq} \quad (1.62)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Yu ve Ren, 2005). Burada, E_* beklenen değer operatörünü, δ_{pq} ise Kronecker deltayı göstermektedir. Kronecker delta iki değişkenli bir fonksiyondur ve aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\delta_{pq} = \left. \begin{aligned} &1, \text{ eğer } p = q \\ &0, \text{ eğer } p \neq q \end{aligned} \right\} \quad (1.63)$$

SAB yönteminde yapı sisteminin davranışı, normal operasyon koşullarında değeri ölçülemeyen sinyallerle titreştirilerek belirlenmektedir. Bu veri eksikliğinden dolayı, Denklem (1.61)'de gösterilen belirgin sinyal verisi u_k 'yi, gürültü terimleri olan w_k ve v_k 'den ayırt etmek mümkün değildir. Bu durumda, u_k gürültü terimleri w_k ve v_k cinsinden yazılırsa yapının ayrık-zaman stokastik durum-uzay modeli

$$\left. \begin{aligned} x_{k+1} &= A_* x_k + W_k \\ y_k &= C_* x_k + v_k \end{aligned} \right\} \quad (1.64)$$

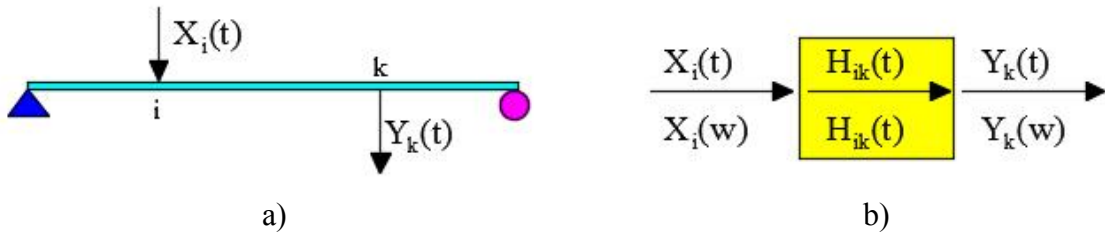
şeklinde ifade edilmektedir. Denklem (1.64), çevresel titreşimlerden dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde zaman alanının temelini oluşturmaktadır.

1.6.2.2. Zorlanmış Titreşim Yöntemi

Zorlanmış Titreşim Yönteminde yapı $X_i(t)$ gibi yapay bir kuvvetle i noktasından titreştirilmekte ve yapının bu etkiye göstermiş olduğu tepki $Y_k(t)$, yapay kuvvet sinyali $X_i(t)$ ile birlikte ölçülmektedir (Şekil 1.12a). Yapay titreşimler, sarsıcılardan veya darbe çekiçlerinden elde edilmektedir. Zaman tanım alanında ölçülen bu sinyaller frekans tanım alanına Fourier serileri kullanılarak dönüştürüldüğünde, etki-tepki zaman sinyalleri arasındaki ilişkiyi gösteren FDF- H_{ik} , yerini Transfer Matrisi $H_{ik}(iw)$ olarak adlandırılan FDF matrisine bırakmaktadır (Şekil 1.12b) (Schwarz ve Richardson, 1999). Zorlanmış Titreşim Yönteminde etki-tepki sinyalleri arasındaki ilişki

$$H_{ik} = \frac{Y_k(w)}{X_i(w)} \quad (1.65)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada; $H_{ik}(iw)$ Frekans Davranış Fonksiyonu'nu, $X_i(w)$ frekans tanım alanındaki tepki fonksiyonunu ve $Y_k(w)$ frekans tanım alanındaki etki fonksiyonunu göstermektedir. Elde edilen Frekans Davranış Fonksiyonu, çeşitli sayısal teknikler kullanılarak ayrıştırılmakta ve yapıya ait doğal frekanslar, mod şekilleri ve sönüm oranları elde edilmektedir.



Şekil 1.12. Zorlanmış Titreşim Yöntemine ait a) şematik gösterim b) Frekans davranış fonksiyonunun belirlenmesi

1.7. Çevresel Titreşimlere Dayalı Hasar Tespit Yöntemleri

Çevresel titreşimlere dayalı hasar tespit yöntemlerinin amacı yapıda oluşması muhtemel hasarların varlığını, bölgesini ve şiddetini/büyükliğini tespit etmek için dinamik karakteristikler arasındaki farklılıkları karşılaştırmaktır. Bu karşılaştırmalar sırasında genellikle yapının dinamik karakteristiklerine ait frekans, mod şekilleri ve sönüm oranı değerleri kullanılmaktadır.

Çevresel titreşimlere dayalı hasar tespit yöntemleri aşağıda belirtilen başlıca gruplara ayrılmaktadır (Doebing vd., 1998).

- Frekansların değişimine dayalı hasar tespiti
- Mod şekillerinin değişimine dayalı hasar tespiti
- Esnekliğin değişimine dayalı hasar tespiti
- Model güncellemeye dayalı hasar tespiti

Bu tez çalışmasında, çevresel titreşimlere dayalı hasar tespit yöntemleriyle ilgili her gruptan en az bir yöntem seçilmiş olup, aşağıda bunlara ait analitik formülasyonlar sunulmaktadır.

1.7.1. Frekans Değişimine Dayalı Hasar Tespiti

Bu yöntemde farklı iki çözüm yönteminden elde edilen frekans değerleri, Denklem (1.66)'da gösterilen bağıntı kullanılarak karşılaştırılmaktadır.

$$\Delta = \left| \frac{f_d - f_u}{f_d} \right| \quad (1.66)$$

Burada, f_d hasarlı duruma ait frekans değerlerini, f_u hasarsız duruma ait frekans değerlerini ve Δ ise değişim oranını göstermektedir.

Elde edilen değişim oranları değerlendirilerek, yapılarda veya taşıyıcı sistem elemanlarında hasarın var olup olmadığı kolaylıkla belirlenebilmektedir. Fakat doğal frekanslar, sıcaklık veya çevre koşullarının değişmesinden kolaylıkla etkilenebileceğinden (Cawley ve Adams, 1979; Fox, 1992; Kim ve Stubbs, 1995), doğal frekanslar arasında elde

edilebilecek yaklaşık sonuçlar, mod şekilleri karşılaştırılmadan net bir şekilde hasarın varlığına işaret etmemektedir.

1.7.2. Mod Şekillerinin Değişimine Dayalı Hasar Tespiti

Mod şekilleri, yapının herhangi bir frekansında göstermiş olduğu modal yerdeğiştirme davranışını ifade etmektedir. Bu davranış şekli, birimsiz modal genliklerden oluşmaktadır. Analitik, sayısal ve deneysel olarak elde edilen modal yerdeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması amacıyla birçok yöntem geliştirilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında, mod şekillerine dayalı hasar tespit yöntemlerinden Modal Güvence Kriteri (MGK), Koordinat Modal Güvence Kriteri (KMGK), Modal Şekli Eğrilik Yöntemi dikkate alınmış olup, ilgili yöntemlere ait formülasyon aşağıda detaylı olarak sunulmaktadır.

1.7.2.1. Modal Güvence Kriteri (MGK)

Modal Güvence Kriteri (MGK), analitik/sayısal ve deneysel olarak elde edilen farklı mod şekil vektörlerini karşılaştırmak amacıyla kullanılmaktadır. MGK değeri

$$MGK(i, j) = \frac{|\phi'_{xi} \cdot \phi_{aj}|^2}{(\phi'_{xi} \cdot \phi_{xi}) \cdot (\phi'_{aj} \cdot \phi_{aj})} \quad (1.67)$$

bağıntısı ile ifade edilmektedir (Heylen vd. 2007). Burada, ϕ_{xi} analitik/sayısal, ϕ_{aj} ise deneysel mod şekil vektörlerini göstermektedir. $MGK(i, j)$, analitik veya sayısal olarak elde edilen mod şeklinin deneysel olarak elde edilen mod şekline ne kadar benzer olduğunu göstermektedir. Tüm mod şekilleri hesaplanarak, MGK değerleri ile birlikte bir matris oluşturulmaktadır. MGK değerleri 0-1 arasında değişmekte olup, bu değer 1'e yakın olması mod şekilleri arasındaki benzerliğin o kadar iyi olduğu anlamına gelmektedir.

1.7.2.2. Koordinat Modal Güvence Kriteri (KMGK)

MGK değerleri analitik, sayısal ve deneysel frekansların mod şekilleri arasındaki bütünsel benzerliği göstermektedir. Koordinat Modal Güvence Kriteri (KMGK) ise yapı üzerinde belli noktalarda farklı yöntemlerle elde edilen modal yerdeğıştirmeler arasındaki benzerliği göstermektedir. KMGK değeri,

$$\text{KMGK}(i) = \frac{\left(\sum_{j=1}^{N_m^x} |\phi_{xij} \cdot \phi_{aij}| \right)^2}{\left(\sum_{j=1}^{N_m^x} |\phi_{xij} \cdot \phi_{xij}| \right) \cdot \left(\sum_{j=1}^{N_m^x} |\phi_{aij} \cdot \phi_{aij}| \right)} \quad (1.68)$$

olarak ifade edilmektedir. Burada ϕ_{xij} j.ci deneysel mod şekil vektörünün i.ci düğüm noktası modal yerdeğıştirme değerini, ϕ_{aij} j.ci analitik mod şekil vektörünün i.ci düğüm noktası modal yerdeğıştirme değerini ve N_m^x ise deneysel mod şekli sayısını göstermektedir. Hesaplanan KMGK değerinin 1'e yakın olması ilgili düğüm noktasındaki modal yerdeğıştirmelerin birbirlerine yakın olduğu anlamına gelmektedir. KMGK değeri ne kadar küçük olursa, o düğüm noktasında veya çevresinde hasarın olabileceği anlamına gelmektedir.

1.7.2.3. Mod Şekli Eğrilik Yöntemi

Mod şekli eğriliği, mod şeklinin ikinci türevi olarak tanımlanmaktadır (Doebing vd., 1998). Merkezi fark yaklaşım kullanılarak, mod şekli eğrilik vektörleri aşağıdaki denklemdeki gibi hesaplanmaktadır (Pandey vd., 1991).

$$\phi_{ji}'' = \frac{\phi_{(j+1)i} - 2\phi_{ji} + \phi_{(j-1)i}}{h^2} \quad (1.69)$$

burada, ϕ_{ji}'' i. modun j. düğüm noktasına ait mod şekli eğriliği değerini, ϕ_{ji} i. modun j. düğüm noktasındaki modal yerdeğıştirme değerini, h ise düğüm noktaları arasındaki

ortalama mesafeyi göstermektedir. Hasarlı ve hasarsız durumlar için elde edilen mod şekli eğrilik vektörleri arasındaki mutlak fark alınarak, mutlak fark eğrilik vektörü

$$\Delta = \left| \phi_{ji}^{''d} - \phi_{ji}^{''u} \right| \quad (1.70)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada, $\phi_{ji}^{''d}$ hasarlı duruma ait mod şekli eğrilik vektörünü, $\phi_{ji}^{''u}$ hasarsız duruma ait mod şekli eğrilik vektörünü ve Δ ise mutlak fark eğrilik vektörünü göstermektedir. Elde edilen mutlak fark eğrilik vektörünün grafiği çizdirildiğinde, grafikte oluşabilecek ani yüksek değerler, o düğüm noktası civarında hasarın olduğunu göstermektedir.

1.7.3. Esneklik Değişimine Dayalı Hasar Tespiti

Matris Kuvvet Yöntemi olarak bilinen Modal Esneklik Yöntemi, yapıdaki hasarın varlığını ve hasar bölgesini belirlemek için kullanılmaktadır. Yapı hasar aldığı zaman rijitliğinde bir azalma olacağı için hasarın olduğu yer daha esnek olmaktadır. Esneklik matrisi,

$$F = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\omega_i^2} \phi_i \phi_i^T \quad (1.71)$$

şeklinde tanımlanmaktadır (Pandey ve Biswas, 1994). Burada, n mod sayısını, ω_i i . modun doğal frekansını, ϕ_i ise i . modun mod şekil vektörünü göstermektedir. Yapıda m tane düğüm noktası varsa esneklik matrisi $[m \times m]$ şeklinde elde edilmektedir. Hasarlı ve hasarsız durumlar için hesaplanan esneklik matrislerinin farklarının alınmasıyla

$$\Delta F = F^d - F^u \quad (1.72)$$

ifadesi elde edilmektedir. Burada, F^d hasarlı durum için elde edilen fleksibilite matrisini, F^u hasarsız durum için hesaplanan fleksibilite matrisini ve ΔF ise fleksibilite matris

değişimini göstermektedir. ΔF matrisinin j. sütunlarının mutlak değerlerinin en büyüğü alınır

$$\bar{\delta}_j = \max |\Delta F_{ij}|, i = 1 \dots m \quad (1.73)$$

ifadesi elde edilmektedir. Burada, $\bar{\delta}_j$ ΔF matrisinin j. sütundaki düğüm noktası değerlerinin mutlak maksimum değerini, ΔF_{ij} ΔF 'in i. satır j. sütun değerini ve m ise düğüm noktası sayısını göstermektedir. $\bar{\delta}_j$ 'nin büyük olduğu noktalarda herhangi bir hasar durumunun olabileceği değerlendirilmesi yapılabilmektedir.

1.7.4. Model Güncellemeye Dayalı Hasar Tespiti

Çevresel titreşimlere dayalı hasar tespitinde kullanılan bir diğer yöntem ise deneysel ölçümlerden elde edilen dinamik karakteristiklerden yararlanılarak, sonlu eleman modeli üzerinde yapısal parametrelerin (elastisite modülü, birim hacim ağırlığı, rijitlik, sınır koşulları vb.) değiştirilmesine dayalı otomatik model güncelleme yöntemleridir. Burada model güncellemenin amacı, dinamik karakteristikleri değiştirebilecek bütün belirsiz parametreleri dikkate alarak, birçok etkin parametrelerin olması durumunda sonlu eleman analiz sonuçları ile deneysel olarak elde edilen dinamik karakteristikleri mümkün olduğunca birbirlerine yaklaştırmak ve istenilen korelasyonu sağlamaktır. Model güncellemeye dayalı hasar tespitinin avantajı, hasarın bölgesini ve şiddetini tahmin etmede (3. Seviye) kullanılabilmesi ve deneysel olarak elde edilen hasarsız (referanssız) ölçüm olmadan da hasarın yerinin tespit edebilmesidir.

Model güncelleme yöntemlerinde amaç fonksiyonları ve kısıtlama yöntemleri başlıca, Optimum Matris Güncelleme Yöntemi, Duyarlılığa Bağlı Model Güncelleme Yöntemi, İstatiksel, Genetik Algoritma ve Yapay Sinir Ağlarıyla Model Güncelleme Yöntemi olup bu yöntemler kullanılarak gerçekleştirilen birçok çalışma mevcuttur. Bu tez çalışması kapsamında hasar tespiti için Duyarlılığa Bağlı Model Güncelleme Yöntemi kullanılmış olup, bu yöntemle ait işlem adımları aşağıda detaylı olarak açıklanmaya çalışılmıştır.

1.7.4.1. Belirsiz Parametrelerin Seçilmesi

Herhangi bir mühendislik yapısının sonlu eleman modeli oluşturulurken en önemli adım malzeme özellikleri, kesit özellikleri ve sınır şartlarının tanımlanmasıdır. Malzeme özellikleri olarak yoğunluk, elastisite modülü ve Poisson oranı; kesit özellikleri olarak kesit uzunluğu, atalet momenti, kesit alanı; sınır şartları olarak ise ankastre, sabit mesnet, yarı rijit birleşimler kullanılmaktadır. Model güncelleme yapılmadan önce hangi parametrenin yapı davranışı üzerinde etkili olduğuna karar verilmesi gerekli olduğundan seçilen belirsiz parametrelerin duyarlılık analizi yapılmalıdır. Sonlu eleman modeli güncellemesinde belirsiz parametreler, malzeme özellikleri, mesnet şartları, kesit atalet momentleri ve birleşim durumlarıdır (Vanhonacker vd.,1980).

1.7.4.2. Duyarlılık Analizi

Duyarlılık analizi, sonlu eleman model güncellemesi için seçilen belirsiz parametrelerin analiz sonuçları üzerinde etkisini gösteren bir yöntemdir. Model güncellemesine başlarken belirsiz parametre olarak seçilen malzeme özellikleri, kesit özellikleri, yay sabitleri, sınır şartlarının yanında analiz sonuçları da (yerdeğiştirmeler, kütle, Modal Güvence Kriteri, frekans davranış fonksiyonu, frekanslar, mod şekilleri) dikkate alınmaktadır. Duyarlılık analizinde, Diferansiyel Duyarlılık Analizi ve Sonlu Fark Duyarlılık Analizi yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında Diferansiyel Duyarlılık Analizi yöntemi kullanılmış olup, belirsiz parametrelerin dinamik karakteristikler üzerindeki etkisi detaylı olarak incelenmesi hedeflenmiştir.

Diferansiyel Duyarlılık Analizi yönteminde duyarlılık matrisi aşağıdaki şekilde elde edilmektedir (Zeischka vd., 1988).

$$[S] = S_{ij} = \left[\frac{\delta R_i}{\delta P_j} \right] \quad i = 1 \dots N, \quad j = 1 \dots N \quad (1.74)$$

burada, R_i tepki değerlerini, P_j ise parametre değerlerini göstermektedir.

Frekans Diferansiyel Duyarlılık Analizi: Bu yöntemde, sönümsüz sistemler için frekanslar üzerinde hareket denklemlerinden yola çıkılarak aşağıdaki denklemler elde edilmektedir.

$$\{\phi_i\}^T [K] \frac{\delta\{\phi_k\}}{\delta P_j} = \frac{\delta\{\phi_i\}^T}{\delta P_j} [K] \{\phi_k\} \quad (1.75)$$

$$\{\phi_i\}^T [M] \frac{\delta\{\phi_k\}}{\delta P_j} = \frac{\delta\{\phi_i\}^T}{\delta P_j} [M] \{\phi_k\} \quad (1.76)$$

(1.75) ve (1.76) ifadeleri eşitlenerek $i=k$ olması durumunda

$$\frac{\delta f_i}{\delta P_j} = \frac{\{\phi_i\}^T \left(\frac{\delta[K]}{\delta P_j} - 4\pi^2 f_i^2 \frac{\delta[M]}{\delta P_j} \right) \{\phi_i\}}{8\pi^2 f_i^2 \left(\{\phi_i\}^T [M] \{\phi_i\} \right)} \quad (1.77)$$

denklemini elde edilmektedir. Bu ifade, parametre değerlerinin rijilik ve kütle değişimlerini içermektedir.

Mod Şekilleri Diferansiyel Duyarlılık Analizi: Bu yöntemde ise Mod Birleştirme Yöntemi kullanılarak mod şekil duyarlılığı hesaplanmaktadır. Mod şekil vektörü, N adet mod dikkate alınarak

$$\frac{\delta\{\phi_i\}}{\delta P_j} = \sum_{k=1}^N a_k^i \{\phi_k\} \quad (1.78)$$

$$a_k^i = \frac{\{\phi_i\}^T \frac{\delta[K]}{\delta P_j} \{\phi_i\} - \lambda_i \{\phi_i\}^T \frac{\delta[M]}{\delta P_j} \{\phi_i\}}{\lambda_i - \lambda_k} \quad (1.79)$$

ifadesiyle hesaplanmaktadır.

Kütle Duyarlılık Analizi: Bir parametre değerini değiştirmek için yapının toplam kütesinin duyarlılığı olarak aşağıdaki denklemlerdeki gibi ifade edilmektedir.

$$\frac{\delta[M]}{\delta P_j} = \frac{\delta[M_j]}{\delta P_j} \quad (1.80)$$

burada, M_j j.ci elemanın kütesini ve M yapının toplam kütesini göstermektedir.

1.7.4.3. Yakınsama Kriterlerinin Belirlenmesi

Yakınsama kriteri, otomatik model güncelleme sırasında iteratif çözüm yapılmadan önce hangi koşullar göz önüne alınarak iterasyonun tamamlanması gerektiğini göstermektedir. Bu kriterler genel olarak doğal frekanslar için Ağırlıklı Nispi Fark ve Ağırlıklı Mutlak Nispi Fark, mod şekilleri için Ortalama Modal Güvence Kriteri ve Ağırlıklı Mutlak Modal Yerdeğiştirme ve kütle özellikleri için ise Ağırlıklı Mutlak Modal Kütle Kriteridir.

Ağırlıklı Nispi Fark Kriteri: Sayısal ve deneysel frekanslar arasındaki göreceli farklılıkların ortalamasını göstermektedir. Bu değer

$$YK = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_{R_i} \frac{\Delta f_i}{f_i} \quad (1.81)$$

olarak tanımlanmaktadır. Burada, YK yakınsama kriterini, C_{R_i} beklenen hata oranını, f_i frekans değerini, n ise mod sayısını göstermektedir.

Ağırlıklı Mutlak Nispi Fark Kriteri: Sayısal ve deneysel frekanslar arasındaki mutlak farklılığın ortalamasını dikkate almaktadır. Bu değer

$$YK = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_{R_i} \frac{|\Delta f_i|}{f_i} \quad (1.82)$$

olarak tanımlanmaktadır.

Ortalama Modal Güvence Kriteri Değeri: Sayısal ve deneysel olarak hesaplanmış modal güvence kriterinin ortalama değerleri göz önüne alınmaktadır. Bu değer

$$YYK = \frac{1}{C_R} \sum_{i=1}^N (1 - C_{R_i} MGK_i) \quad (1.83)$$

$$C_R = \sum_{i=1}^N C_{R_i} \quad (1.84)$$

olarak tanımlanmaktadır.

Ağırlıklı Mutlak Modal Yerdeğiştirme Kriteri: Sayısal ve deneysel mod şekil bileşenlerinin göreceli farklılıklarının ortalaması dikkate alınmaktadır. Bu değer

$$YK = \frac{1}{C_R} \sum_{i=1}^N C_{R_i} \frac{\Delta\phi_i}{\phi_i} \quad (1.85)$$

$$C_R = \sum_{i=1}^N C_{R_i} \quad (1.86)$$

olarak tanımlanmaktadır.

Ağırlıklı Mutlak Modal Kütle Kriteri: Sayısal ve deneysel modelin kütleleri arasındaki mutlak farkını dikkate alınmaktadır. Bu değer

$$YK = \frac{1}{C_R} \sum_{i=1}^M C_{R_i} m_i \quad (1.87)$$

$$C_R = \sum_{i=1}^M C_{R_i} \quad (1.88)$$

olarak hesaplanmaktadır.

1.7.4.4. Parametrik Tahmin Yöntemi

Parametrik Tahmin Yöntemi, başlangıç sonlu eleman modeli ile deneysel model arasındaki ağırlıklı hata fonksiyonunu minimize ederek deneysel ve sonlu eleman

modelinin dinamik karakteristiklerini birbirlerine yakınsaması esasına dayalı sonlu eleman modeli güncelleme yöntemidir. Bu yöntemde ağırlaştırılmış hata fonksiyonu

$$H = (\{R\} - \{R^e\})^T [C_R] (\{R\} - \{R^e\}) + (\{P\} - \{P^o\})^T ([C_P]) (\{P\} - \{P^o\}) \quad (1.89)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada, $\{R\}$ ve $\{R^e\}$ sırasıyla sonlu eleman modeli ile deneysel modal vektörlerini, $\{P\}$ ve $\{P^o\}$ güncellenen modelin ve başlangıç modelin parametre vektörlerini, $[C_R]$ ve $[C_P]$ deneysel ve model parametrelerin ağırlık matrislerini ve H ise ağırlaştırılmış hata fonksiyonunu göstermektedir. Bu fonksiyonu minimize etmek için kısmi türevi alınıp P_j sıfıra eşitlenirse

$$\{P\} = \{P^o\} + [G] (\{R^e\} - \{R\}) \quad (1.90)$$

$$[G] = [C_P] [S]^T \left([C_R] + [S] [C_P] [S]^T \right)^{-1} \quad (1.91)$$

ifadesi elde edilmektedir. Burada, $[G]$ kazanım matrisini göstermektedir.

1.7.4.5. İteratif Çözüm

Otomatik Model Güncelleme yapılırken kullanılacak en etkili yöntemlerden birisi Taylor serisi açılımını kullanarak duyarlılığa bağlı bir çözüm gerçekleştirmektir (Imregun ve Visser 1991). İteratif çözümde oluşturulan sonuç matrisi

$$\{\Delta R\} = [S] \{\Delta P\} \quad (1.93)$$

ifadesiyle hesaplanmaktadır. Burada, $\{\Delta P\}$ tasarım parametrelerini, $\{\Delta R\}$ deneysel ve sayısal tepkileri arasındaki değişimini ve $[S]$ ise duyarlılık matrisini göstermektedir.

İteratif çözüm, yakınsama kriteri değerine yaklaşıncaya kadar bir döngü halinde devam etmektedir. Yakınsama kriteri sağlandıktan sonra iterasyonlar tamamlanmaktadır. Elde edilen güncellenmiş sonlu eleman modeli üzerinde hasar tespiti, dinamik yükler altında

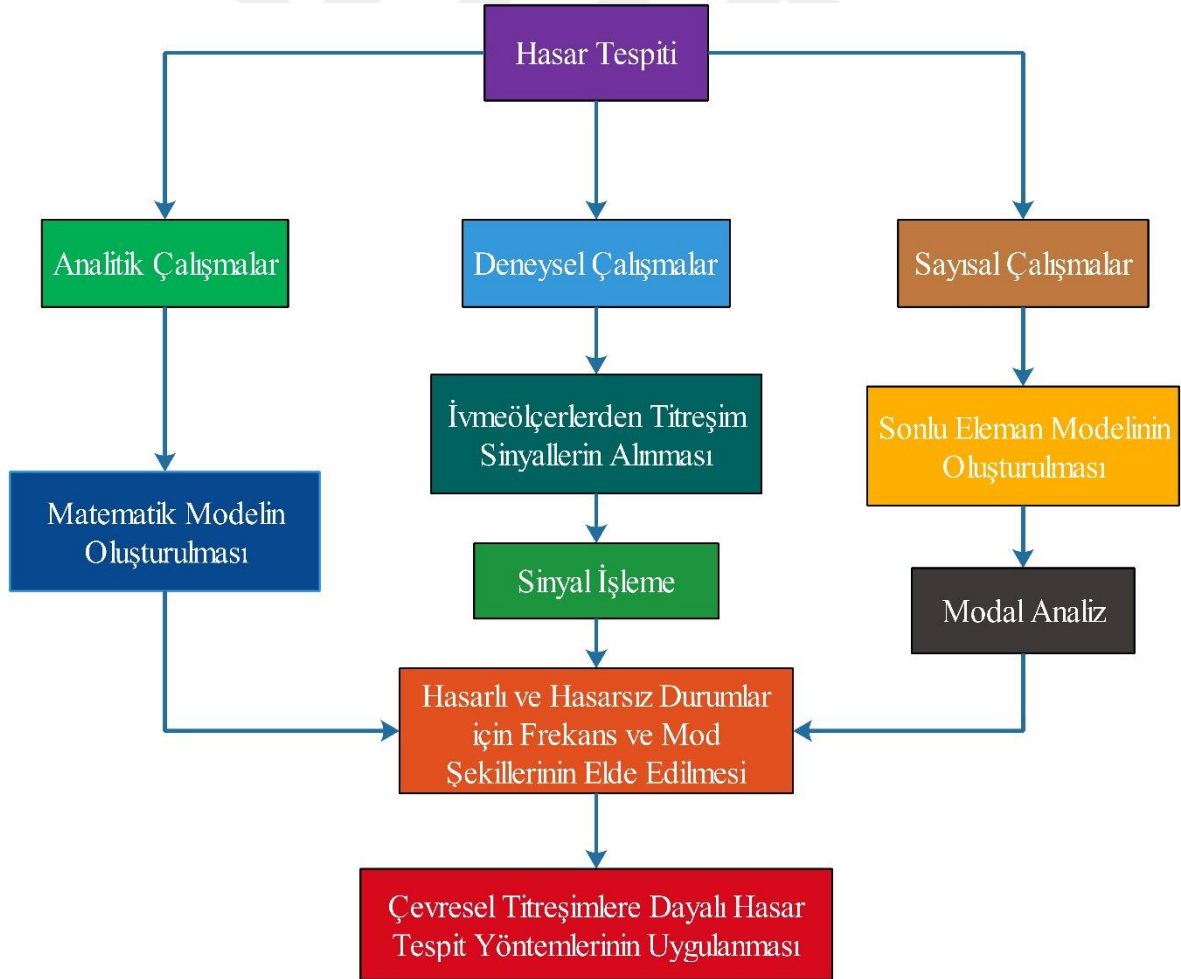
yorulma analizi, yapının kalan ömrünün tahmini, performansının değerlendirilmesi ve yapı sağlığı izlenmesi rahatlıkla yapılabilmektedir.



2. YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR

2.1. Giriş

Bu tez çalışmasında, farklı taşıyıcı sistemlere sahip yapıların analitik, sayısal ve deneysel yöntemlere dayalı hasar tespiti yapılması amaçlanmaktadır. Bu amaç doğrultusunda, boru ve kutu kesite sahip çelik konsol kiriş modeller, betonarme düzlem taşıyıcı çerçeve modeli ve Trabzon ili sınırları içerisinde yer alan ve yığma taşıyıcı sisteme sahip tarihi Trabzon Burcu üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu bakımdan yapılan çalışmalar laboratuvar ve arazi çalışmaları olmak üzere iki kısımda incelenmiştir. Hasar tespiti amacıyla gerçekleştirilen çalışmalara ait akış şeması Şekil 2.1’de verilmektedir.



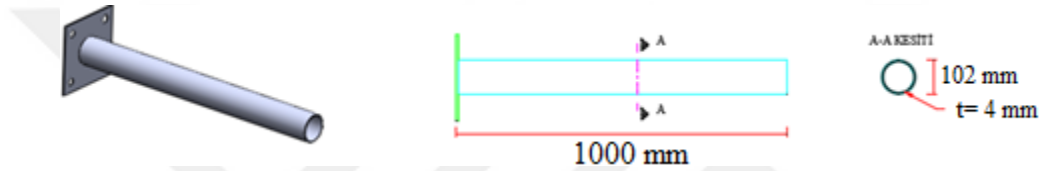
Şekil 2.1. Hasar tespiti amacıyla gerçekleştirilen çalışmalara ait yapılan akış şeması

2.2. Laboratuvar Çalışmaları

2.2.1. Boru Kesitli Konsol Kiriş Modeli

2.2.1.1. Modelin Özellikleri

Boru kesitli çelik taşıyıcı sisteme sahip konsol kiriş, 102mm çapında, 4mm et kalınlığında ve 1m uzunluğundadır. Konsol kirişe ait iki ve üç boyutlu görünüşler Şekil 2.2'de verilmektedir.

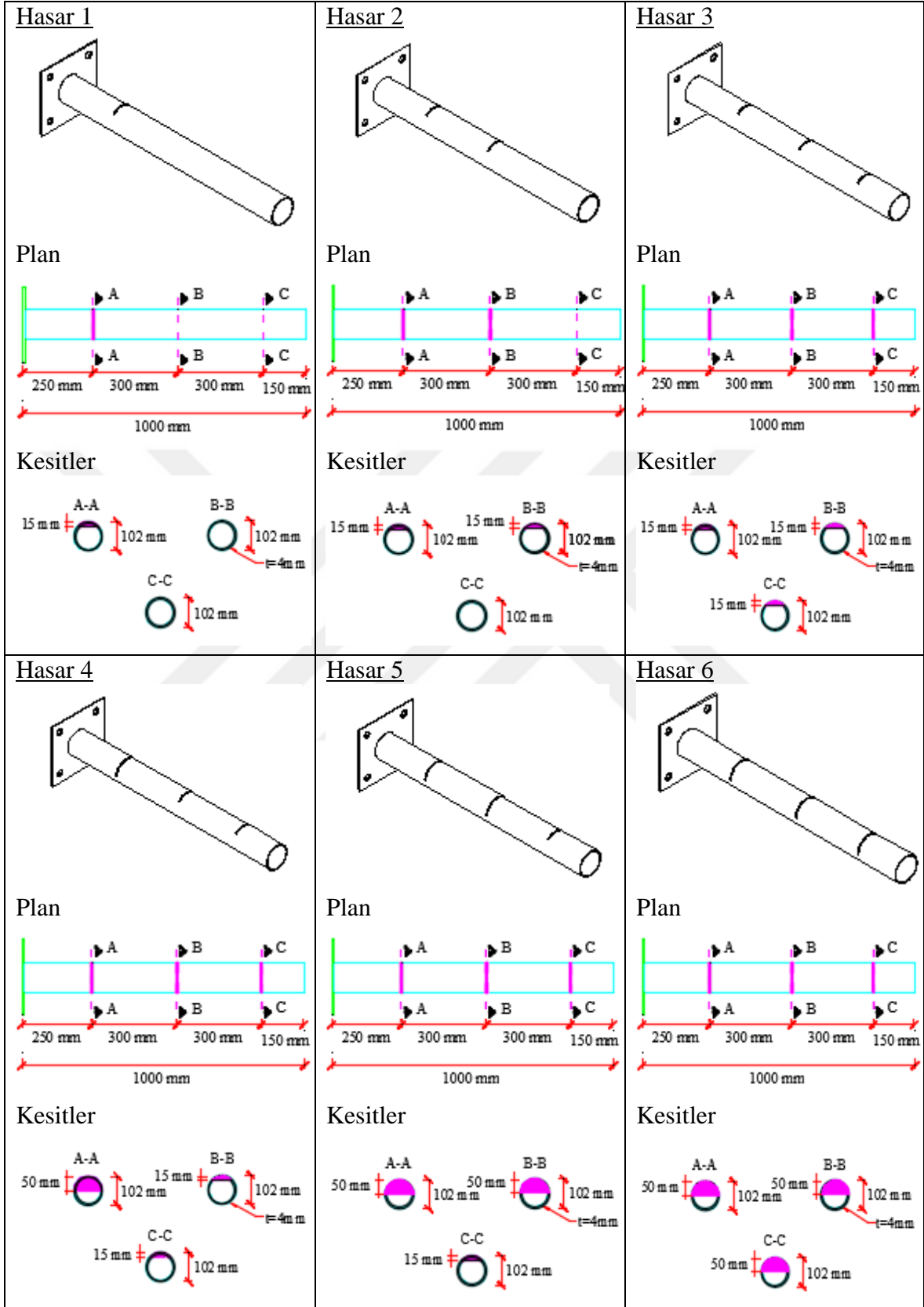


Şekil 2.2. Boru kesitli çelik konsol kiriş modeline ait görünüşler

Konsol kirişin bir ucu serbest, diğer ucu ise ankastre mesnetli olacak şekilde tasarlanmıştır. Ankastre şartını sağlamak için, laboratuvar ortamında 50×80×50 cm boyutlarında beton dökülmüş ve çelik profillerin mesnetlenmesi için de ankraj delikleri bırakılmıştır.

2.2.1.2. Hasar Yerlerin Belirlenmesi

Boru kesite sahip çelik konsol kiriş modelinin farklı hasar durumları altındaki dinamik karakteristiklerinde meydana gelen değişimleri değerlendirmek amacıyla, konsol kiriş üzerindeki farklı üç noktada altı farklı hasar durumu ve seviyesi dikkate alınmıştır. Hasar yerleri ve büyüklüklerine ait detaylı görünüşler Şekil 2.3'te verilmektedir. İlgili şekilden de görüldüğü üzere ilk üç hasar durumları ankastre mesnetten sırasıyla 25cm, 55cm ve 85cm uzaklıkta oluşturulmuştur. Bu hasar durumlarında çatlak genişliği 5mm, çatlak yüksekliği ise 15mm olarak dikkate alınmıştır. Diğer üç hasar durumu için de yine aynı noktalarda (ankastre mesnetten sırasıyla 25cm, 55cm ve 85cm uzaklıkta) çatlak genişliği 5mm çatlak yüksekliği ise 50mm olarak dikkate alınmıştır.



Şekil 2.3. Farklı hasar durumları için hasar yerleri ve büyüklüklerine ait şematik görünüşler

2.2.1.3. Analitik Yöntemlerle Dinamik Karakteristiklerin Elde Edilmesi

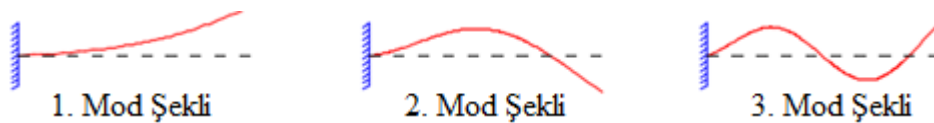
Hasarlı ve hasarsız durumlar için konsol kiriş modelinin dinamik karakteristiklerini elde etmek için Transfer Matris Yöntemi teoremi kullanılmış olup, çözümler için MATLAB arayüzünde program yazılmıştır. Analizlerde dikkate alınan malzeme özellikleri Tablo 2.1’de gösterilmektedir. Hasarsız ve altı farklı hasar durumu için analitik çözümler gerçekleştirilmiş ve dinamik karakteristikler elde edilmiş olup, frekans değerleri ile elde edilen maksimum farklar Tablo 2.2’de verilmektedir. Tablo 2.2’den de görüldüğü gibi, hasarsız durum için konsol kirişin frekans değerleri 99,64-1507,41Hz arasında elde edilmiştir. Hasar arttıkça, frekans değerlerinin azaldığı görülmektedir. Frekanslar arasındaki maksimum fark, 4. Hasar durumunda %22,76 olarak elde edilmiştir. Şekil 2.4’de ise analitik çözümler sonucunda elde edilen mod şekilleri gösterilmektedir.

Tablo 2.1. Boru kesitli çelik konsol kirişe ait malzeme özellikleri

Malzeme Özellikleri	Değerler
Elastisite Modülü (N / m ²)	2,06×10 ¹¹
Birim Kütle (kg / m ³)	7850
Poisson Oranı (-)	0,3

Tablo 2.2. Analitik olarak elde edilen doğal frekansların karşılaştırılması

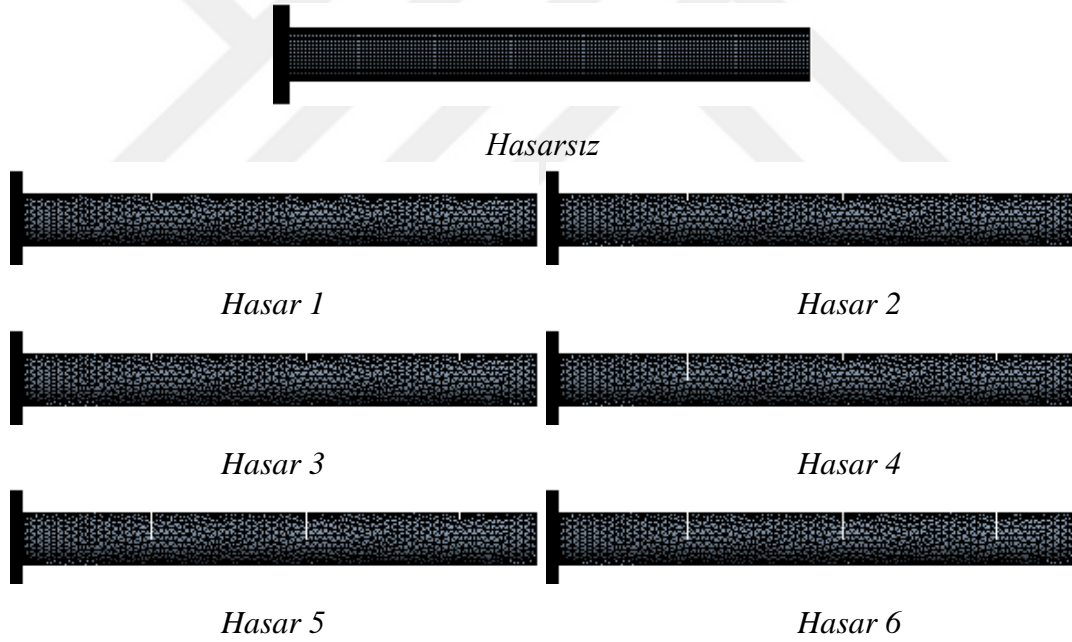
Mod Numarası	Hasarsız (Hz)	Hasar Durumları (Hz)					
		1	2	3	4	5	6
1	99,64	93,74	92,72	92,79	71,67	69,08	69,08
2	585,62	583,90	548,24	545,88	543,67	425,24	418,56
3	1507,41	1453,60	1430,40	1404	1253,60	1172,70	1112,90
Maksimum Fark (%)							
1	-5,92	-1,09	+0,08	-22,76	-3,61	0	
2	-0,29	-6,11	-0,43	-0,41	-21,78	-1,57	
3	-3,57	-1,60	-1,85	-10,71	-6,45	-5,10	



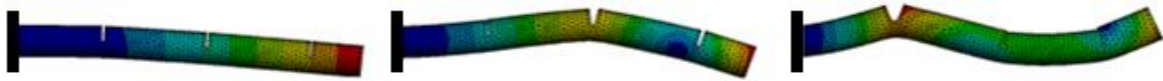
Şekil 2.4. Hasarlı ve hasarsız durumlar için elde edilen ilk üç mod şekli

2.2.1.4. Sonlu Eleman Yöntemiyle Dinamik Karakteristiklerin Elde Edilmesi

Hasarlı ve hasarsız durumlardaki çelik konsol kirişin dinamik karakteristiklerini sayısal olarak belirlemek için Sonlu Eleman Yöntemi kullanılmıştır. Dinamik karakteristikler ANSYS (2008) programı kullanılarak elde edilmiştir. Kirişin sonlu eleman modeli üç boyutlu katı elemanlar kullanılarak yapılmıştır. Konsol kirişin hasarsız ve farklı hasar durumları dikkate alınarak oluşturulan sonlu eleman modelleri Şekil 2.5'te, analizler sonucunda elde edilen ilk üç mod şekilleri Şekil 2.6'da gösterilmekte olup, doğal frekans değerleri ile frekanslar arasında elde edilen maksimum fark Tablo 2.3'te özetlenmektedir. Tablo 2.3'de görüldüğü gibi, hasarsız durumda elde edilen frekans değerleri 102,40-1451,70Hz arasında değişmekte olup, hasar arttıkça frekansların azaldığı görülmektedir. Frekanslar arasındaki maksimum fark, 4. Hasar durumunda %25,34 olarak elde edilmiştir.



Şekil 2.5. Boru kesitli konsol kirişin hasarsız ve hasarlı durumlar için oluşturulan sonlu eleman modelleri



Şekil 2.6. Boru kesitli konsol kirişin Hasar 6 durumu için sonlu eleman analizleri sonucu elde edilen ilk üç mod şekli

Tablo 2.3. Sonlu eleman analizleri sonucu elde edilen doğal frekans değerleri

Mod Numarası	Hasarsız (Hz)	Hasar Durumları (Hz)					
		1	2	3	4	5	6
1	102,40	96,84	95,92	96,05	71,71	68,88	68,94
2	583,21	581,74	550,61	548,56	541,89	414,19	406,68
3	1451,70	1426,30	1392,40	1369	1351	1198,50	1123,80
Maksimum Fark (%)							
1	-5,43	-0,95	+0,14	-25,34	-3,95	+0,09	
2	-0,25	-5,35	-0,37	-1,22	-23,57	-1,81	
3	-1,75	-2,38	-1,68	-1,31	-11,29	-6,23	

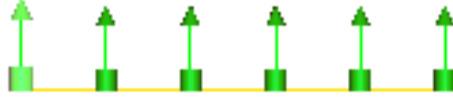
2.2.1.5. Deneysel Modal Analiz Yöntemiyle Dinamik Karakteristiklerin Elde Edilmesi

Çelik taşıyıcı sisteme sahip boru kesitli konsol kirişin frekans, mod şekli ve sönüm oranı gibi dinamik karakteristiklerini deneysel olarak elde etmek amacıyla kirişin modeli laboratuvar ortamında oluşturulmuş ve çevresel titreşim testleri uygulanmıştır. Deneysel ölçümler sırasında B&K 4507 tipi tek eksenli ivmeölçerler kullanılmıştır. 10 dakika boyunca devam eden ölçümlerdeki titreşim verileri, B&K 3560 tipi 17 kanallı veri toplama ünitesinde toplanmış ve PULSE yazılımına aktarılarak işlenmiştir. İşlenen sinyaller OMA yazılımına aktarılarak dinamik karakteristikler elde edilmiştir.

Deneysel ölçümler sonucunda mod şekillerinin doğru olarak belirlenmesi amacıyla analitik ve sayısal olarak belirlenen mod şekilleri ve modal hareket noktaları incelenmiş olup, ivmeölçerler düşey yönde yerleştirilmiştir. İvmeölçerlerin yerleşimine ait görünüş Şekil 2.7’de verilmektedir. Laboratuvar modeli ve farklı hasar durumlarına ait bazı görünüşler ise Şekil 2.8’de gösterilmektedir.

Hasarsız ve altı farklı hasar durumu için çevresel titreşim testleri sonucunda toplanan sinyallerin, GFTAA yöntemine göre ayrıştırılması sonucu elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri ve bu matrislerin ortalamaları ile SAB yöntemine göre ayrıştırılması sonucu elde edilen kararlılık diyagramları Şekil 2.9-2.15’te detaylı olarak verilmektedir. İlgili şekiller incelendiğinde, her bir çevresel titreşim testinden elde edilen spektral yoğunluk matrisleri ile kararlılık diyagramlarının birbirleriyle uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Hasarsız ve hasarlı durumlar için elde edilen mod şekillerinin karşılaştırılması amacıyla, hasarsız durum ile 6. Hasar durumu için elde edilen ilk üç mod şekli Şekil 2.16’da gösterilmektedir. Ayrıca, her bir durum için belirlenen frekans değerleri

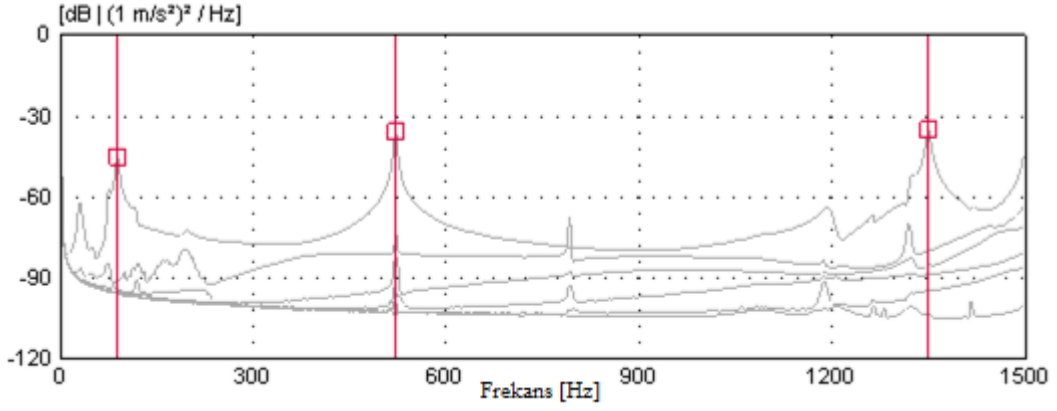
ile elde edilen maksimum farklılıklar Tablo 2.4'te özetlenmektedir. Tablo 2.4 detaylı olarak incelendiğinde, hasarsız durum için elde edilen frekans değerlerinin 89,04-1350,0Hz arasında olduğu görülmekte olup, ileri hasar durumlarında frekans değerlerinin düştüğü görülmektedir. Maksimum farklılık 4. Hasar durumu için %28,37 olarak elde edilmiştir.



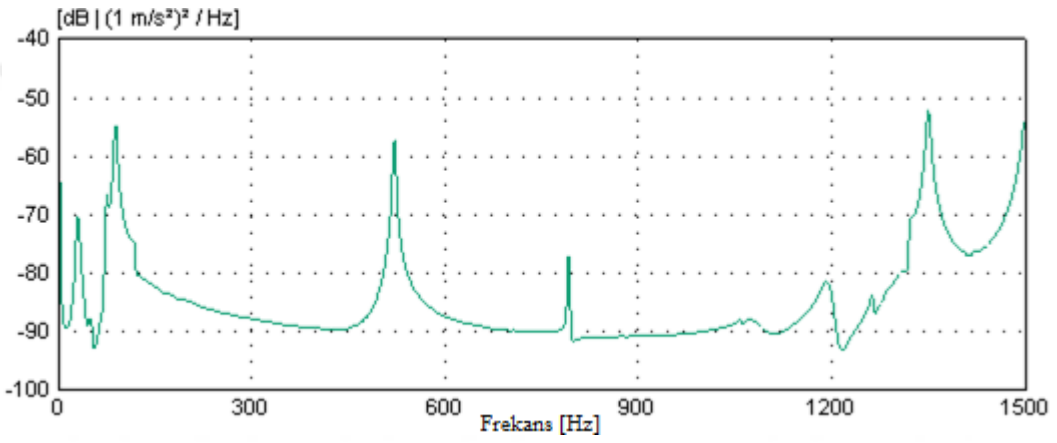
Şekil 2.7. İvmeölçerlerin yerleşim yerleri



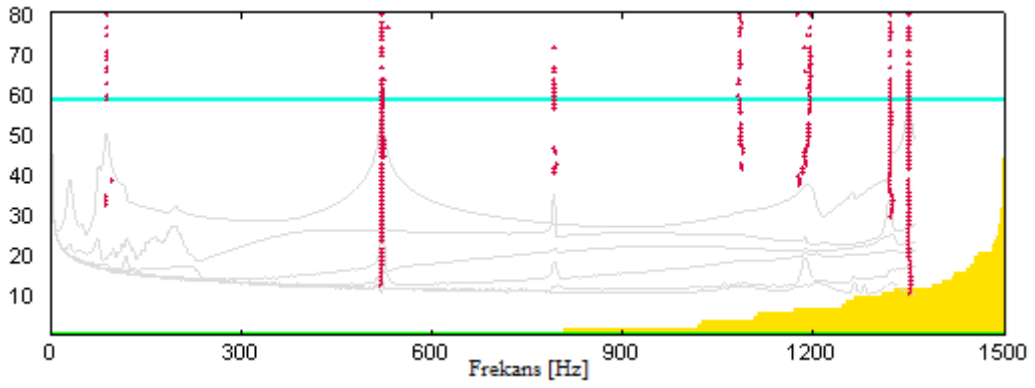
Şekil 2.8. Laboratuvar ortamında inşa edilen boru kesitli çelik konsol kiriş modeli



a) Spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri

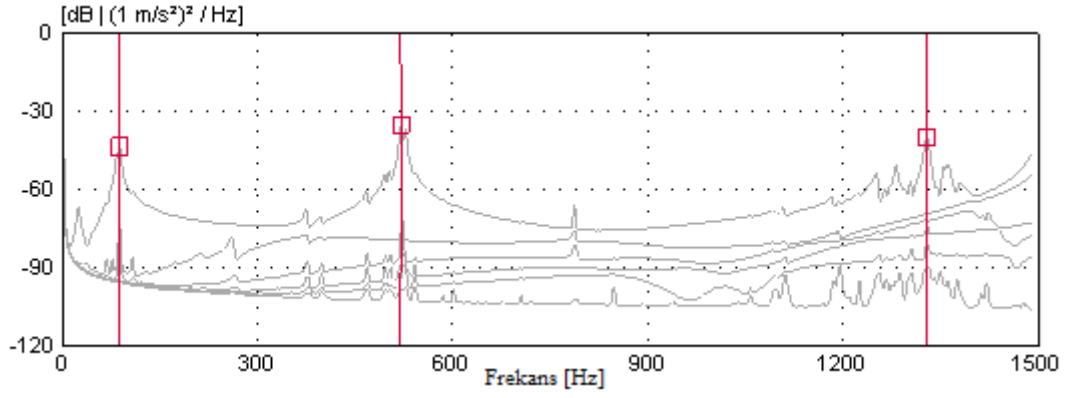


b) Spektral yoğunluk matrislerinin ortalaması

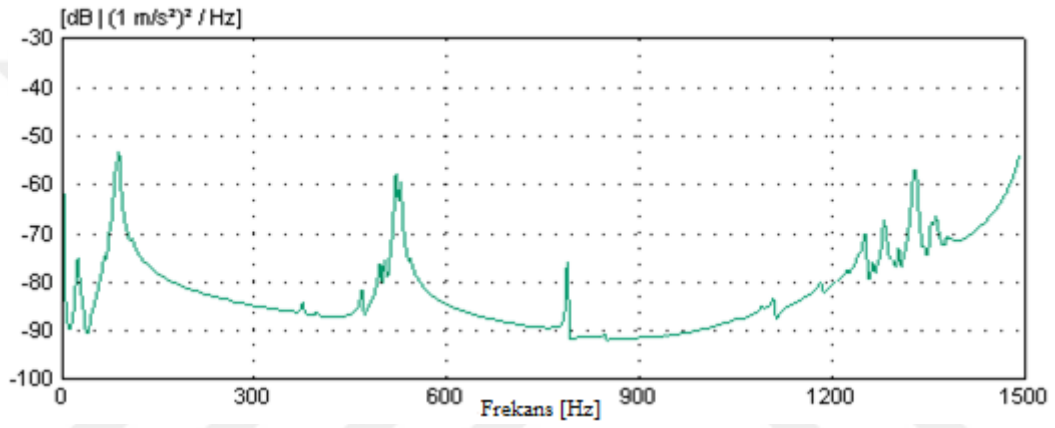


c) Kararlılık diyagramı

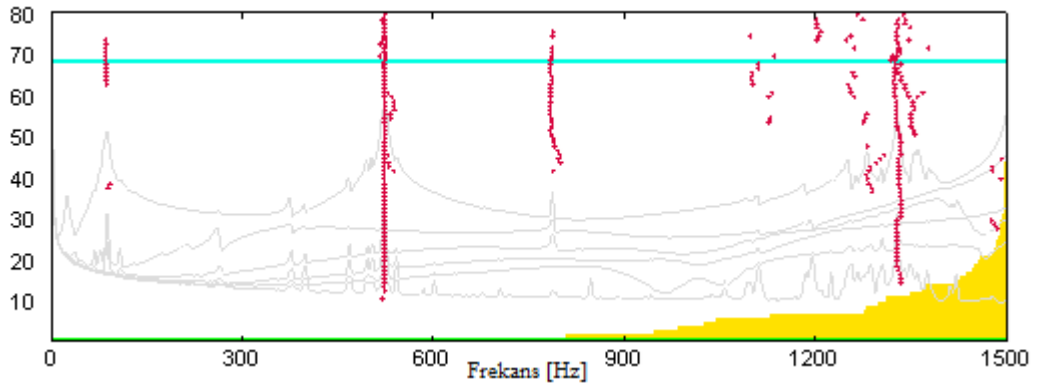
Şekil 2.9. Hasarsız durum için elde edilen spektral yoğunluk matrisleri ve kararlılık diyagramı



a) Spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri

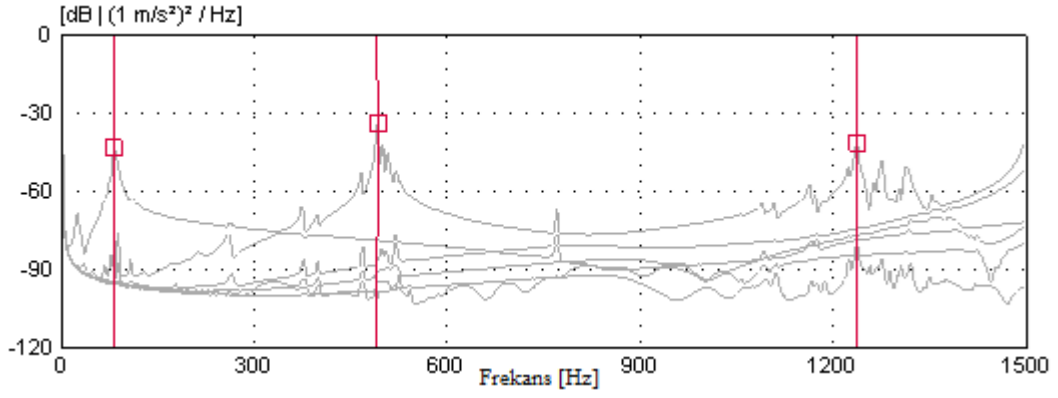


b) Spektral yoğunluk matrislerinin ortalaması

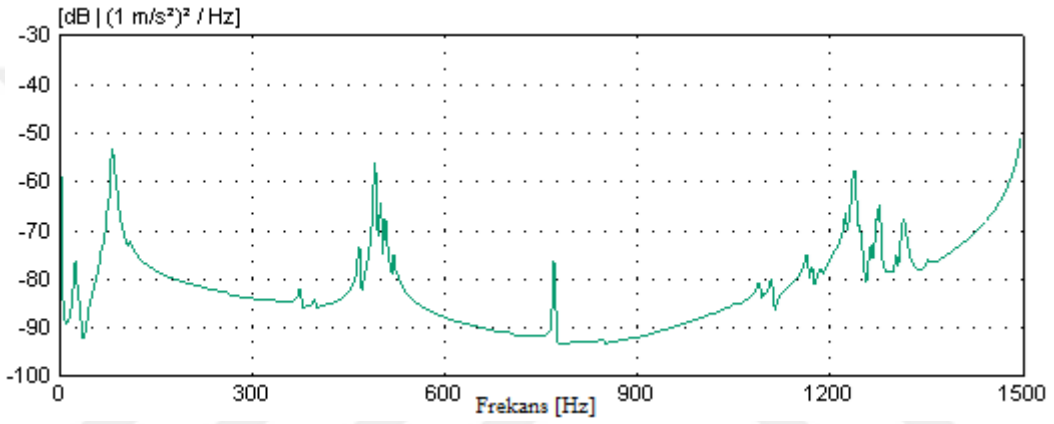


c) Kararlılık diyagramı

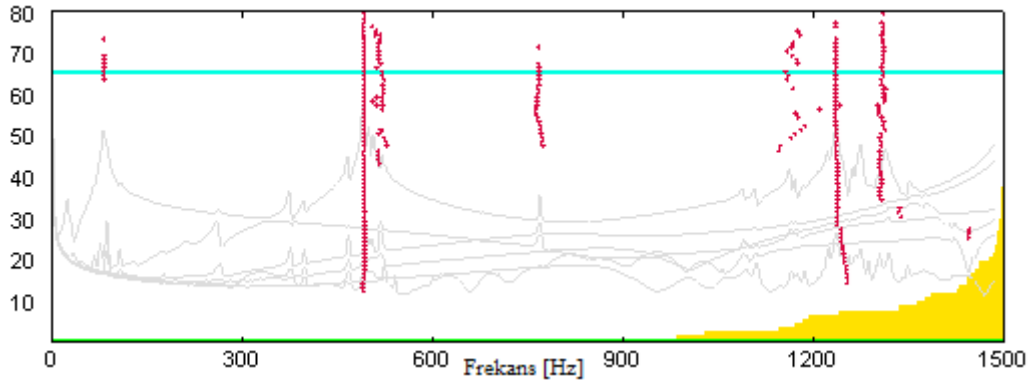
Şekil 2.10. Hasar 1 durumu için elde edilen spektral yoğunluk matrisleri ve kararlılık diyagramı



a) Spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri

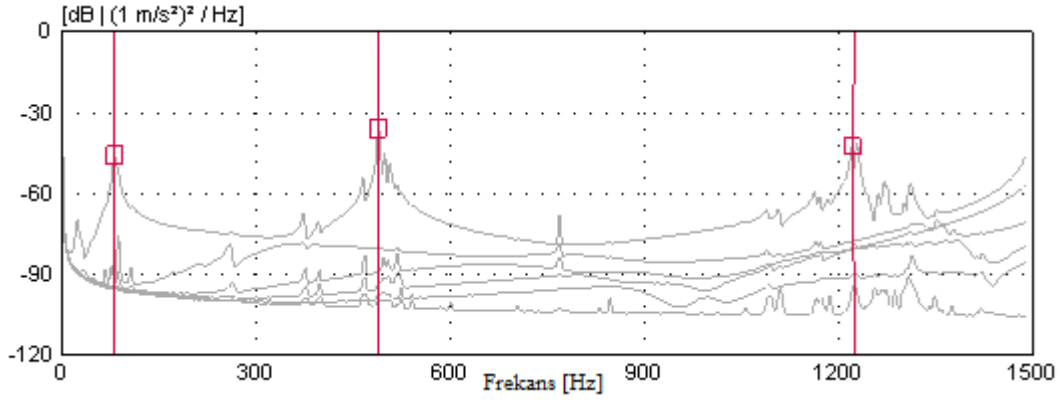


b) Spektral yoğunluk matrislerinin ortalaması

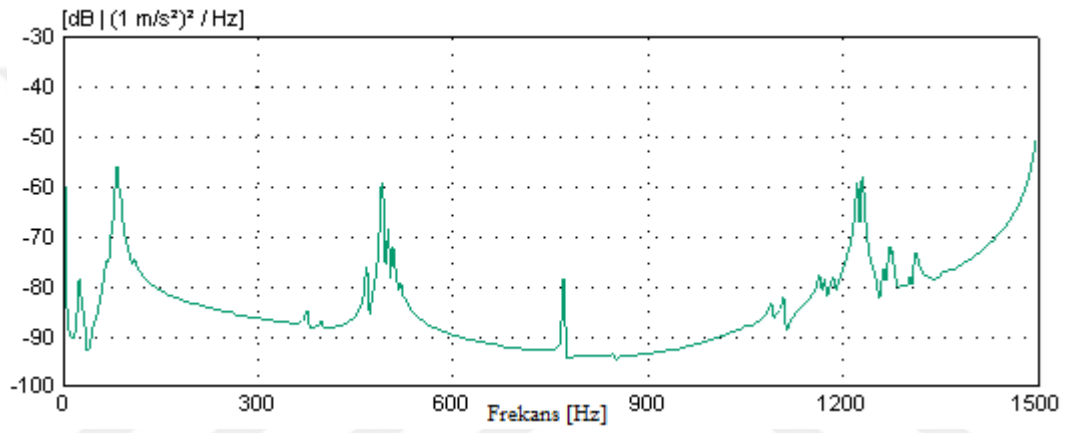


c) Kararlılık diyagramı

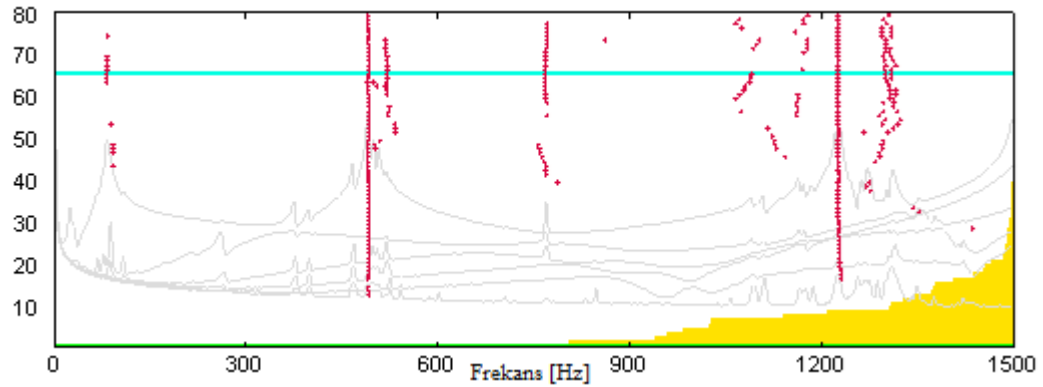
Şekil 2.11. Hasar 2 durumu için elde edilen spektral yoğunluk matrisleri ve kararlılık diyagramı



a) Spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri

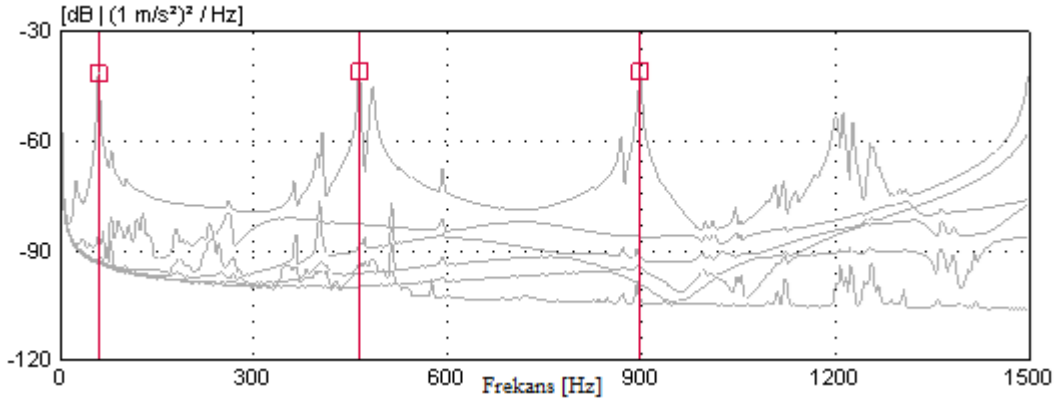


b) Spektral yoğunluk matrislerinin ortalaması

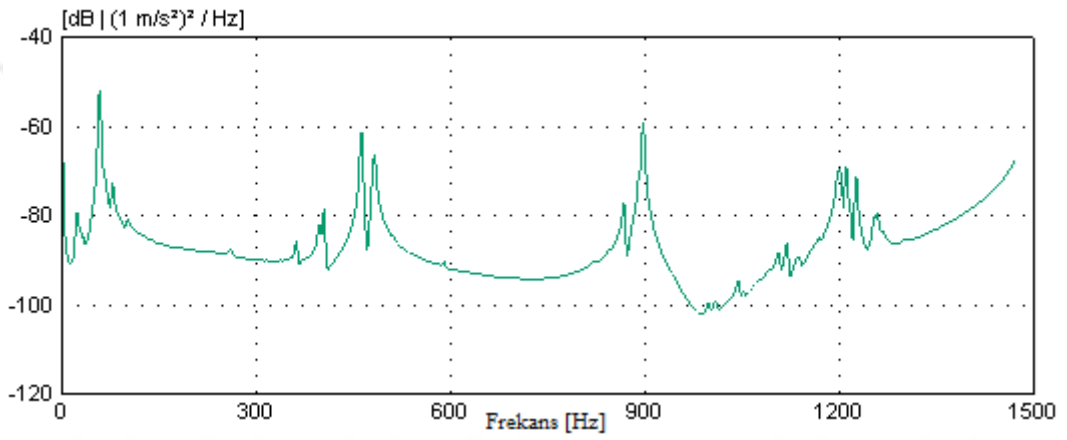


c) Kararlılık diyagramı

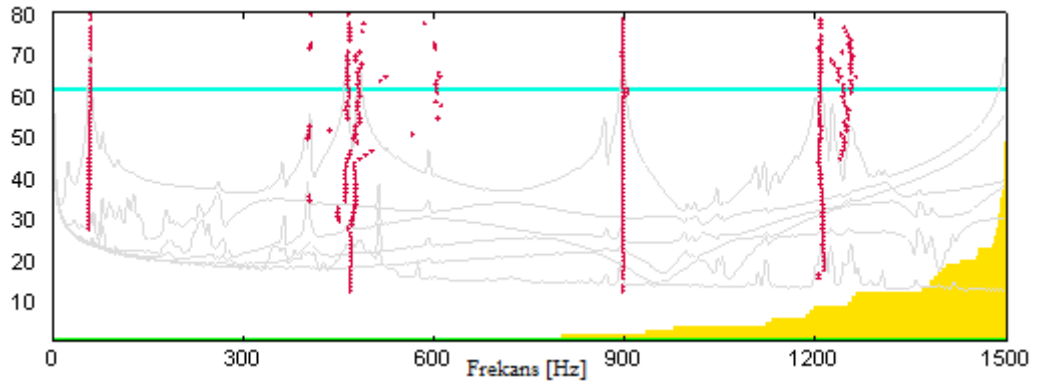
Şekil 2.12. Hasar 3 durumu için elde edilen spektral yoğunluk matrisleri ve kararlılık diyagramı



a) Spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri

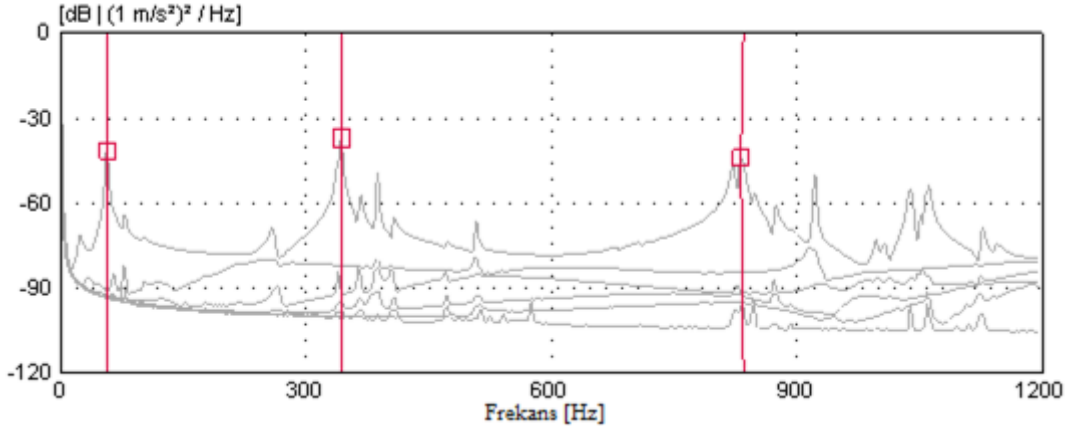


b) Spektral yoğunluk matrislerinin ortalaması

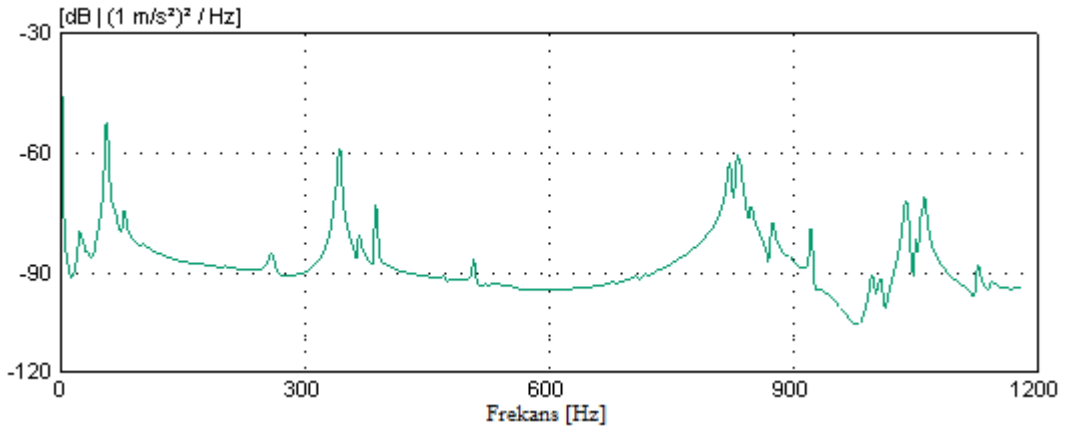


c) Kararlılık diyagramı

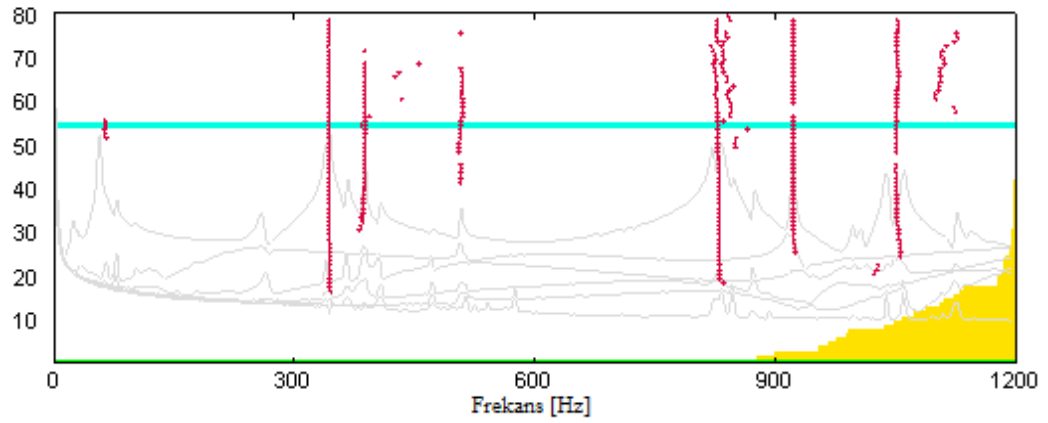
Şekil 2.13. Hasar 4 durumu için elde edilen spektral yoğunluk matrisleri ve kararlılık diyagramı



a) Spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri

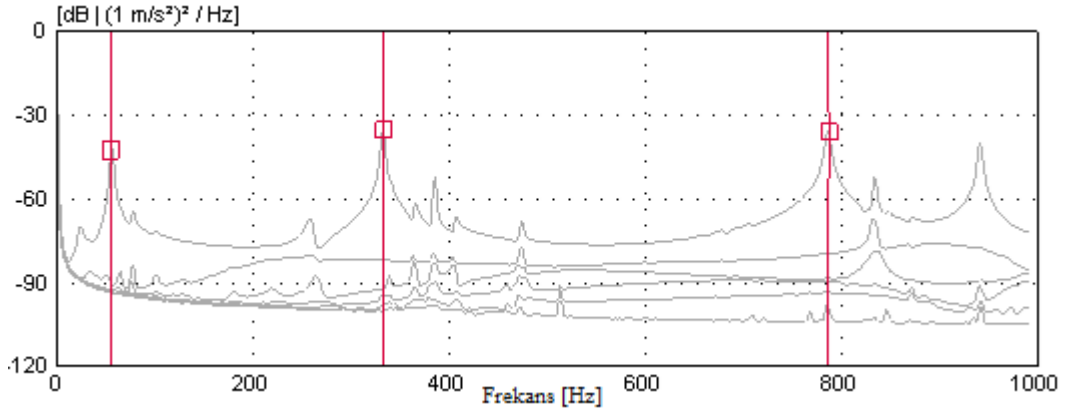


b) Spektral yoğunluk matrislerinin ortalaması

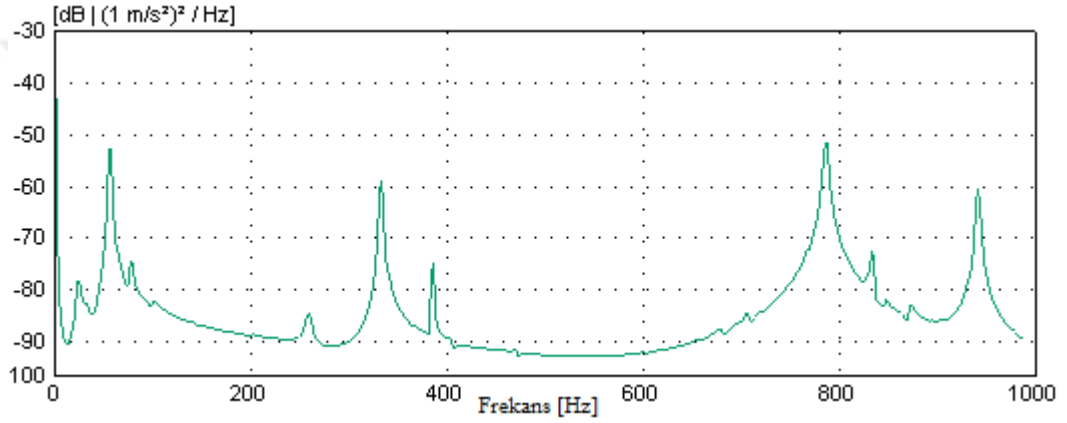


c) Kararlılık diyagramı

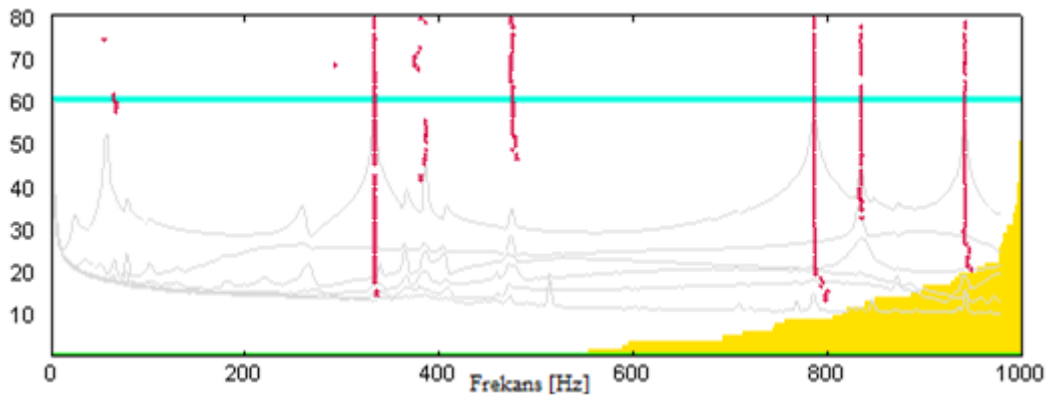
Şekil 2.14. Hasar 5 durumu için elde edilen spektral yoğunluk matrisleri ve kararlılık diyagramı



a) Spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri

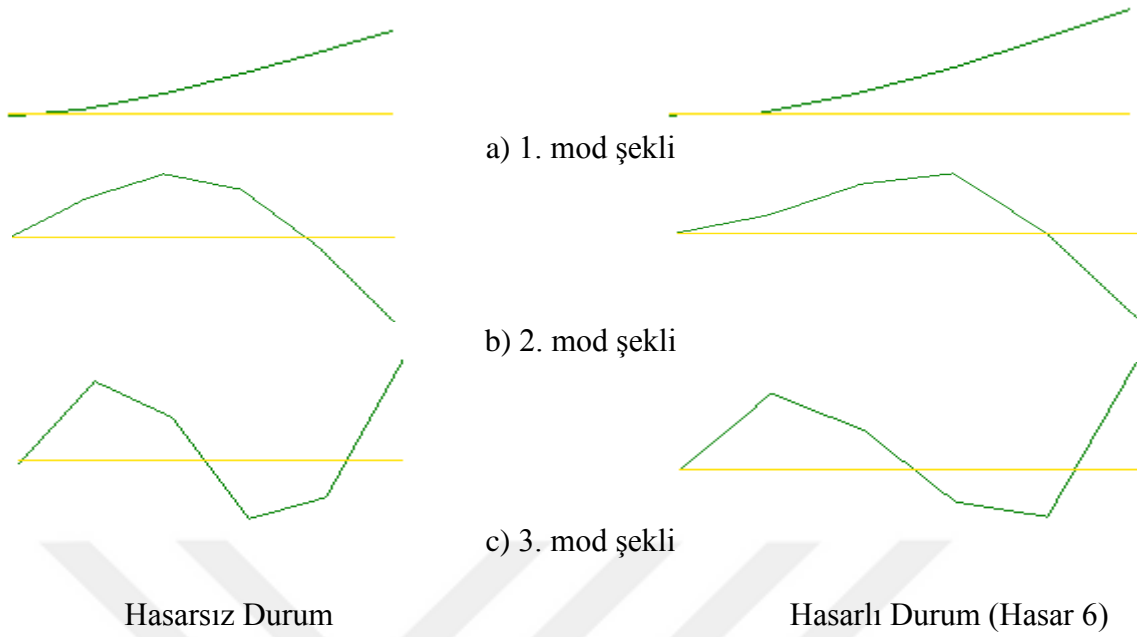


b) Spektral yoğunluk matrislerinin ortalaması



c) Kararlılık diyagramı

Şekil 2.15. Hasar 6 durumu için elde edilen spektral yoğunluk matrisleri ve kararlılık diyagramı



Şekil 2.16. Hasarsız ve hasarlı durum için deneysel olarak elde edilen ilk üç mod şekli

Tablo 2.4. Deneysel olarak elde edilen frekansların karşılaştırılması

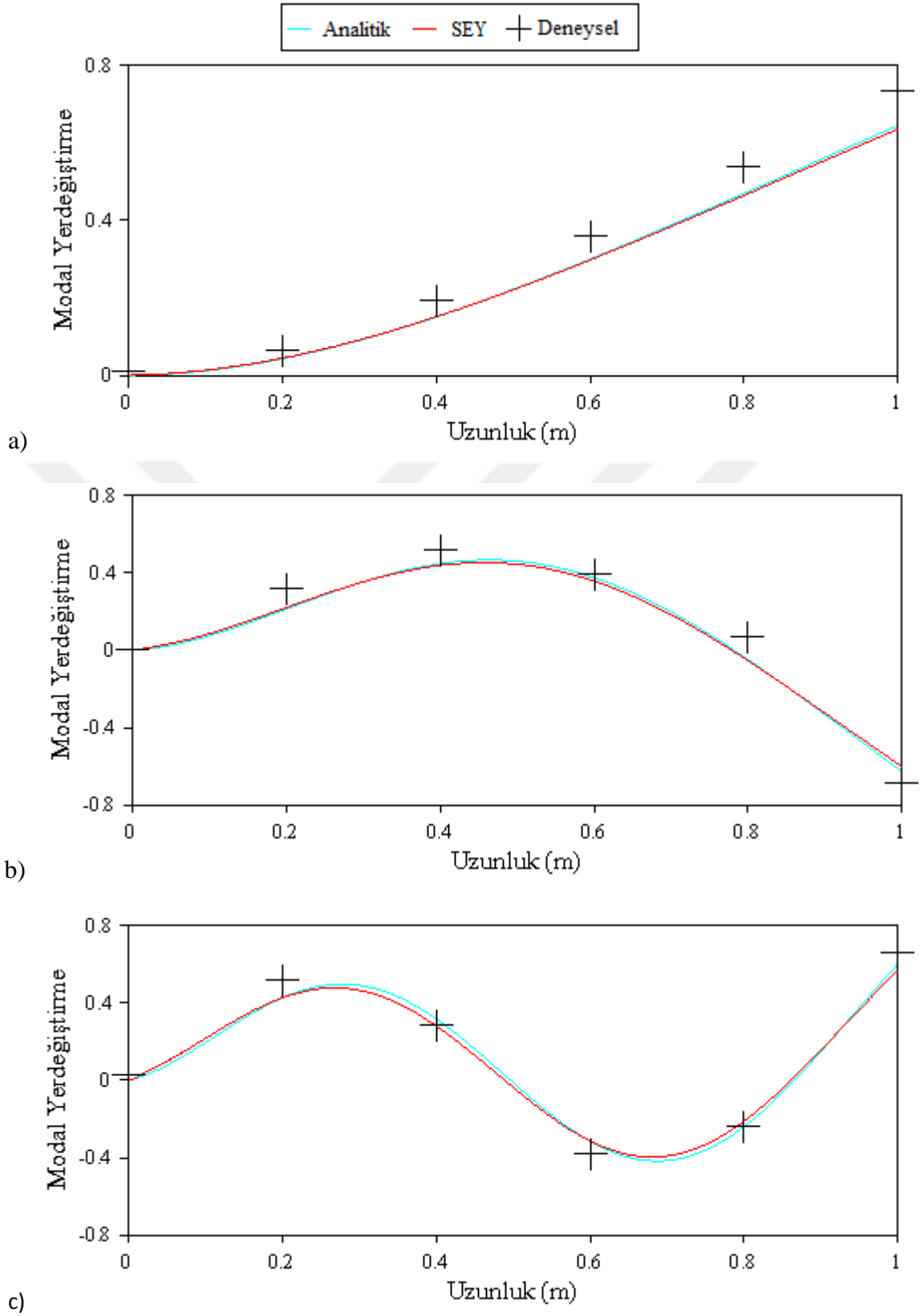
Mod Numarası	Hasarsız (Hz)	Hasar Durumları (Hz)					
		1	2	3	4	5	6
1	89,04	88,05	82,80	82,95	59,42	57,22	57,10
2	521,8	519,80	491,60	490,90	463,0	343,50	333,30
3	1350	1329	1237	1227	898,30	835,30	787,0
Maksimum Farklar (%)							
1	-1,11	-5,96	+0,18	-28,37	-3,70	-0,21	
2	-0,38	-5,43	-0,14	-5,68	-25,81	-2,97	
3	-1,56	-6,92	-0,81	-26,79	-7,01	-5,78	

2.2.1.6. Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırılması

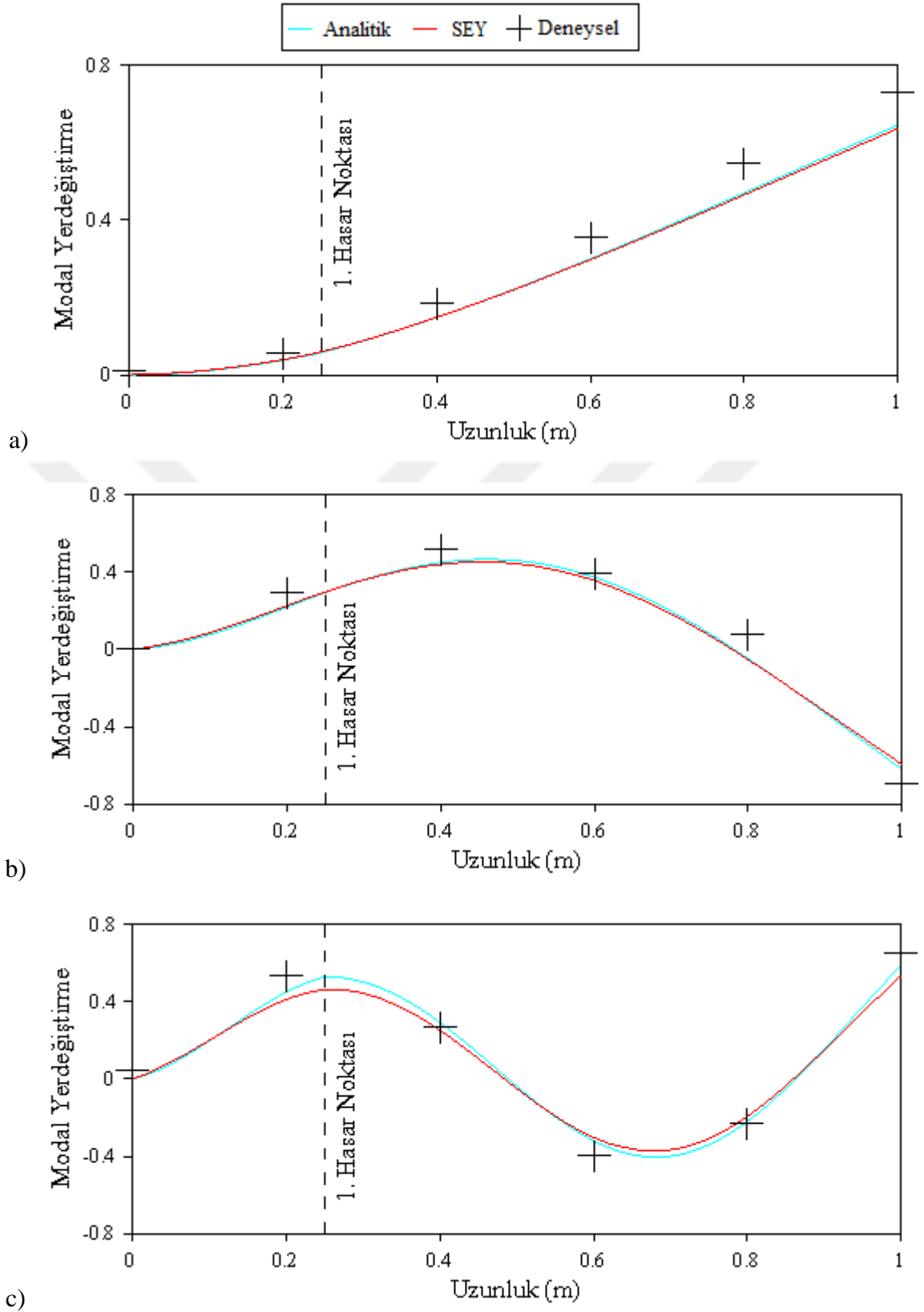
Boru kesitli çelik konsol kiriş için hasarsız ve hasarlı durumlar dikkate alınarak analitik, sayısal ve deneysel olarak elde edilen frekans ile bu frekanslara ait maksimum fark Tablo 2.5’de özetlenmekte olup, elde edilen ait mod şekilleri ise Şekil 2.17-2.23’te detaylı olarak gösterilmektedir. Tablo 2.5 ve Şekil 2.17-2.23 detaylı olarak incelendiğinde, hasarların frekans ve mod şekilleri üzerinde önemli derecede etkili olduğu görülmektedir.

Tablo 2.5. Hasarlı ve hasarsız durumlar için analitik, sayısal ve deneysel yöntemlerle elde edilen doğal frekansların karşılaştırılması

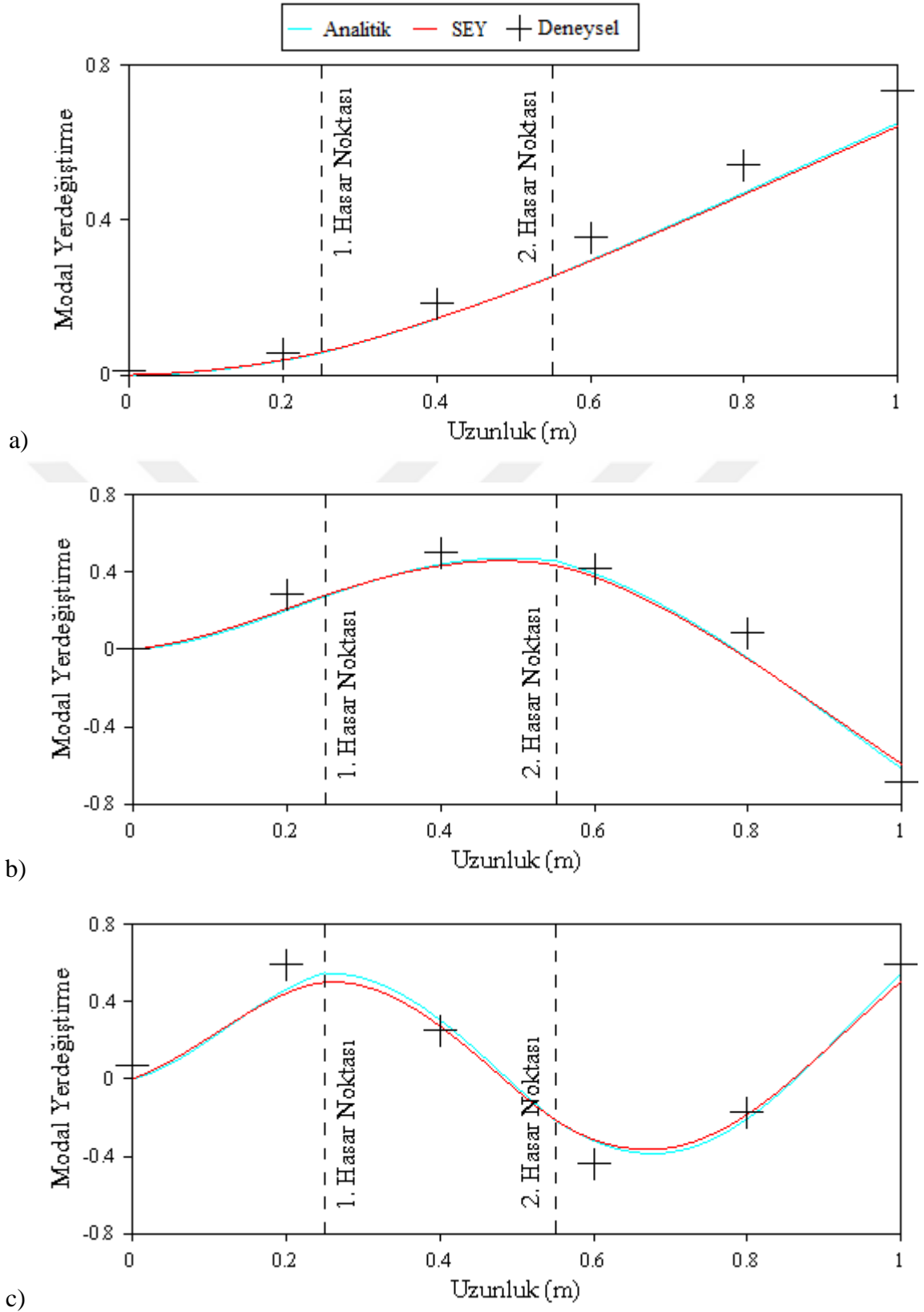
Mod Numarası	Analitik	Fark (%)	Deneysel		Fark (%)	SEY
			GFTAA	SAB		
Hasarsız						
1	99,64	11,90	89,04	88,94	15,00	102,40
2	585,62	12,23	521,8	521,5	11,77	583,21
3	1507,41	11,66	1350	1350	7,530	1451,70
Hasar 1						
1	93,74	6,46	88,05	86,02	9,980	96,84
2	583,90	12,33	519,80	525	11,92	581,74
3	1453,60	9,38	1329	1326	7,320	1426,30
Hasar 2						
1	92,72	11,98	82,80	82,85	15,85	95,92
2	548,24	11,2	491,60	492,90	12,00	550,61
3	1430,40	15,63	1237	1235	12,56	1392,40
Hasar 3						
1	92,79	11,86	82,95	81,87	15,79	96,05
2	545,88	11,20	490,90	491,60	11,75	548,56
3	1404	14,43	1227	1226	11,57	1369
Hasar 4						
1	71,67	20,62	59,42	60,09	20,68	71,71
2	543,67	17,42	463	466,40	17,00	541,89
3	1253,60	39,55	898,30	898,20	50,40	1351
Hasar 5						
1	69,08	20,73	57,22	65,43	20,38	68,88
2	425,24	23,79	343,50	343,20	20,58	414,19
3	1172,70	40,39	835,30	829,50	43,48	1198,50
Hasar 6						
1	69,08	20,98	57,10	64,12	20,74	68,94
2	418,56	25,58	333,30	333,40	22,02	406,68
3	1112,90	51,58	787	786,90	42,79	1123,80



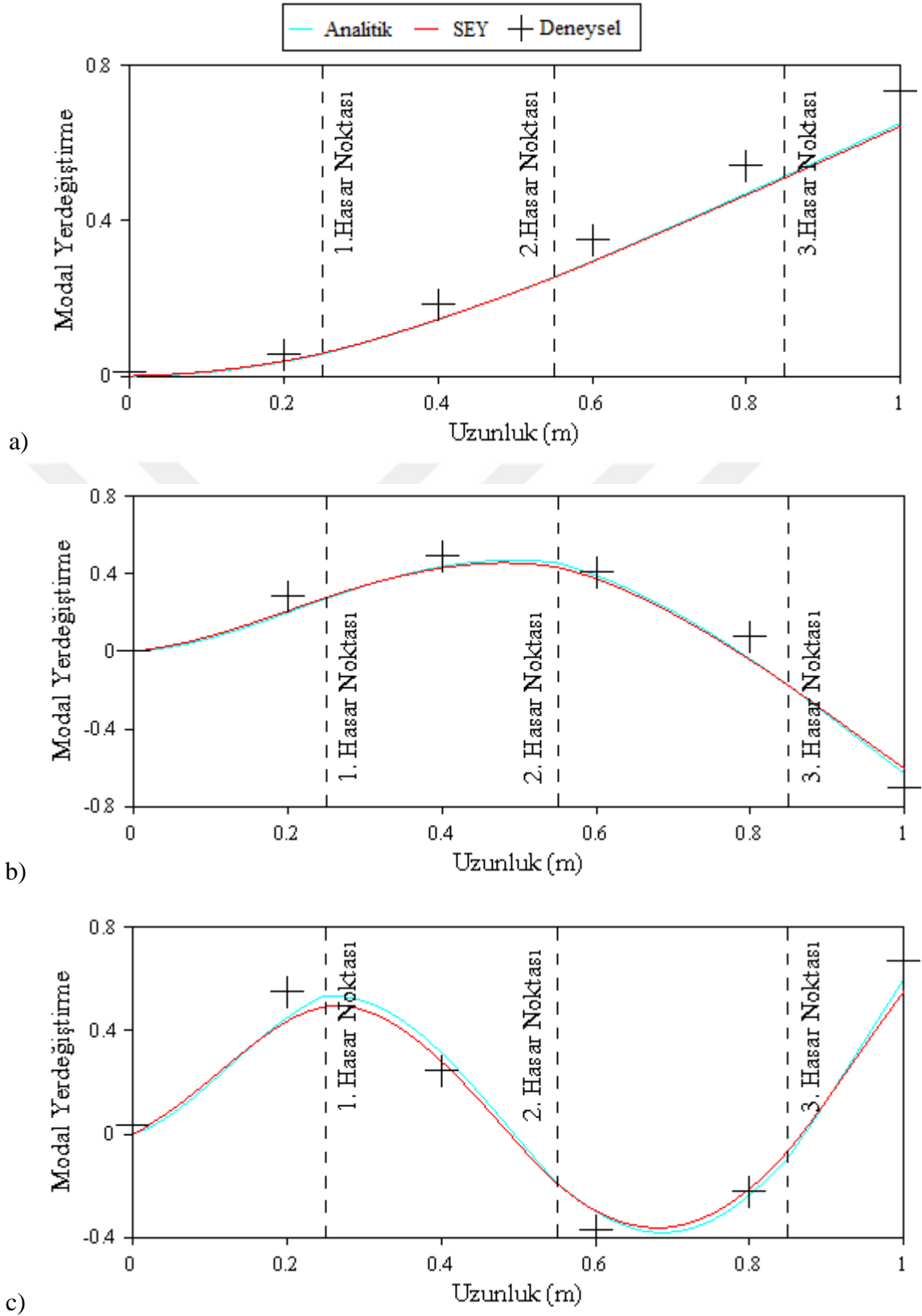
Şekil 2.17. Hasarsız durum için elde edilen (a) birinci, (b) ikinci ve (c) üçüncü mod şeklinin karşılaştırılması



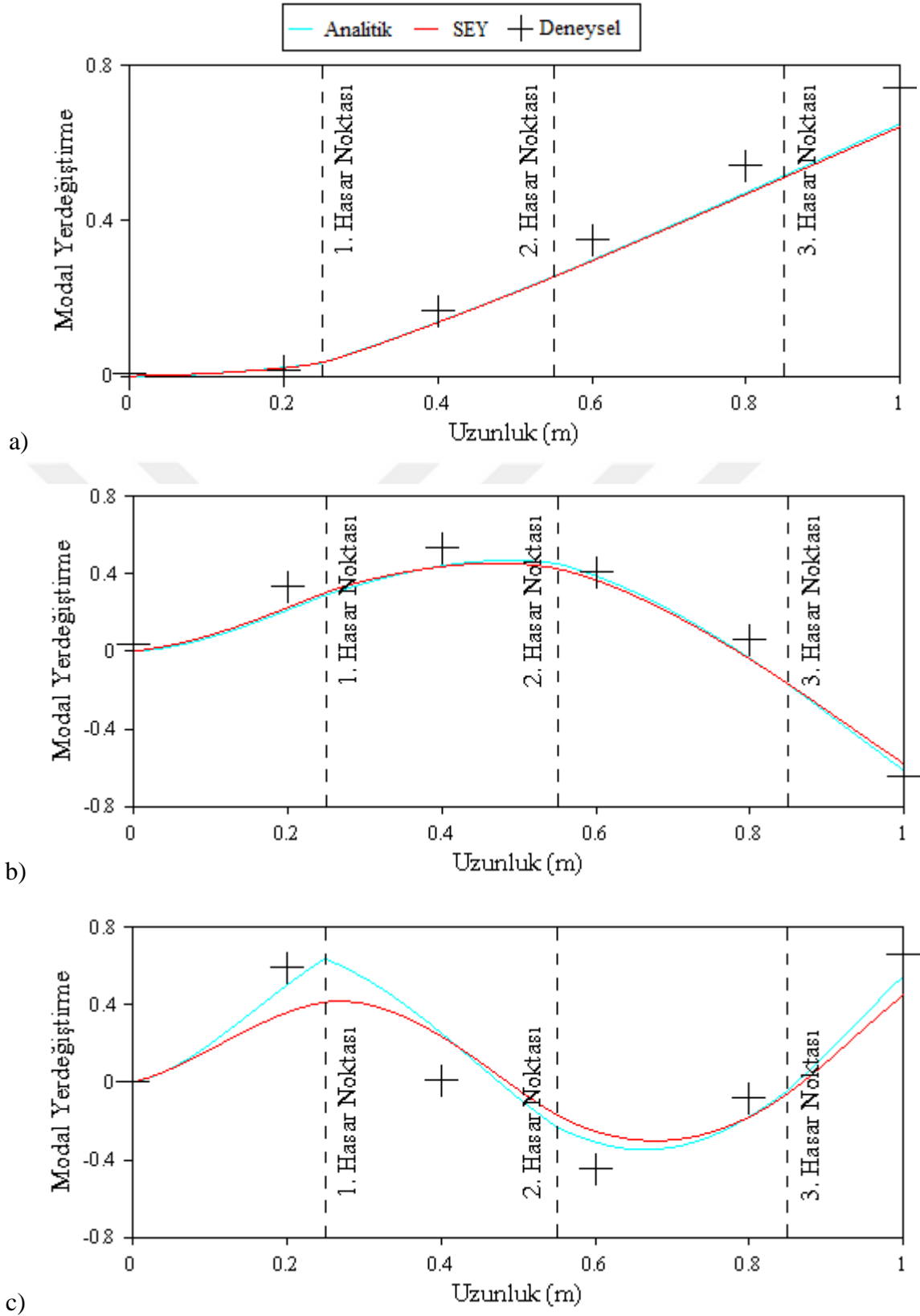
Şekil 2.18. Hasar 1 durumu için elde edilen (a) birinci, (b) ikinci ve (c) üçüncü mod şeklinin karşılaştırılması



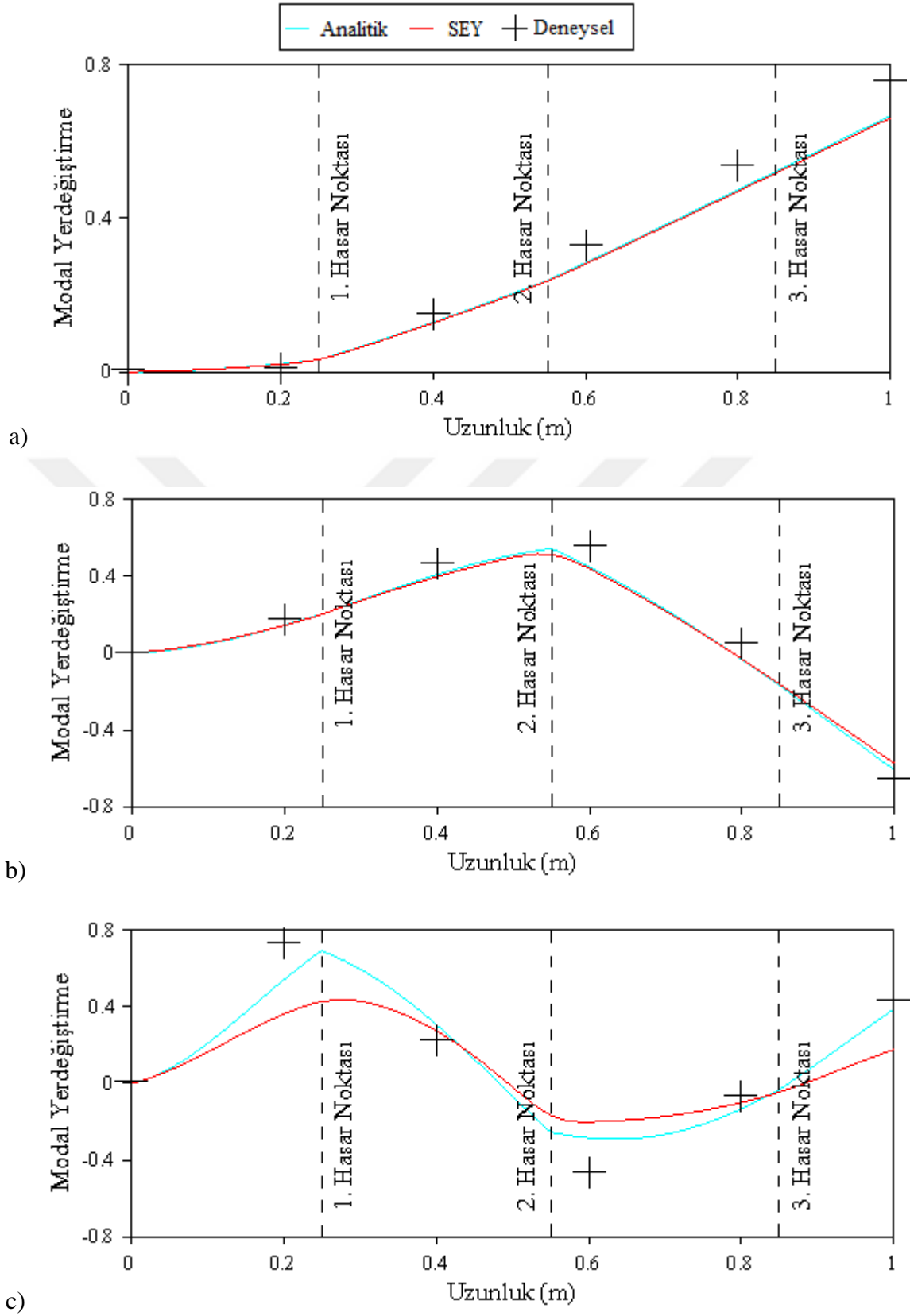
Şekil 2.19. Hasar 2 durumu için elde edilen (a) birinci, (b) ikinci ve (c) üçüncü mod şeklinin karşılaştırılması



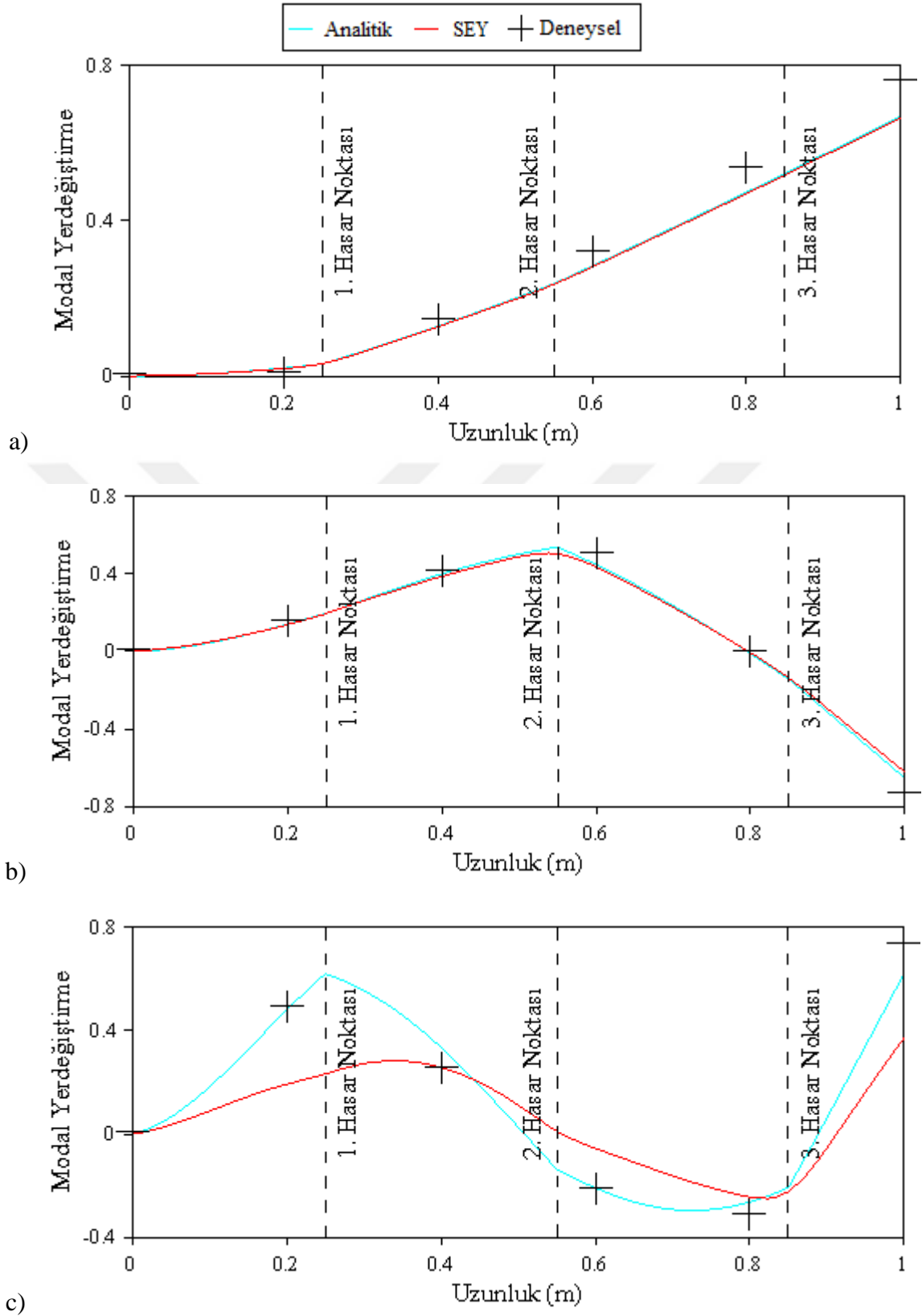
Şekil 2.20. Hasar 3 durumu için elde edilen (a) birinci, (b) ikinci ve (c) üçüncü mod şeklinin karşılaştırılması



Şekil 2.21. Hasar 4 durumu için elde edilen (a) birinci, (b) ikinci ve (c) üçüncü mod şeklinin karşılaştırılması



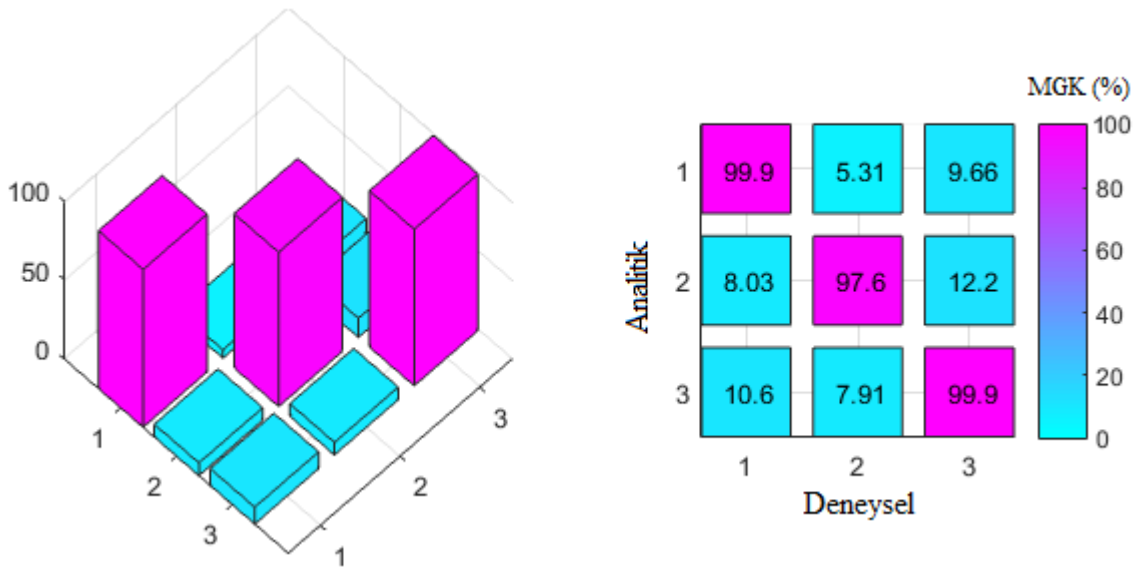
Şekil 2.22. Hasar 5 durumu için elde edilen (a) birinci, (b) ikinci ve (c) üçüncü mod şeklinin karşılaştırılması



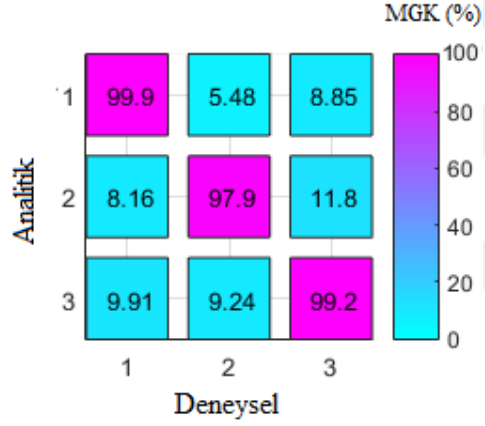
Şekil 2.23. Hasar 6 durumu için elde edilen (a) birinci, (b) ikinci ve (c) üçüncü mod şeklinin karşılaştırılması

Ayrıca farklı hasar durumlarında analitik, sayısal ve deneysel olarak elde edilen birinci ve ikinci mod şekillerinin birbirleriyle uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Fakat üçüncü mod şekline bakıldığında, hasarın artmasıyla birlikte Sonlu Eleman Yöntemi ile elde edilen mod şeklinde bozulmaların meydana geldiği belirlenmiştir. Bunun nedeni ise, ilerleyen hasar durumları arttıkça sonlu eleman modelinde bulunan eleman sayısının belirli bir şekilde azalmasıdır. Bu durumda mod şeklinin de değişmesine neden olmaktadır.

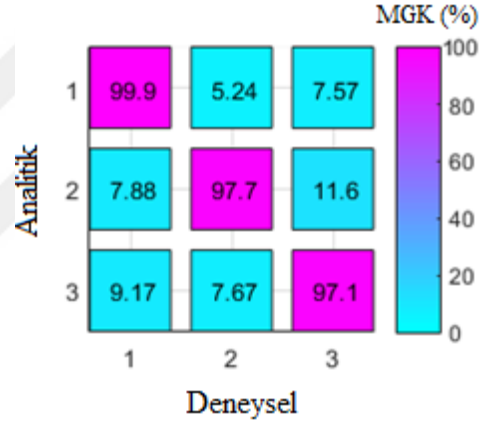
Mod şekilleri arasındaki benzerlik oranının daha net bir şekilde değerlendirilmesi amacıyla, MGK grafikleri elde edilmiş ve karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. İlgili grafikler elde edilirken, sonlu eleman modeli üzerinde ilerleyen hasar durumları için bozulmalar meydana geldiğinden dolayı analitik sonuçlar dikkate alınmıştır. Hasarsız durum için hesaplanan MGK matrisi Şekil 2.24'te altı farklı hasar durumu için elde edilen MGK grafikleri ise Şekil 2.25'te verilmektedir. Şekil 2.24 ve 2.25 detaylı olarak incelendiğinde boru kesitli çelik konsol kiriş modeli için çeşitli hasar durumlarında elde edilen analitik ve deneysel sonuçların birbirleriyle uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Buna karşın, analitik ve deneysel olarak elde edilen doğal frekanslar arasındaki maksimum farkın %6,46 ila %51,58 seviyelerinde çıkması, laboratuvar ortamında inşa edilen modelde özellikle sınır şartlarında istenilen şartların sağlanmadığını ve bu bölgelerdeki sınır şartlarının ankastre mesnet yerine belirli rijitliğe sahip yaylar ile temsil edilmesi gerektiğini göstermektedir.



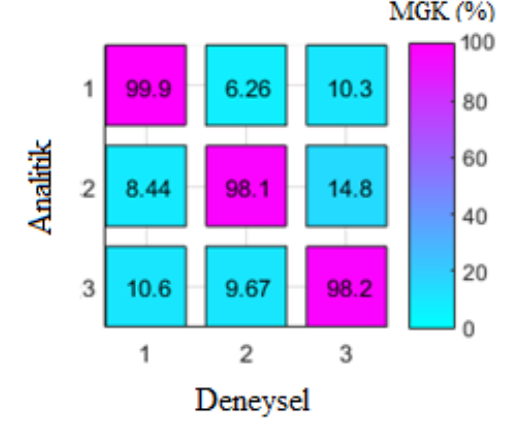
Şekil 2.24. Hasarsız durum için analitik ve deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen MGK grafiği



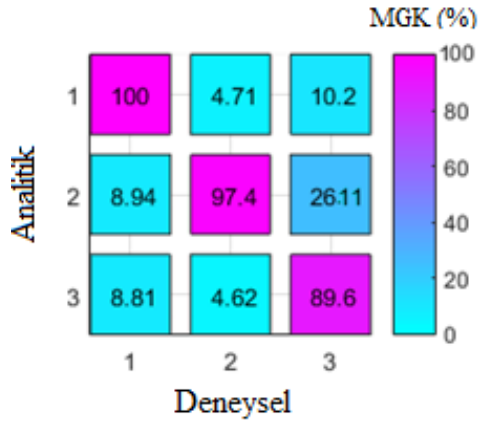
a) Hasar 1



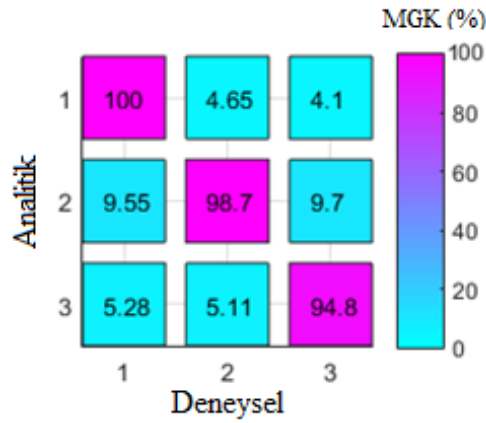
b) Hasar 2



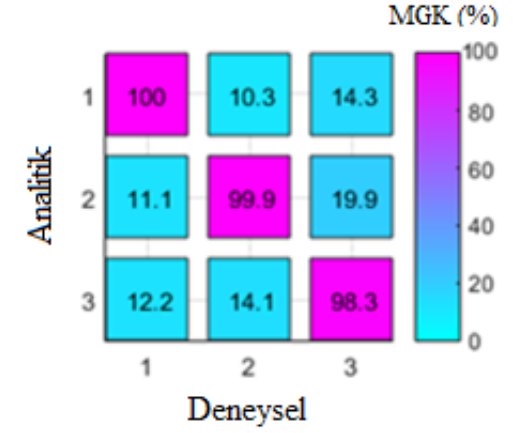
c) Hasar 3



d) Hasar 4



e) Hasar 5



f) Hasar 6

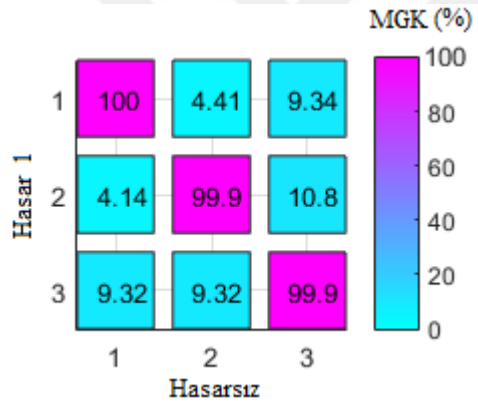
Şekil 2.25. Altı farklı hasar durumu için analitik ve deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen MGK grafikleri

2.2.1.7. Çevresel Titreşimlere Dayalı Hasar Tespit Yöntemlerinin Karşılaştırılması

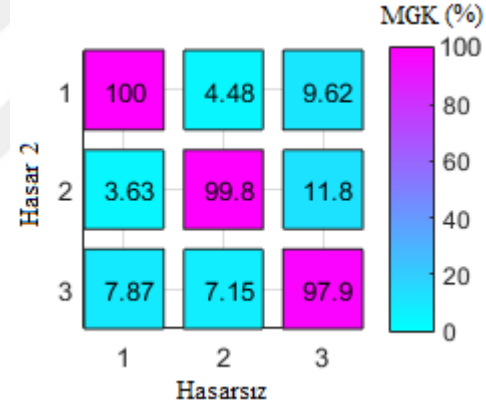
Bu bölümde, boru kesitli konsol kiriş modeline ait analitik, sayısal ve deneysel olarak elde edilen dinamik karakteristikler kullanılarak, Modal Güvence Kriteri (MGK), Koordinat Modal Güvence Kriteri (KMGK), Mod Şekli Eğrilik Yöntemi, Modal Esneklik Yöntemi ve Duyarlılığa Bağlı Model Güncelleme Yöntemleri ile hasar tespiti yapılması ve sonuçların karşılaştırılması amaçlanmıştır.

MGK matrislerine bağlı hasar durumu değerlendirilmesinde hasarın meydana gelmesi ve ileri hasar durumlarının oluşması ile birlikte MGK değerlerinde belirgin bir azalmanın oluşması beklenilmektedir. Hasarsız ve her bir hasar durumu için elde edilen MGK grafikleri incelendiğinde (Şekil 2.26), ilk hasar durumu için ilgili değerlerde belirgin bir azalmanın meydana gelmediği, ancak son üç hasar durumunda ise değerlerde belirgin azalmaların olduğu gözlemlenmiştir. Buna göre MGK ile hasar derinliği arttığında ancak hasarın varlığı ile ilgili bir sonuç çıkarılabilmektedir.

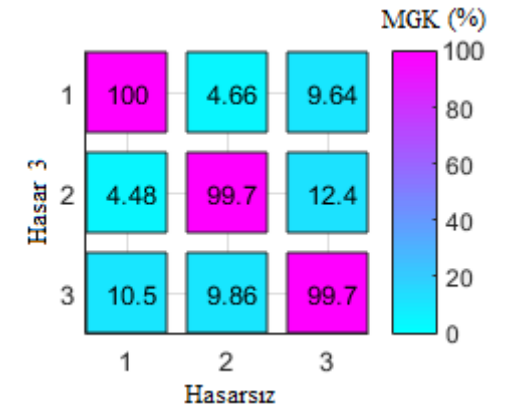
Analitik, sayısal ve deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen KMGK grafiklerinin incelenmesi sonucunda, meydana gelebilecek hasarların yerlerinin belirlenmesi amaçlanmaktadır. KMGK değeri 1'e yakın ise, ilgili düğüm noktasındaki değerlerin birbirleriyle uyumlu olduğu anlaşılmakta, ilerleyen hasar durumlarında ise bu değerlerin azalması beklenmektedir. Fakat azalma oranı bazı durumlarda gözle görülemeyecek kadar küçük olduğundan dolayı, yanlış bir yorumlama yapılmaması ve hasar bölgelerinin net bir şekilde tespit edilmesi için değerlerin hesaplanmasında $(1-KMGK)$ ifadesi kullanılmaktadır (Şekil 2.27). Şekil 2.27 detaylı olarak incelendiğinde, ilk üç hasar durumu için grafikteki değerlerde belirgin bir değişim meydana gelmediği tespit edilmiştir. Fakat son üç hasar durumunda, değerler arasında oluşan farklılıklar gözle görülebilir düzeyde olmuştur. Ayrıca, analitik ve sayısal yöntemler sırasında konsol kirişin mesnet şartı ankastre olarak kabul edildiğinden dolayı bu bölgedeki $(1-KMGK)$ sıfır olarak hesaplanmaktadır. Deneysel ölçümlerde ise, mesnet noktasına ivmeölçer yerleştirilmiş ve bu bölgede hesaplanan değerler sıfır olarak elde edilememiştir. Bu durum, tasarım aşamasında istenilen ankastre mesnet şartının laboratuvar ortamında tam olarak sağlanamadığını tekrar ortaya çıkarmıştır. Bu nedenle konsol kirişe ait sonlu eleman modelinin hasarsız durum dikkate alınarak mesnet şartlarına göre iyileştirilmesi gerektiği ortaya çıkmaktadır.



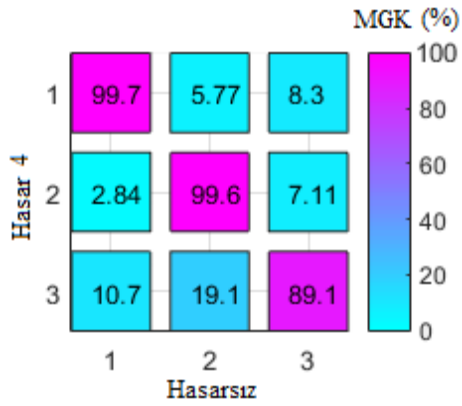
a) Hasar 1



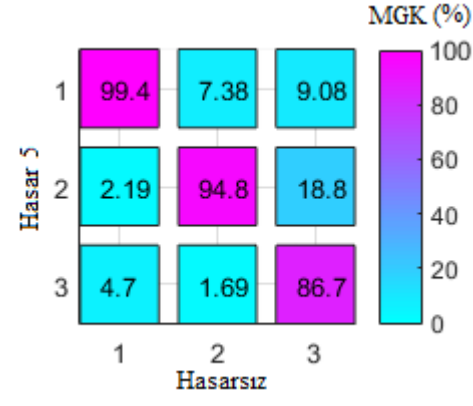
b) Hasar 2



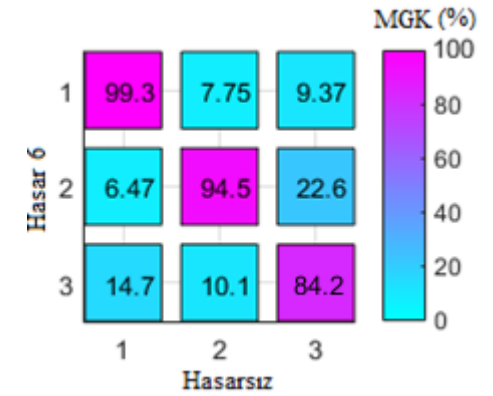
c) Hasar 3



d) Hasar 4

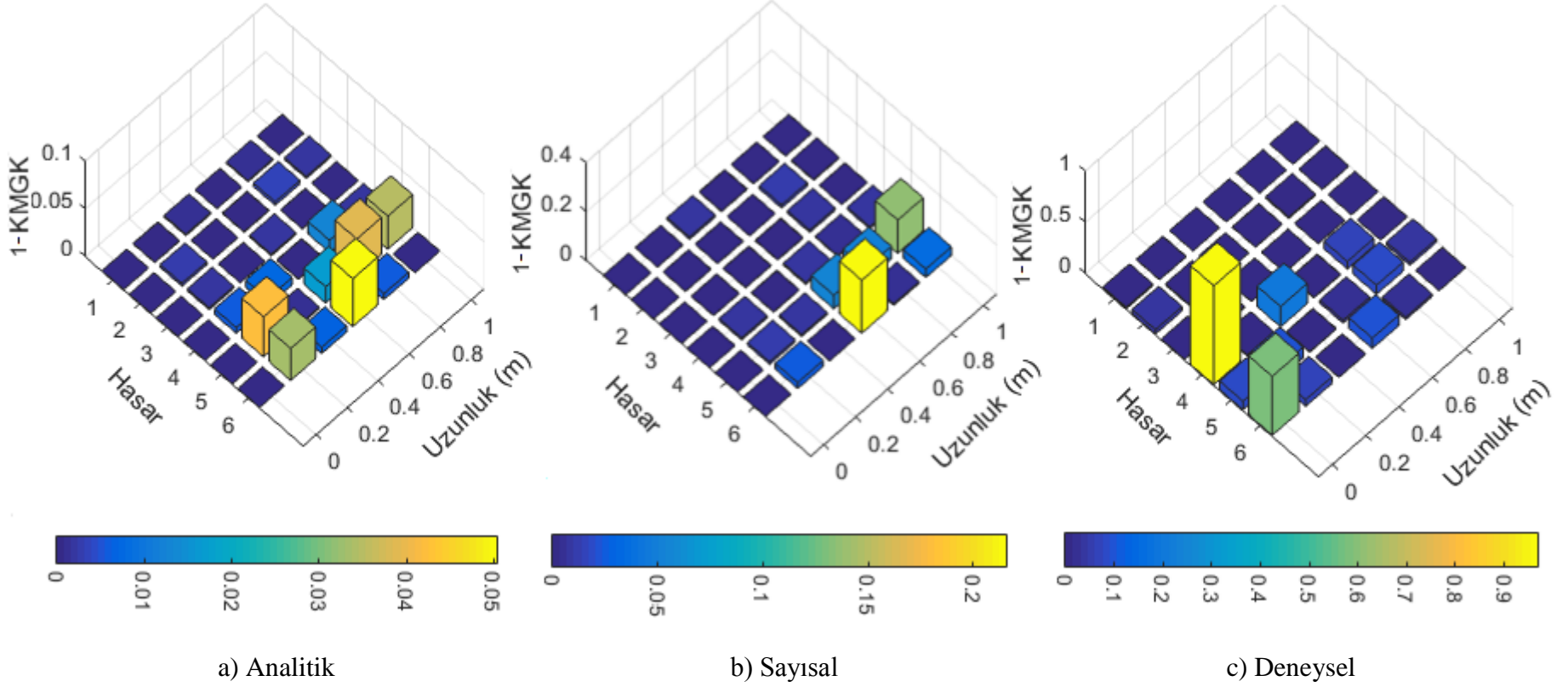


e) Hasar 5



f) Hasar 6

Şekil 2.26. Hasarsız durum ile her bir hasar durumunun karşılaştırılması sonucu elde edilen deneysel MGK değerleri

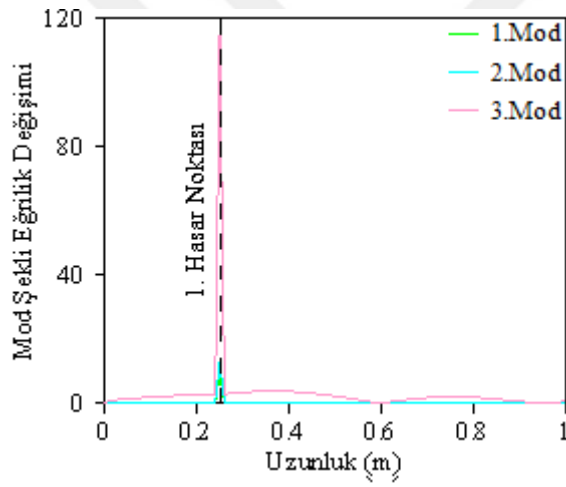


Şekil 2.27. Analitik, sayısal ve deneysel olarak elde edilen (1-KMGK) grafikleri

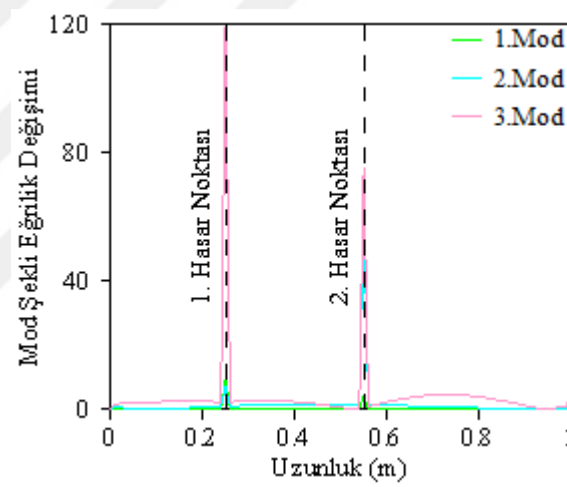
Hasarsız ve farklı hasar durumları arasında Mod Şekli Eğrilik Yöntemi ile birlikte analitik olarak elde edilen hasar tespit grafikleri Şekil 2.28’de gösterilmiştir. Analitik çözümde, 1m uzunluğundaki konsol kirişe ait mod şekli fonksiyonunda 1cm aralıklarla çözüm yapılmış olup, 101 adet düğüm noktası oluşturularak modal yerdeğiştirme değerleri elde edilmiştir. Şekil 2.28’den de görüldüğü gibi, hasarın olduğu yerlerde ani pik değerleri oluşmakta ve hasar şiddetinin artmasıyla mod şekli eğrilik değişim değerlerinde de ani bir artış meydana gelmektedir. Ayrıca, mod şekli eğrilik değişimlerinde 3. Modun daha etkin olduğu bulunmuştur.

Hasarsız ve farklı hasar durumları arasında Mod Şekli Eğrilik Yöntemi ile birlikte deneysel olarak elde edilen hasar tespit grafikleri Şekil 2.29’da gösterilmiştir. Deneysel olarak 6 adet ivmeölçer kullanıldığından dolayı, konsol kirişte de 6 adet düğüm noktası oluşturulmuş ve düğüm noktalarına ait mod şekli eğrilik değişim değerleri hesaplanarak doğrusal olarak birleştirilmiştir. Şekil 2.29 incelendiğinde, hasarın olması durumunda ilgili düğüm noktasındaki eğrilik değişiminin arttığı, ilerleyen hasar durumlarıyla birlikte eğrilik değişiminin daha da arttığı ve frekans değerlerinin yüksek olduğu modlarda mod şekli eğrilik değişim değerlerinin daha da etkin olduğu görülmektedir.

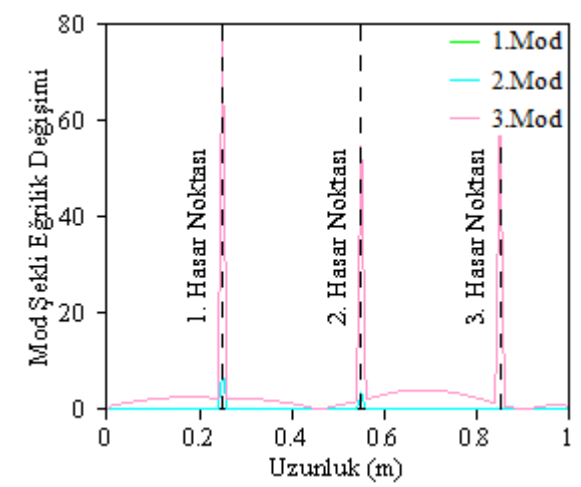
Şekil 2.30’da analitik ve deneysel olarak elde edilen mod şekli eğrilik değişim grafikleri (Şekil 2.28 ve Şekil 2.29) verilmektedir. Deneysel olarak 6 düğüm noktası seçildiği için karşılaştırmanın sağlıklı olması amacıyla analitik olarak da 6 düğüm noktası dikkate alınmıştır. Şekil 2.28-2.29’da belirtilen analitik ve deneysel grafikler değerlendirildiğinde, mod şekli eğrilik değişiminin yüksek olduğu bölgelerde üçüncü titreşim modunun daha etkin olduğu görülmektedir. Bu nedenle, analitik ve deneysel mod şekli eğrilik değişimlerinde üçüncü modlar dikkate alınarak karşılaştırma yapılmıştır. Şekil 2.30 incelendiğinde, Hasar 3, Hasar 4 ve Hasar 5 durumlarında, üçüncü hasar noktasında hasar bölgesi analitik olarak elde edilebilirken, deneysel olarak hesaplanan üçüncü hasar noktasındaki hasarın varlığı ise tam olarak anlaşılamamaktadır. Bu durum, hasarın düşük şiddetli ve mesnetten uzak olması, deneysel ölçümlerden kaynaklanabilecek hatalar, sinyal gürültüleri gibi nedenlerden dolayı ortaya çıkabilmektedir. Genel olarak incelendiğinde ise, analitik ve deneysel grafiklerin bir uyum içinde olduğu görülmektedir. Buradan, boru kesitli çelik konsol kiriş modelinde analitik ve deneysel olarak elde edilen verilerle, Mod Şekli Eğrilik Yöntemi kullanılarak şiddetli hasarlara ait hasar bölgelerinin daha iyi tespit edilebileceği anlaşılmaktadır.



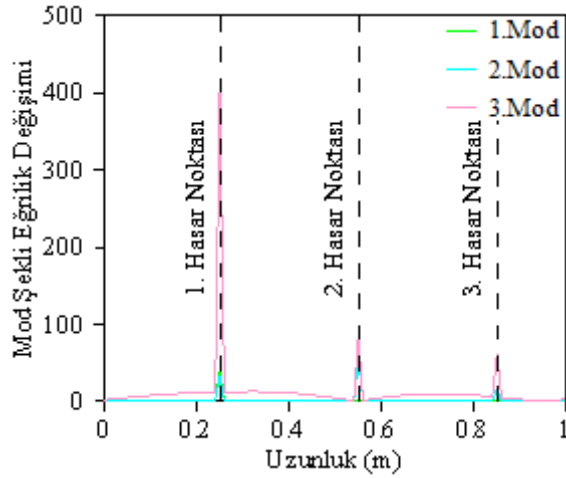
a) Hasar 1



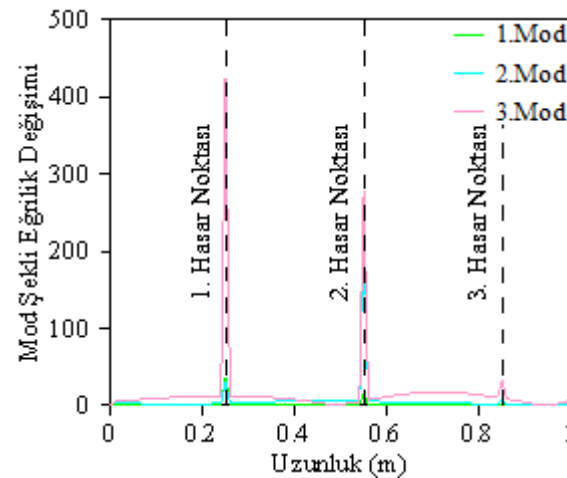
b) Hasar 2



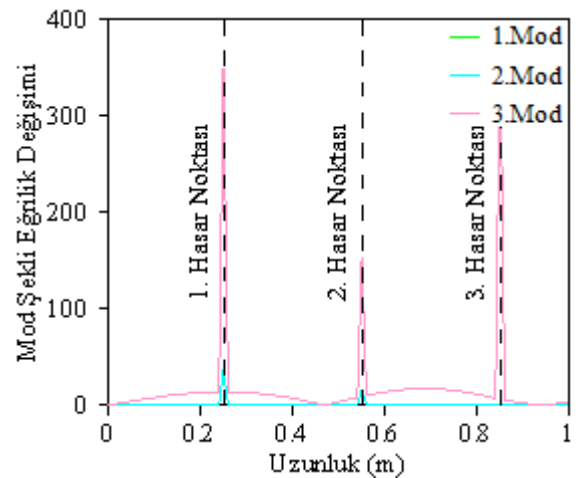
c) Hasar 3



d) Hasar 4

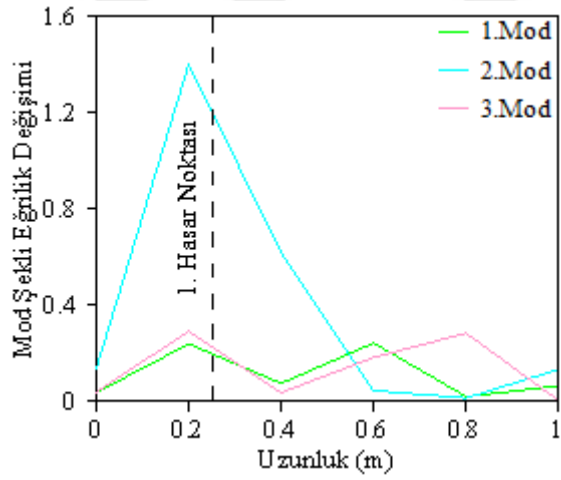


e) Hasar 5

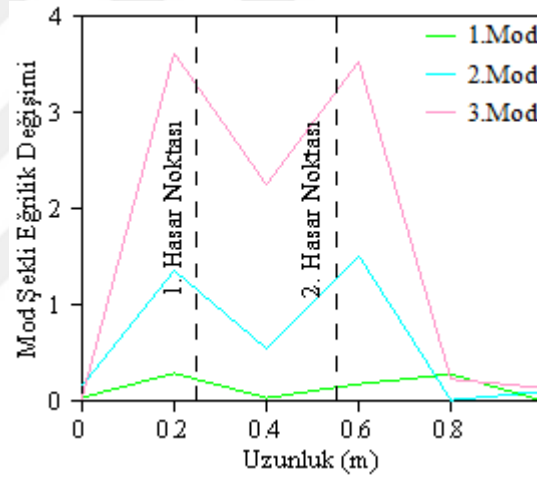


f) Hasar 6

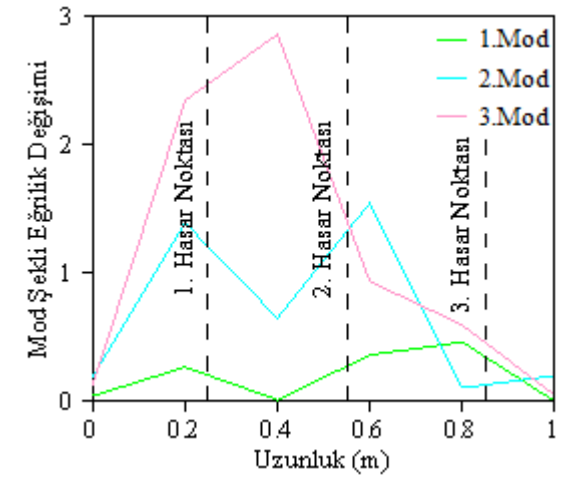
Şekil 2.28. Mod Şekli Eğrilik Yöntemi kullanılarak analitik çözüme dayalı elde edilen hasar tespit grafikleri



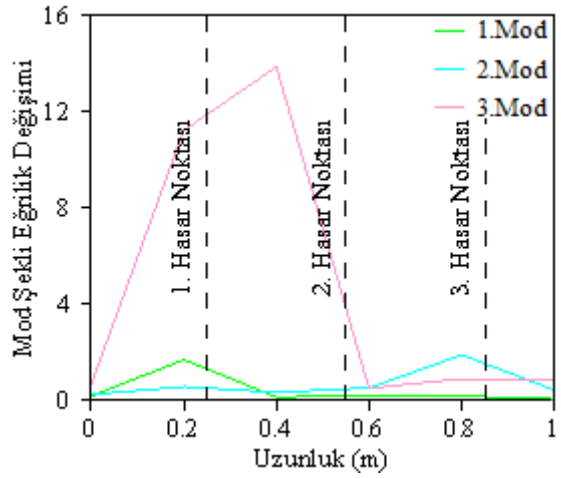
a) Hasar 1



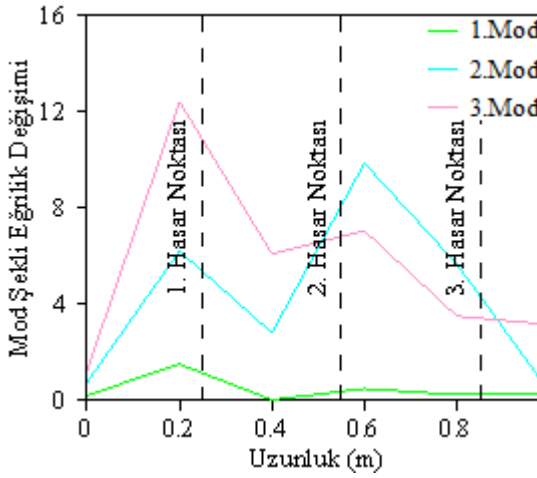
b) Hasar 2



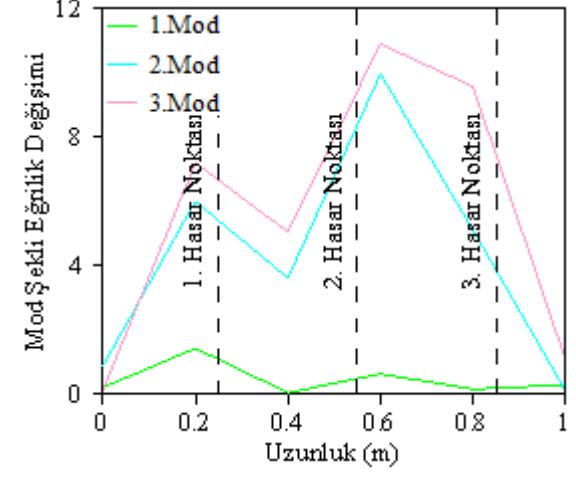
c) Hasar 3



d) Hasar 4

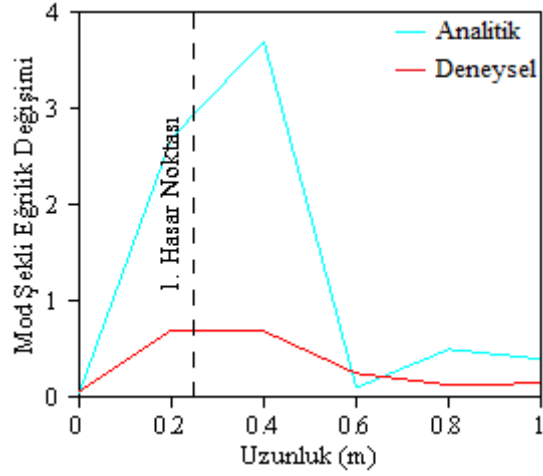


e) Hasar 5

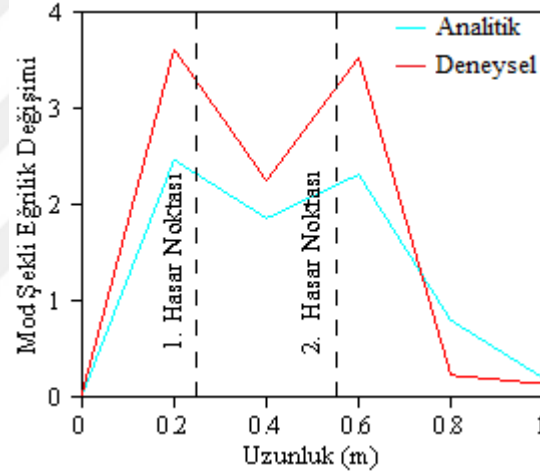


f) Hasar 6

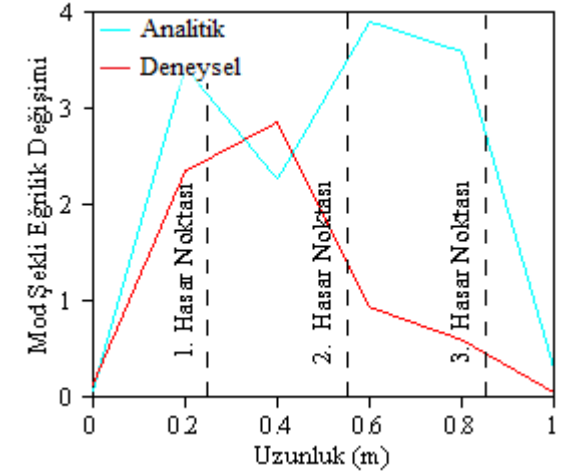
Şekil 2.29. Mod Şekli Eğrilik Yöntemi kullanılarak deneysel çözüme dayalı elde edilen hasar tespit grafikleri



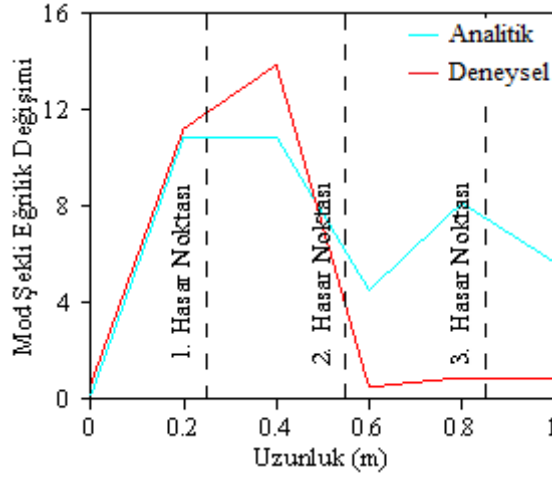
a) Hasar 1



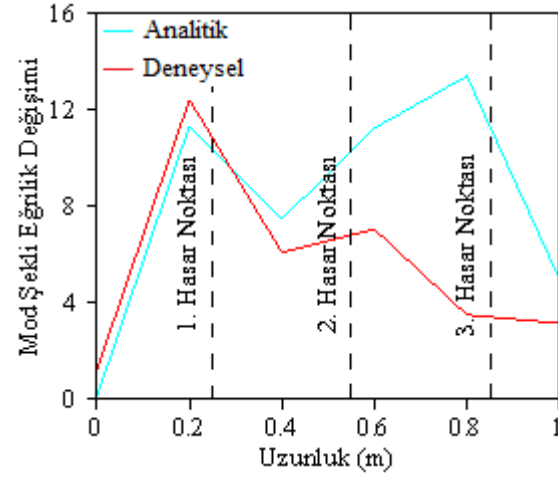
b) Hasar 2



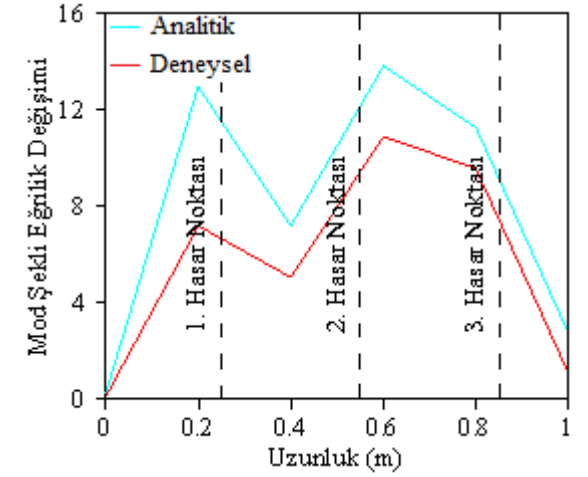
c) Hasar 3



d) Hasar 4



e) Hasar 5



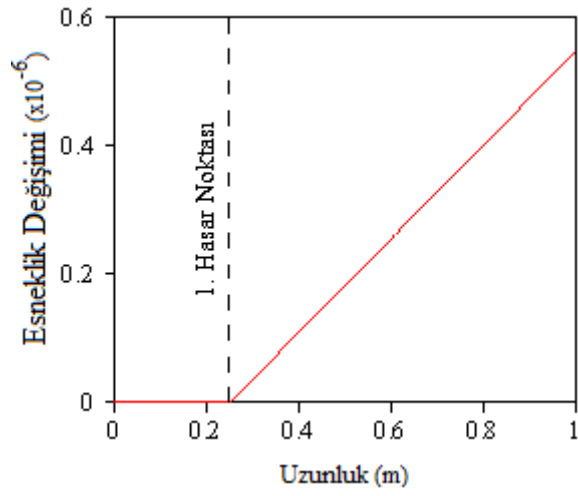
f) Hasar 6

Şekil 2.30. Mod Şekli Eğrilik Yöntemi kullanılarak analitik ve deneysel çözüme dayalı elde edilen hasar tespit grafikleri

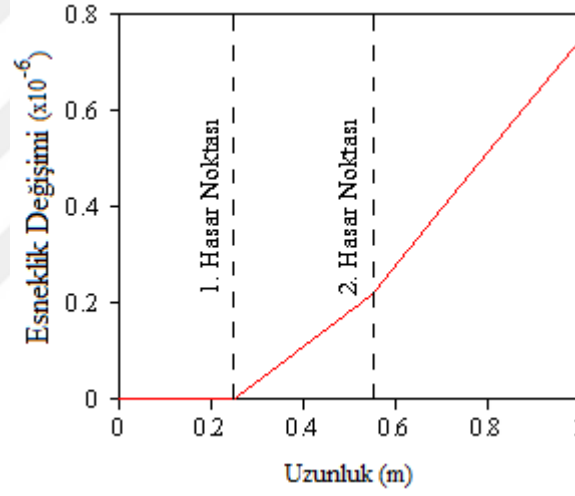
Hasarsız ve farklı hasar durumları arasında Modal Esneklik Yöntemi ile birlikte analitik olarak elde edilen hasar tespit grafikleri Şekil 2.31’de gösterilmiştir. Hasar meydana geldiği zaman rijitliğin azalması ve esneklik değerinin artması beklenmektedir. Analitik çözüm ile elde edilen 101 adet düğüm noktasının modal yerdeğiştirmeleri dikkate alınmıştır. Şekil 2.31’de görüldüğü gibi, hasarın olduğı noktada esneklik grafiğinin eğiminin değıştiğı görülmekte bu ise ilgili düğüm noktasında bir problem olabileceğı anlamına gelmektedir. Ayrıca, hasar şiddeti arttıkça esneklik değışiminin de arttığını görülmektedir. Hasar 3 ve Hasar 6 durumları incelendiğinde, 3. hasar noktasının mesnetten uzak olmasından dolayı eğiminde çok az bir değışme olduğı görülmektedir. Ayrıca, Hasar 4 durumu incelendiğinde, konsol kiriş modelinde hasar şiddeti arttığını zaman küçük hasarların tespit edilmesinin zor olduğunu görülmektedir.

Hasarsız ve farklı hasar durumları arasında Modal Esneklik Yöntemi ile birlikte deneysel olarak elde edilen hasar tespit grafikleri Şekil 2.32’de gösterilmiştir. Farklı hasar durumları ile hasarsız durum arasında deneysel olarak elde edilen esneklik değışimleri hesaplanarak, aralarındaki farkların grafikleri çizdirilmiştir. Şekil 2.32’de görüldüğü gibi, hasarın olduğı bölgede esneklik değışim grafiğinin eğiminin değıştiğı ve bu o bölgede bir hasarın meydana geldiğı ve hasarın şiddeti arttıkça esneklik değışiminin de arttığını görülmektedir.

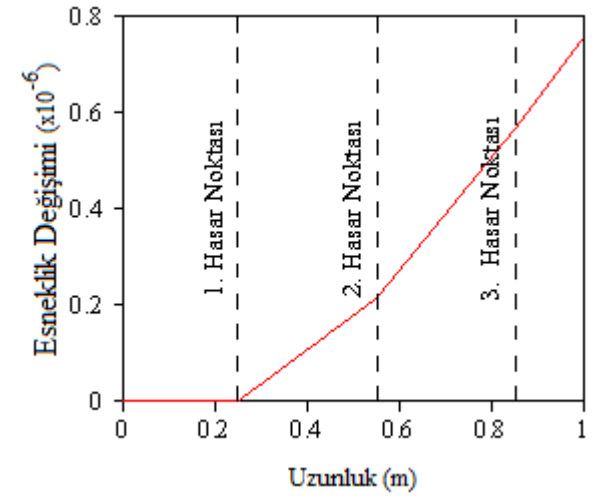
Şekil 2.33 analitik ve deneysel olarak elde edilen esneklik değışim grafiklerini göstermektedir. Deneysel olarak 6 düğüm noktası olduğı seçildiğı için, analitik olarak da 6 düğüm noktası dikkate alınmıştır. Şekil 2.33 incelendiğinde, Hasar 1 durumunda, deneysel olarak elde edilen 2. hasar noktası civarındaki grafiğın eğiminde gürültü sinyalleri, ölçüm hataları gibi nedenlerden dolayı çok az bir sapma meydana geldiğı görülmektedir. Hasar 2 durumunda, her iki yöntemle hasar bölgelerinin tespit edildiğı görülmektedir. Hasar 3 durumunda, analitik ve deneysel olarak 3. hasar noktasının yerinin tam olarak tespit edilemediğı görülmektedir. Hasar 4 durumunda, hasar şiddeti arttığını zaman analitik olarak küçük hasarın tespit edilemediğı fakat deneysel olarak tespit edildiğı görülmektedir. Hasar 5 durumunda, analitik ve deneysel olarak ağır hasarların tespit edildiğı fakat küçük hasarların tespit edilemediğı görülmektedir. Hasar 6 durumunda ise, mesnetten 85cm uzaklıkta ağır hasar verilmesine rağmen analitik ve deneysel olarak hasarın yerinin belirlenemediğı görülmektedir. Buradan, boru kesitli konsol kiriş modelinde Modal Esneklik Yöntemi kullanılarak mesnetten uzaktaki hasarların yerinin tespit edilmesinin zor olduğı anlaşılmaktadır.



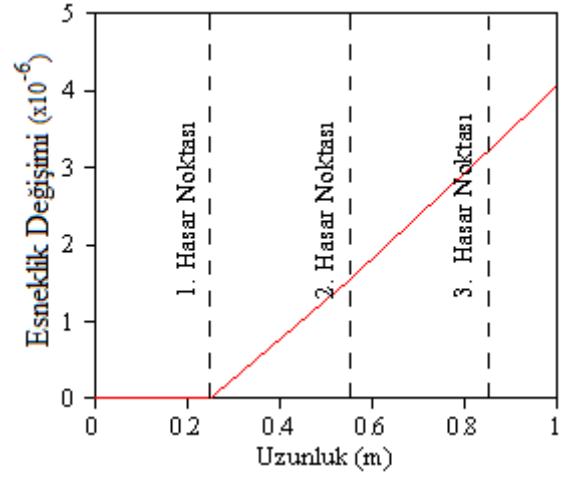
a) Hasar 1



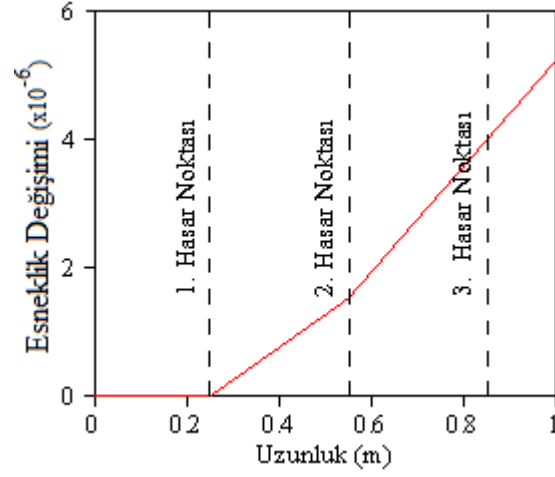
b) Hasar 2



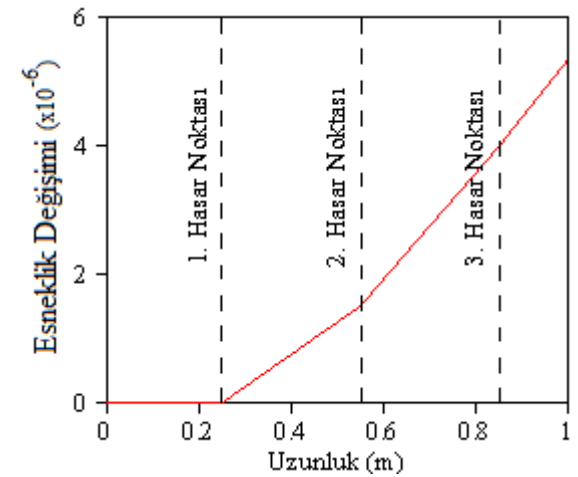
c) Hasar 3



d) Hasar 4

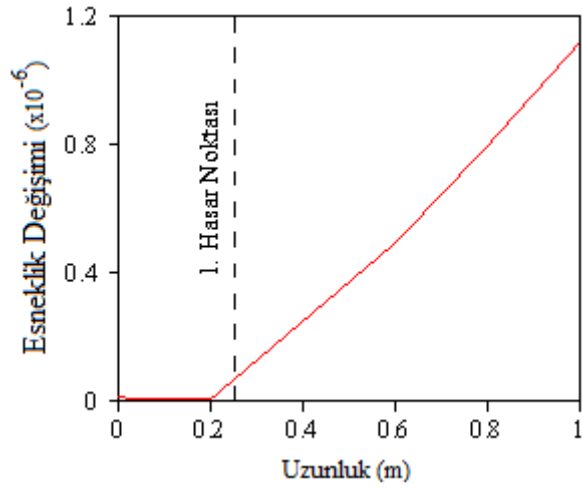


e) Hasar 5

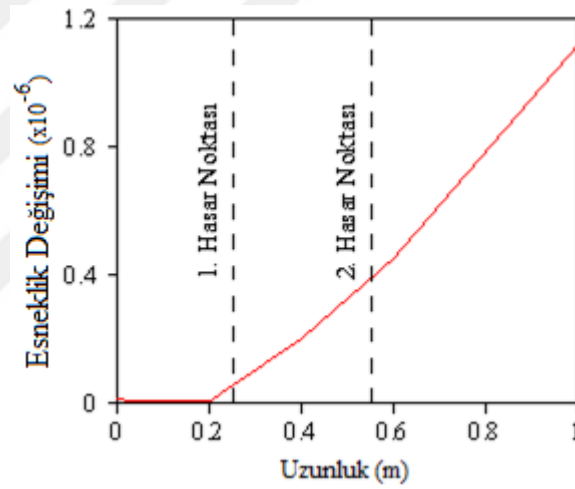


f) Hasar 6

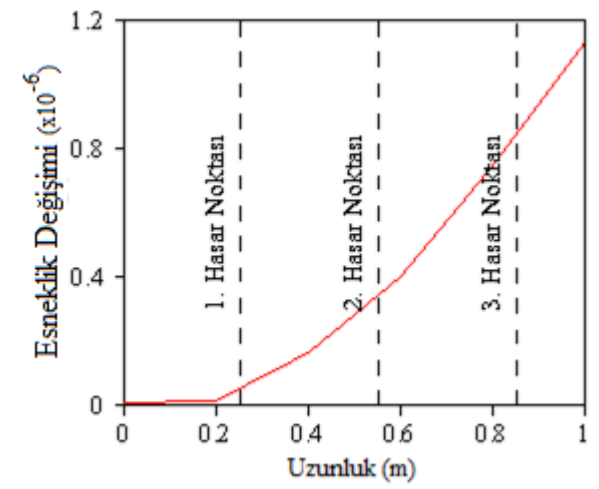
Şekil 2.31. Modal Esneklik Yöntemi kullanılarak analitik çözüme dayalı elde edilen hasar tespit grafikleri



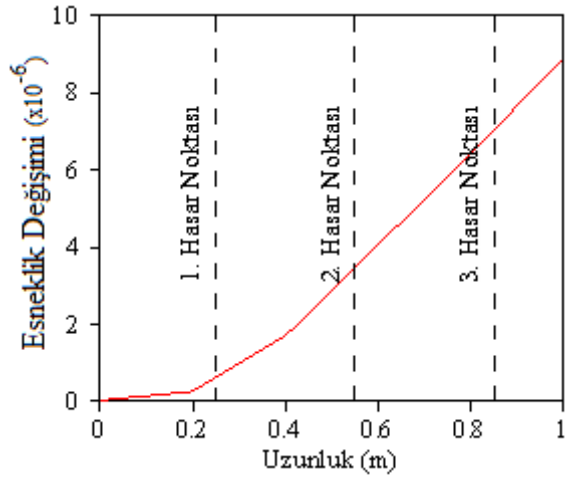
a) Hasar 1



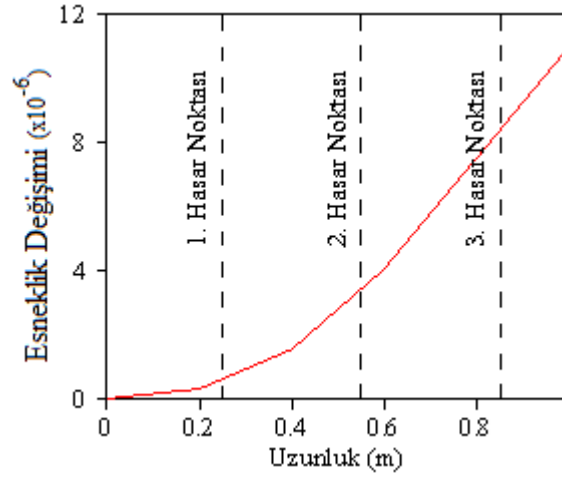
b) Hasar 2



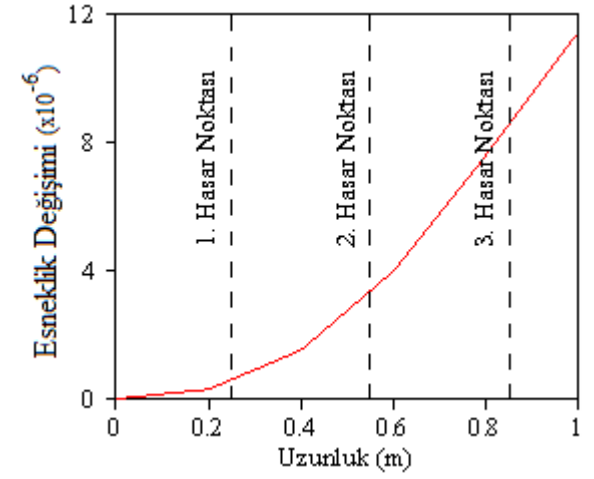
c) Hasar 3



d) Hasar 4

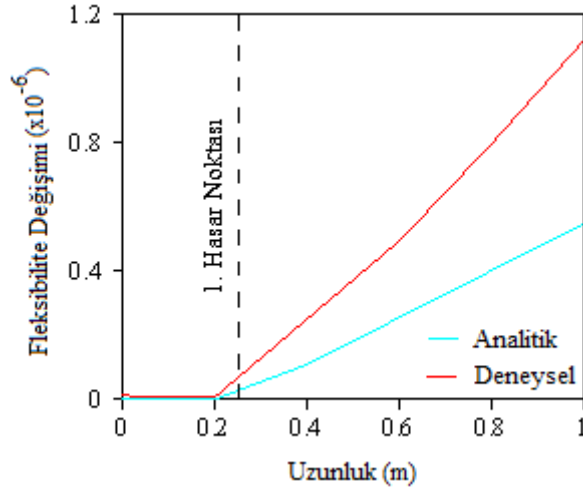


e) Hasar 5

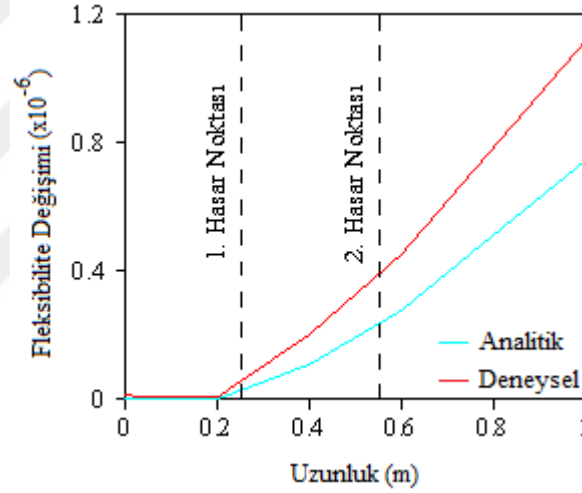


f) Hasar 6

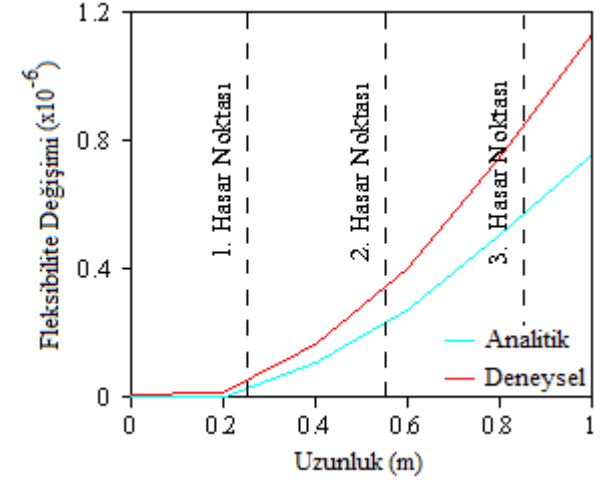
Şekil 2.32. Modal Esneklik Yöntemi kullanılarak deneysel çözüme dayalı elde edilen hasar tespit grafikleri



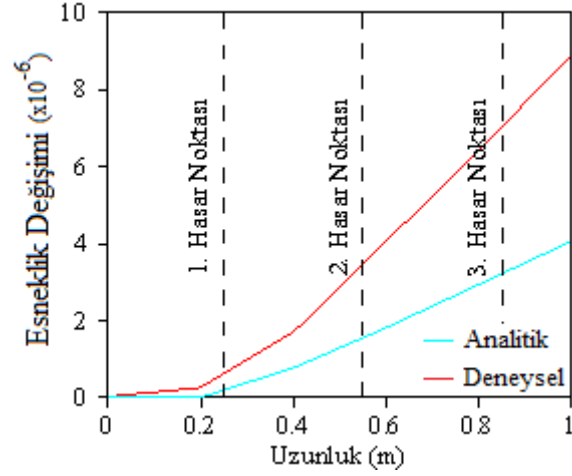
a) Hasar 1



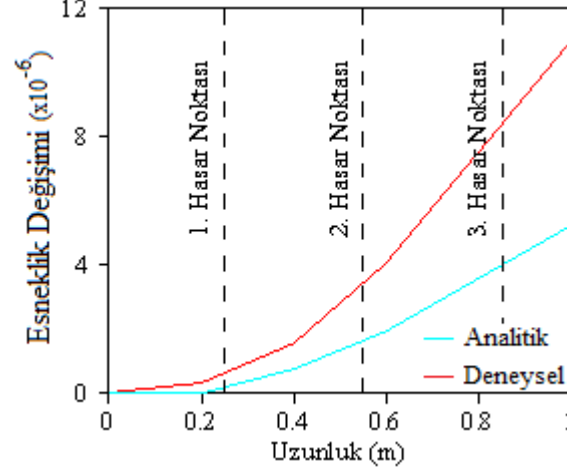
b) Hasar 2



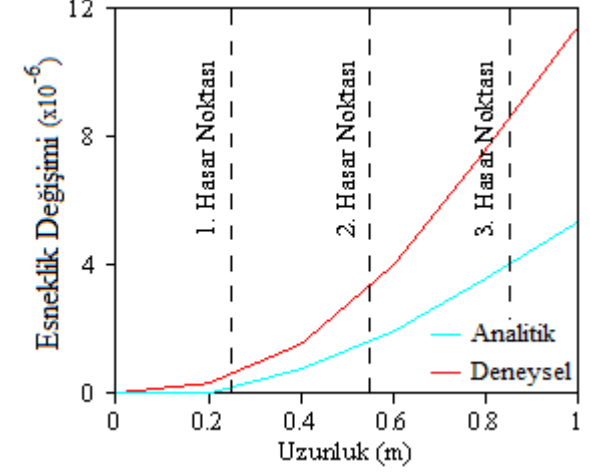
c) Hasar 3



d) Hasar 4



e) Hasar 5

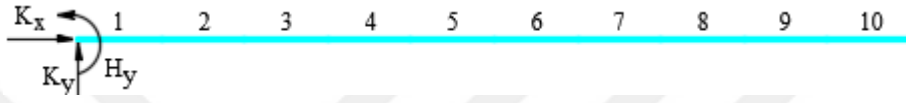


f) Hasar 6

Şekil 2.33. Modal Esneklik Yöntemi kullanılarak analitik ve deneysel çözüme dayalı elde edilen hasar tespit grafikleri

Son olarak, Duyarlılığa Bağlı Model Güncelleme yöntemiyle hasar tespiti yapılması amaçlanmıştır. Bu yöntemde, sonlu eleman modeline ait malzeme özellikleri, sınır şartları gibi parametrelerin değiştirilmesiyle deneysel olarak ölçülen dinamik davranışın elde edilmesi amaçlanmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında, Duyarlılığa Bağlı Model Güncelleme Yöntemi'nin uygulanmasında FEMtools (2003) programı kullanılmıştır.

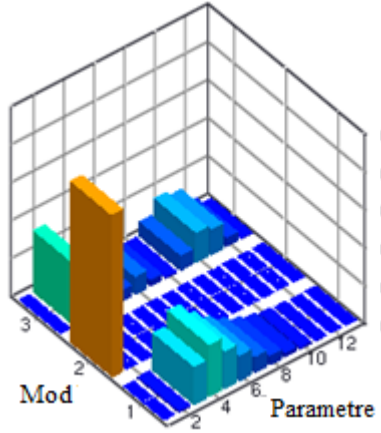
FEMtools programı yardımıyla 1m uzunluğundaki çubuk 10 parçaya bölünmüştür. Ankastre şartını sağlamak amacıyla mesnet noktasında yay elemanlar tanımlanmıştır. Boru kesitli çelik konsol kiriş modeline ait eleman isimleri Şekil 2.34'te gösterilmiştir.



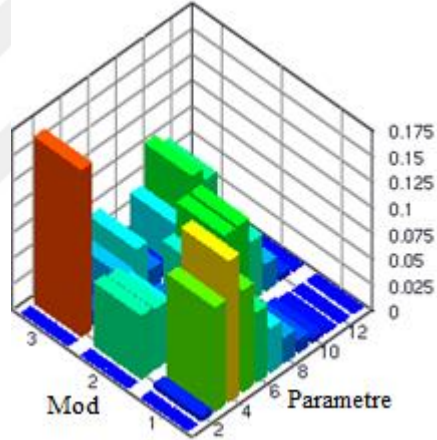
Şekil 2.34. Boru kesitli çelik konsol kiriş modeline ait eleman isimleri

Modele ait başlangıç malzeme özellikleri için Tablo 2.1'de belirtilen parametreler kullanılmış olup, hasarsız duruma ait yay sabitleri deneysel ölçüm verilerine göre güncellenmiştir. Model güncellemesi için seçilen belirsiz parametreler, her bir elemanın atalet momenti değerleri ile ankastre mesnet noktasında tanımlanan yay sabitleri olmak üzere toplam 13 tanedir. Farklı hasar durumları için bu parametreler üzerinden parametrelerin etkinliğini göstermek amacıyla Duyarlılık Analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.35'te konsol kiriş modeline ait Duyarlılık Analizi sonuçları gösterilmektedir. İlk üç parametre K_x, K_y, H_y yay sabitlerinin, geri kalan numaralar ise her elemanın atalet momentinin model davranışı üzerindeki etkisini göstermektedir.

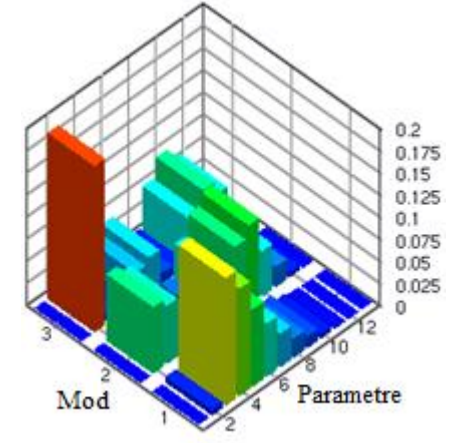
Duyarlılık Analizi sonuçları kullanılarak Parametrik Tahmin Yöntemi'yle birlikte model güncelleme yapılmıştır. Tablo 2.6'da hasarlı ve hasarsız durumlar için Duyarlılığa Bağlı Model Güncelleme Yöntemi ile elde edilen sonuçlar özetlenmektedir. Tablo 2.6 incelendiğinde, Model Güncelleme Yöntemi ile frekanslar arasındaki farkın %0.00-1.41 seviyelerinde olduğu görülmektedir. Ayrıca analitik mod şekli ile deneysel mod şekilleri eşleştirilmiş olup, MGK değerleri karşılaştırılmıştır. MGK değerleri incelendiğinde, güncellenen sonlu eleman modeli kullanılarak elde edilen mod şekillerinin, deneysel mod şekilleriyle uyum içerisinde olduğu tespit edilmiştir.



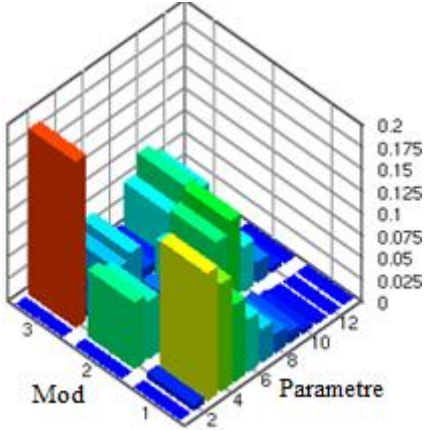
a) Hasar 1



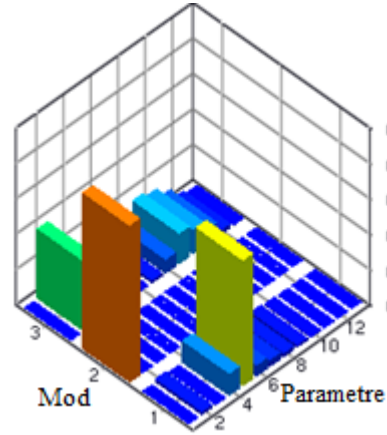
b) Hasar 2



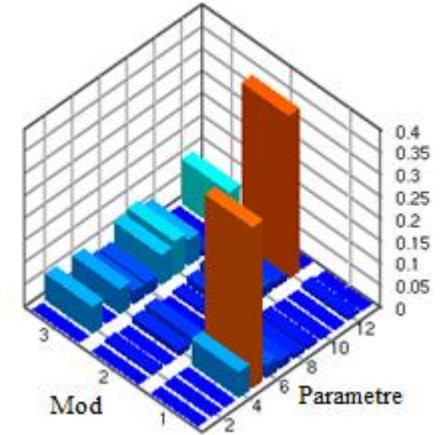
c) Hasar 3



d) Hasar 4



e) Hasar 5

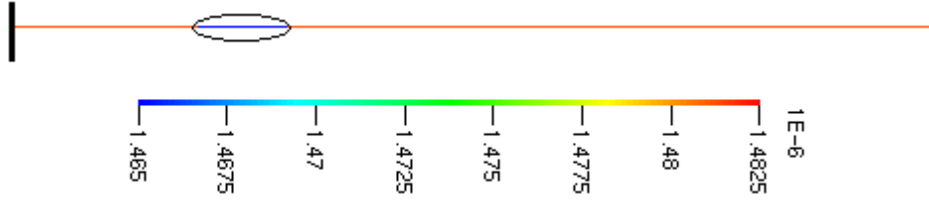


f) Hasar 6

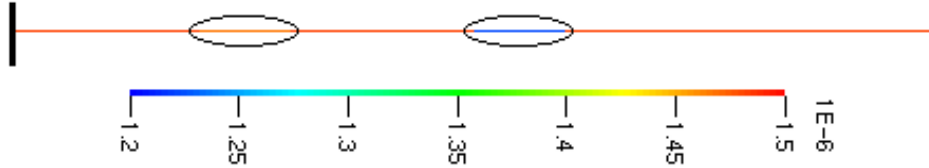
Şekil 2.35. Boru kesitli çelik konsol modeline ait farklı hasar durumlarındaki Duyarlılık Analizi sonuçları

Tablo 2.6. Hasarsız ve farklı hasar durumları için Model Güncelleme ile elde edilen frekans değerleri

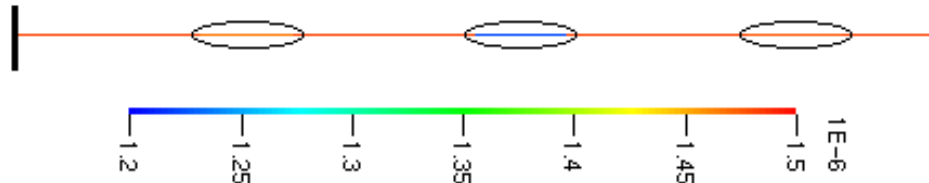
Mod Numarası	SEM	Fark. (%)	Deneysel		Fark (%)	Güncel SEM	MGK
			GFTAA	SAB			
Hasarsız							
1	102,40	15,00	89,04	88,94	-0,89	88,25	0,98
2	583,21	11,77	521,8	521,5	0,33	523,52	0,99
3	1451,70	7,53	1350	1350	-1,41	1331,01	0,99
Hasar 1							
1	88,25	0,27	88,05	86,02	0,00	88,05	0,99
2	523,52	0,72	519,80	525	0,01	519,82	0,95
3	1331,01	0,12	1329	1326	0,00	1329	0,98
Hasar 2							
1	88,05	6,38	82,80	82,85	-0,04	82,77	0,99
2	519,82	5,74	491,60	492,90	0,00	491,59	0,98
3	1329	7,48	1237	1235	0,00	1236,92	0,99
Hasar 3							
1	82,77	-0,21	82,95	81,87	-0,02	82,9	0,96
2	491,59	0,14	490,90	491,60	-0,06	490,58	0,97
3	1236,92	0,81	1227	1226	0,07	1227,83	0,97
Hasar 4							
1	82,9	39,53	59,42	60,09	-0,02	59,41	0,97
2	490,58	5,96	463	466,40	0,00	463	0,95
3	1227,83	36,68	898,30	898,20	0,82	905,68	0,92
Hasar 5							
1	59,41	3,82	57,22	65,43	-0,05	57,21	0,95
2	463	34,8	343,50	343,20	0,00	343,49	0,93
3	905,68	8,42	835,30	829,50	0,37	835,33	0,94
Hasar 6							
1	57,21	0,17	57,10	64,12	0,00	57,09	0,95
2	343,49	3,05	333,30	333,40	0,09	333,60	0,94
3	835,33	6,14	787	786,90	0,56	782,63	0,90



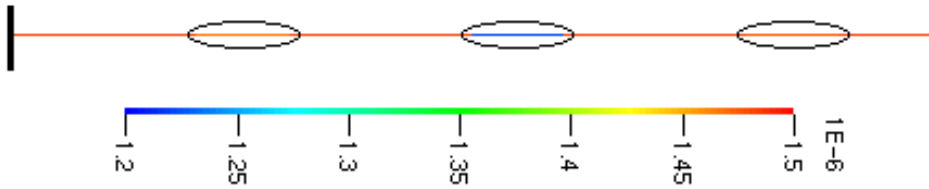
a) Hasar 1



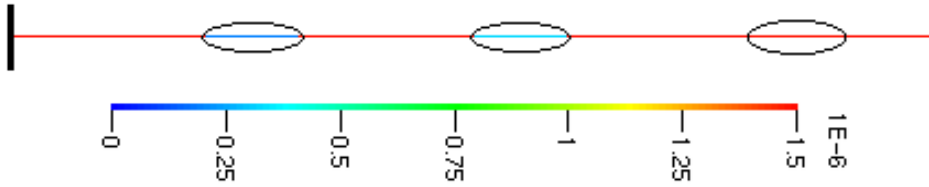
b) Hasar 2



c) Hasar 3



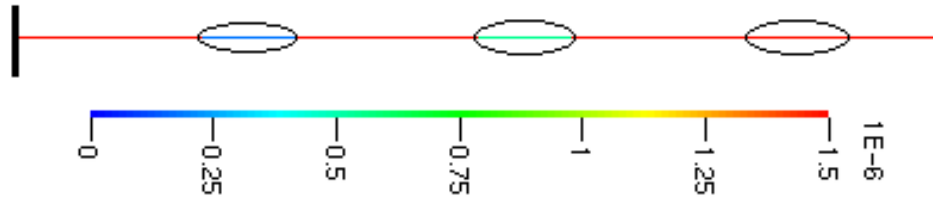
d) Hasar 4



e) Hasar 5

Şekil 2.36. Farklı hasar durumları için, konsol kiriş modeline ait atalet momenti değişimleri

Şekil 2.36'nın devamı



f) Hasar 6

Tablo 2.7. Sonlu eleman model güncellemesine ait parametre değişimleri

Parametre Numarası	Eleman	Başlangıç	Hasar Durumları					
			1	2	3	4	5	6
Sınır Koşulları ($\times 10^8$ N/m)								
1	Kx	1000	1,188	1,188	1,188	0,912	0,475	0,466
2	Kz	1000	1,902	1,369	1,317	0,407	0,295	0,295
3	Ry	1000	0,047	0,035	0,030	0,030	0,026	0,023
Atalet Momenti ($\times 10^{-6}$ m ⁴)								
4	1	1,481	1,481	1,481	1,481	1,481	1,481	1,481
5	2	1,481	1,481	1,481	1,481	1,481	1,481	1,481
6	3	1,481	1,465	1,465	1,465	0,189	0,184	0,184
7	4	1,481	1,481	1,481	1,481	1,481	1,481	1,481
8	5	1,481	1,481	1,481	1,481	1,481	1,481	1,481
9	6	1,481	1,481	1,221	1,221	1,221	0,315	0,315
10	7	1,481	1,481	1,481	1,481	1,481	1,481	1,481
11	8	1,481	1,481	1,481	1,481	1,481	1,481	1,481
12	9	1,481	1,481	1,481	1,474	1,474	1,474	0,232
13	10	1,481	1,481	1,481	1,481	1,481	1,481	1,481

Şekil 2.36, farklı hasar durumlarındaki konsol kiriş modeline ait sonlu eleman model güncelleme işleminin sonucunda elde edilen hasarın yerini ve atalet momentindeki değişimleri göstermektedir. Konsol kiriş modelinde, hasarlı durum için gerçekleştirilen değerlendirmeler sonucunda kesit atalet momentindeki değişimlerin en fazla olduğu elemanlar belirlenmiştir. Bu durum gerçek hasar durumuyla karşılaştırıldığında, kullanılan yöntem ile konsol kiriş modelde hasar yerinin gerçekçi bir şekilde belirlenebildiği görülmektedir.

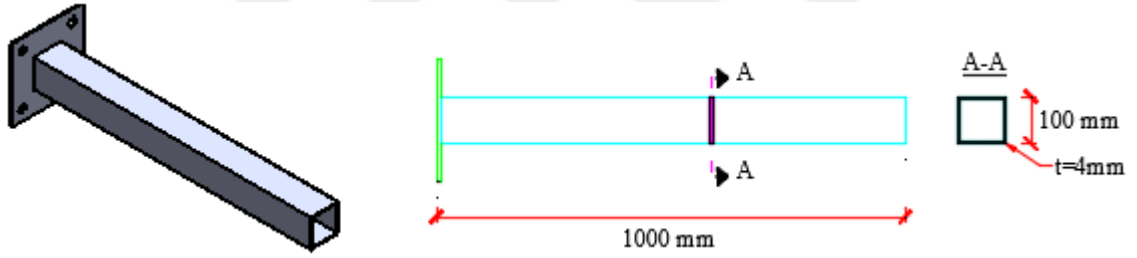
Tablo 2.7, hasarsız ve farklı hasar durumlarındaki konsol kiriş modeline ait parametre değişim değerlerini göstermektedir. Tablo 2.7 incelendiğinde, mesnet şartlarının hasar durumlarıyla birlikte değiştiği görülmektedir. Bu durum laboratuvar ortamında

konsol modeline hasar verilirken mesnet bölgesi de etkilendiğinden meydana gelmiş olabilir. Ayrıca, her bir elemanda hasar bölgesindeki atalet momenti değişimleri incelendiğinde, hasarın olduğu noktadaki elemanda atalet momentindeki değerlerin azaldığı görülmektedir. Bu şekilde, Duyarlılığa bağlı Model Güncelleme Yöntemi'yle birlikte hasar bölgesinin ve şiddetinin elde edilebileceği gösterilmiştir.

2.2.2. Kutu Kesitli Konsol Kiriş Modeli

2.2.2.1. Modelin Özellikleri

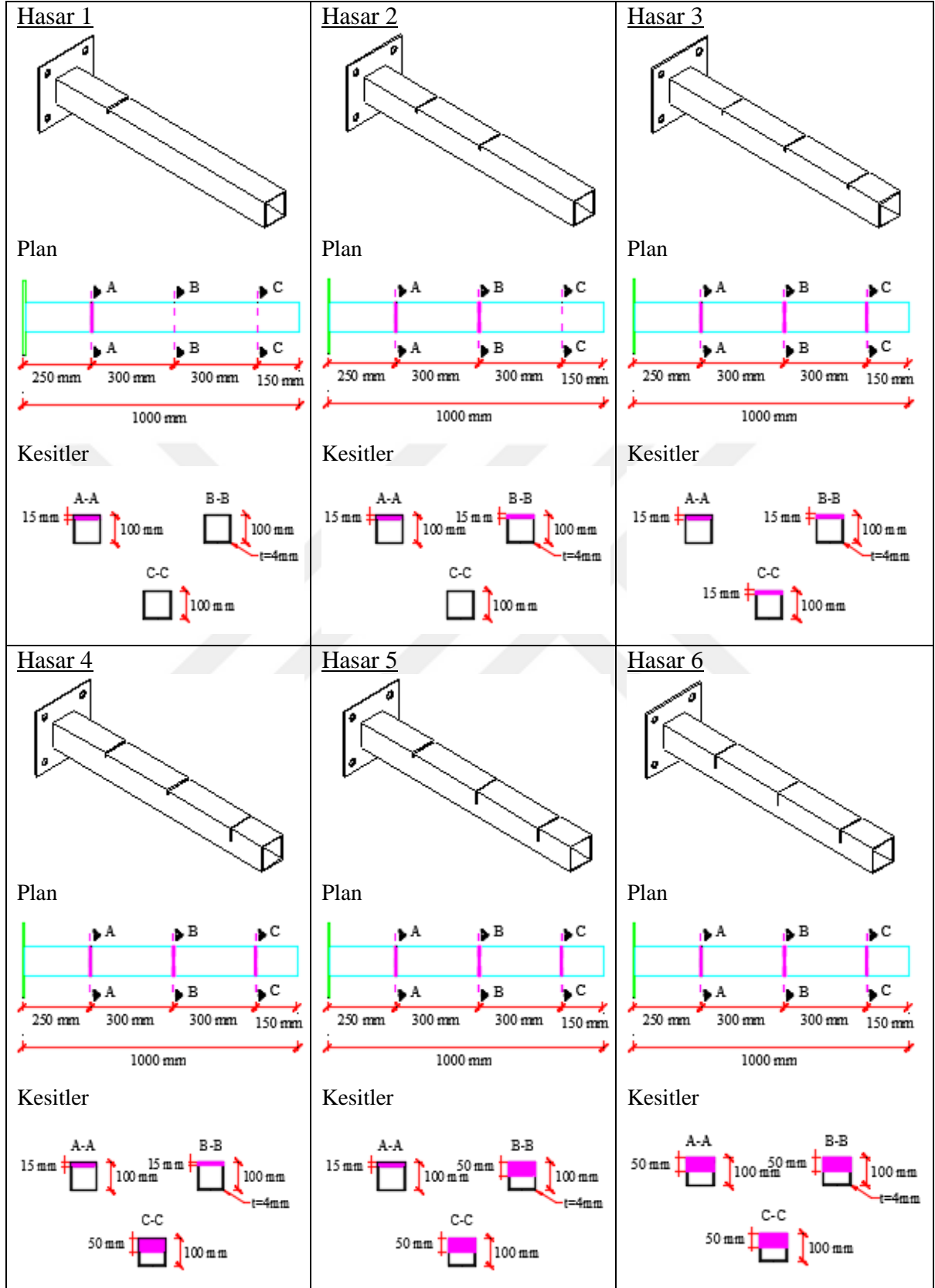
Kutu kesitli çelik taşıyıcı sisteme sahip konsol kiriş, 100mm çapında, 4mm et kalınlığında ve 1m uzunluğundadır. Konsol kirişe ait iki ve üç boyutlu görünüşler Şekil 2.37'de verilmektedir.



Şekil 2.37. Boru kesitli çelik konsol kiriş modeline ait görünüşler

2.2.1.2. Hasar Yerlerin Belirlenmesi

Kutu kesite sahip çelik konsol kiriş modelinde, farklı üç noktada altı farklı hasar durumu ve seviyesi dikkate alınmıştır. Hasar yerleri ve büyüklüklerine ait detaylı görünüşler Şekil 2.38'de verilmektedir. İlgili şekilden de görüldüğü üzere, ilk üç hasar durumu ankastre mesnetten sırasıyla 25cm, 55cm ve 85cm uzaklıkta oluşturulmuştur. Bu hasar durumlarında çatlak genişliği 5mm, çatlak yüksekliği ise 15mm olarak dikkate alınmıştır. Diğer üç hasar durumu için de yine aynı noktalarda (ankastre mesnetten sırasıyla 85cm, 55cm ve 25cm uzaklıkta) çatlak genişliği 5mm çatlak yüksekliği ise 50mm olarak dikkate alınmıştır.



Şekil 2.38. Farklı hasar durumları için hasar yerleri ve büyüklüklerine ait şematik görünümler

2.2.2.3. Analitik Yöntemlerle Dinamik Karakteristiklerin Elde Edilmesi

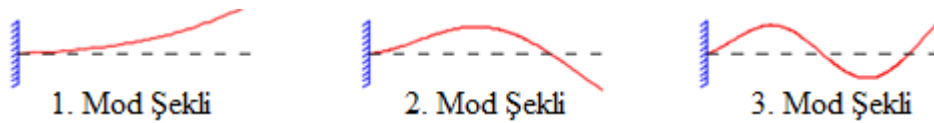
Hasarlı ve hasarsız durumlar için konsol kiriş modelinin dinamik karakteristikleri MATLAB ara yüzünde yazılan bir programla elde edilmiştir. Hesaplamalar sırasında dikkate alınan malzeme özellikleri Tablo 2.8’de gösterilmektedir. Hasarsız ve altı farklı hasar durumu için analitik çözümlerle elde edilen, frekans değerleri ile bunlar arasındaki maksimum farklar Tablo 2.9’da verilmektedir. Tablo 2.9’da görüldüğü gibi, hasarsız durum için konsol kirişin frekans değerleri 110,94-1483,5Hz arasında bulunmaktadır. Hasar arttıkça, frekans değerlerin azaldığı görülmektedir. Frekanslar arasındaki maksimum fark, 6. Hasar durumunda %26,02 olarak elde edilmiştir. Şekil 2.39’da ise analitik çözümler sonucunda elde edilen mod şekilleri gösterilmektedir.

Tablo 2.8. Kutu kesitli çelik konsol kirişin malzeme özellikleri

Malzeme Özellikleri	Değerler
Elastisite Modülü (N / m ²)	2,06×10 ¹¹
Birim Kütle (kg / m ³)	7850
Poisson Oranı (-)	0,3

Tablo 2.9. Analitik olarak elde edilen doğal frekansların karşılaştırılması

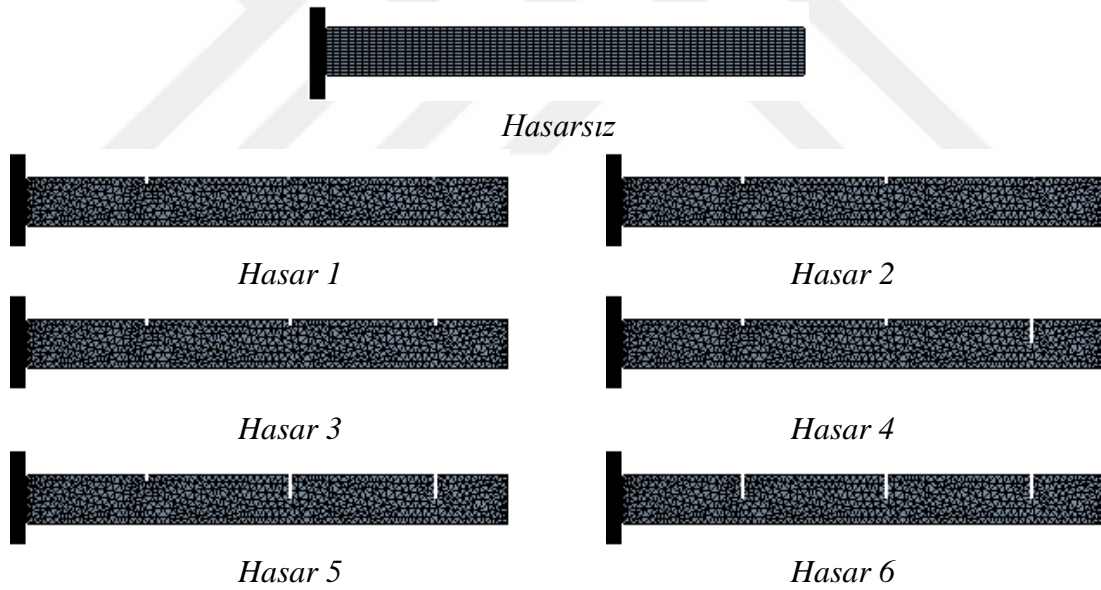
Mod Numarası	Hasarsız (Hz)	Hasar Durumları (Hz)					
		1	2	3	4	5	6
1	110,94	104,84	103,79	103,88	103,67	95,03	70,31
2	612,79	610,63	578,58	576,4	554,88	420,88	416,72
3	1483,5	1442,7	1417,1	1397,3	1182,7	1181,2	1067,90
Maksimum Farklar (%)							
1	-5,49	-1,00	+0,09	-0,20	-8,33	-26,02	
2	-0,35	-5,25	-0,38	-3,73	-24,15	-0,99	
3	-2,75	-1,77	-1,40	-15,36	-0,13	-9,59	



Şekil 2.39. Hasarlı ve hasarsız durumlar için elde edilen ilk üç mod şekli

2.2.2.4. Sonlu Eleman Yöntemiyle Dinamik Karakteristiklerin Elde Edilmesi

Hasarsız ve hasarlı durumlar için kutu kesitli çelik konsol kirişin dinamik karakteristiklerini sayısal olarak belirlemek için, Sonlu Eleman Yöntemi (SEY) kullanılmıştır. Dinamik karakteristikler ANSYS programı ile elde edilmiştir. Kirişin sonlu eleman modeli için üç boyutlu elemanlar kullanılmıştır. Konsol kirişin hasarsız ve farklı hasar durumları dikkate alınarak oluşturulan sonlu eleman modelleri Şekil 2.40'da, analizler sonucunda elde edilen ilk üç mod şekli Şekil 2.41'de gösterilmiş olup, doğal frekans değerleri ile frekanslar arasında elde edilen maksimum farklar Tablo 2.10'da özetlenmiştir. Tablo 2.10'da görüldüğü gibi, hasarsız durumda elde edilen frekans değerleri 114,88-1523Hz arasında değişmekte olup, hasar şiddeti arttıkça frekans değerlerinin azaldığı görülmektedir. Frekanslar arasındaki maksimum fark 6. Hasar durumunda %24,08 olarak elde edilmiştir.



Şekil 2.40. Kutu kesitli konsol kirişin hasarsız ve hasarlı durumları için oluşturulan sonlu eleman modelleri



Şekil 2.41. Kutu kesitli konsol kirişin Hasar 6 durumu için sonlu eleman analizleri sonucunda elde edilen ilk üç mod şekli

Tablo 2.10. Sayısal olarak elde edilen frekansların karşılaştırılması

Mod Numarası	Hasarsız (Hz)	Hasar Durumları (Hz)					
		1	2	3	4	5	6
1	114,88	103,27	101,47	101,65	101,61	94,02	71,38
2	629,37	627,66	569,37	565,65	544,24	418,69	414,49
3	1523	1486,8	1413,2	1375,3	1247,5	1226,9	1106,8
Maksimum Farklar (%)							
1	-10,11	-1,74	+0,18	-0,04	-7,47	-24,08	
2	-0,27	-9,29	-0,65	-3,79	-23,07	-1,00	
3	-2,38	-4,95	-2,68	-9,30	-1,65	-9,79	

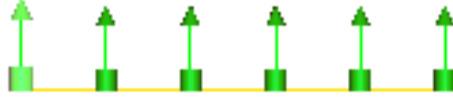
2.2.2.5. Deneysel Modal Analiz Yöntemiyle Dinamik Karakteristiklerin Elde Edilmesi

Çelik taşıyıcı sisteme sahip kutu kesitli konsol kirişin frekans, mod şekli ve sönüm oranı gibi dinamik karakteristiklerini deneysel olarak elde etmek için, kiriş modeli laboratuvar ortamında oluşturulmuş ve çevresel titreşim testleri uygulanmıştır. Deneysel ölçümler sırasında, B&K 4507 tipi tek eksenli ivmeölçerler kullanılmıştır. 10 dakika boyunca devam eden ölçümler boyunca elde edilen titreşim verileri, B&K 3560 tipi 17 kanallı veri toplama ünitesinde toplanmış ve PULSE yazılımına aktarılarak işlenmiştir. İşlenen sinyaller OMA yazılımına aktarılarak dinamik karakteristikler elde edilmiştir.

Deneysel ölçümler sonucunda mod şekillerinin doğru olarak belirlenmesi amacıyla, analitik ve sayısal olarak belirlenen mod şekilleri ve modal hareket noktaları incelenmiş ve ivmeölçerler düşey yönde yerleştirilmiştir. İvmeölçerlerin yerleşimine ait görünüş Şekil 2.42’de verilmektedir. Laboratuvar modeli ve farklı hasar durumlarına ait bazı görünüşler ise Şekil 2.43’de gösterilmektedir.

Hasarsız ve altı farklı hasar durumu için çevresel titreşim testleri sonucunda toplanan sinyallerin GFTAA yöntemine göre ayrıştırılması sonucu elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri ve bu matrislerin ortalamaları ile SAB yöntemine göre ayrıştırılması sonucu elde edilen kararlılık diyagramları Şekil 2.44-2.50’de detaylı olarak verilmektedir. İlgili şekiller incelendiğinde her bir çevresel titreşim testinden elde edilen spektral yoğunluk matrisleri ile kararlılık diyagramlarının birbirleriyle uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Hasarsız ve hasarlı durumlar için elde edilen mod şekillerinin karşılaştırılması amacıyla hasarsız durum ile 6. Hasar durumu için elde edilen ilk üç mod şekli Şekil 2.51’de gösterilmektedir. Ayrıca, her bir durum için belirlenen frekans değerleri

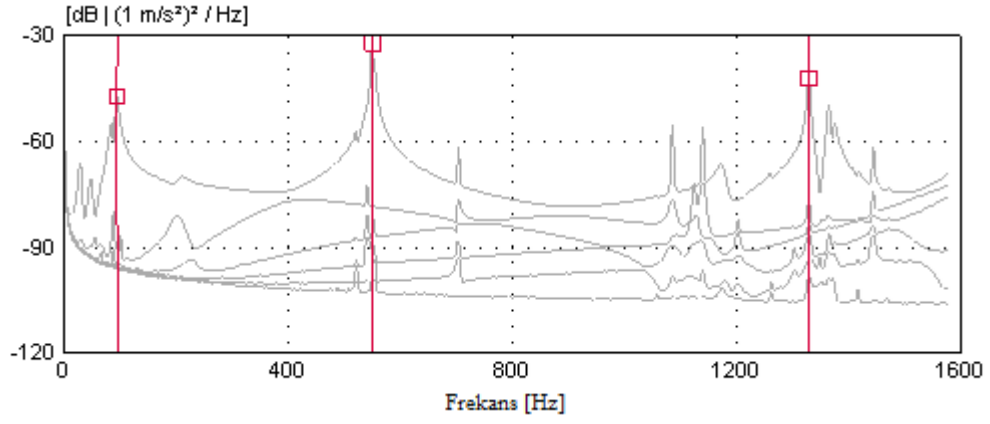
ile elde edilen maksimum farklar Tablo 2.11’de özetlenmektedir. Tablo 2.11 detaylı olarak incelendiğinde, hasarsız durum için elde edilen frekans değerlerinin 96,69-1330Hz arasında olduğu, ileri hasar durumlarında frekans değerlerinin düştüğü görülmektedir. Maksimum farklılık 5. Hasar durumu için %25,02 olarak elde edilmiştir.



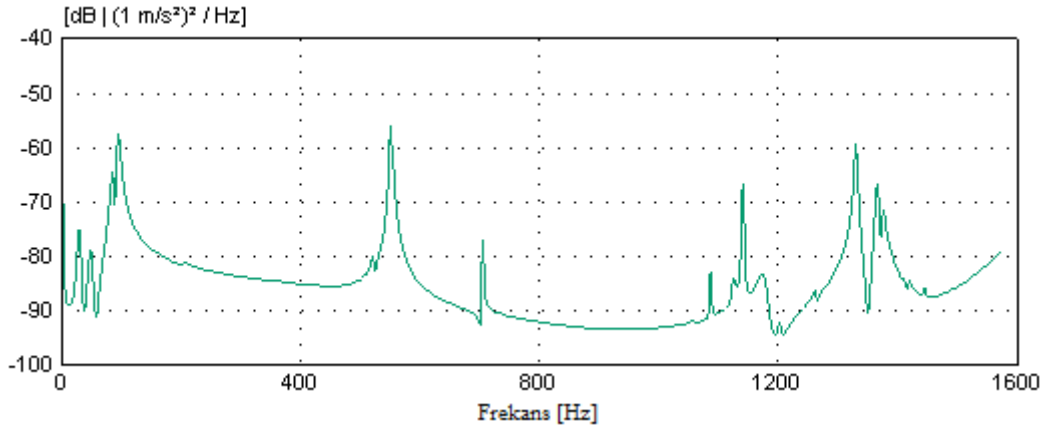
Şekil 2.42. İvmeölçerlerin yerleşim yerleri



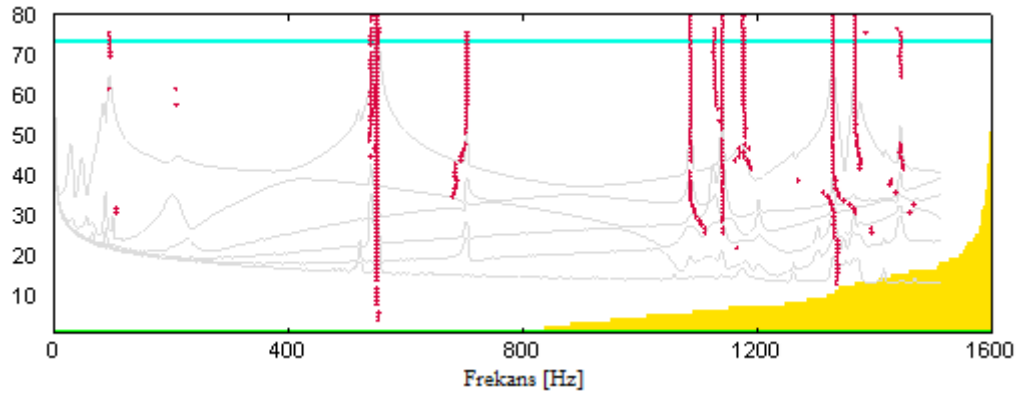
Şekil 2.43. Laboratuvar ortamında hazırlanan kutu kesitli çelik konsol kiriş modeli



a) Spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri

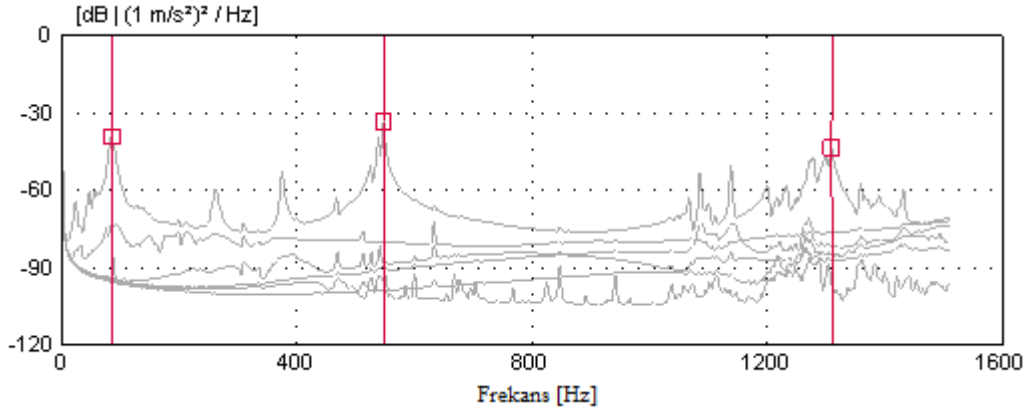


b) Spektral yoğunluk matrislerinin ortalaması

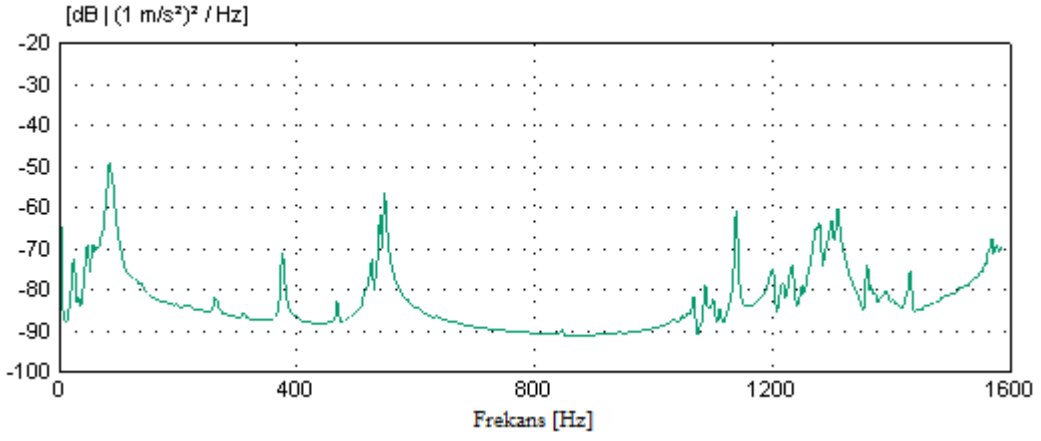


c) Kararlılık diyagramı

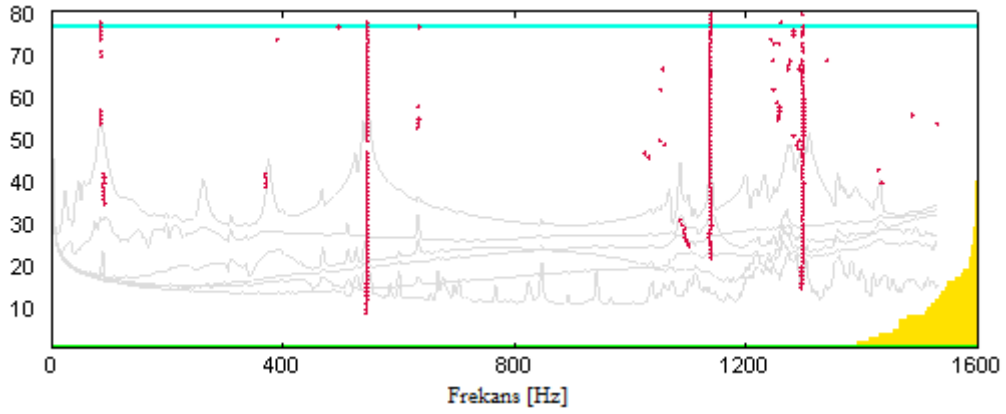
Şekil 2.44. Hasarsız durum için elde edilen spektral yoğunluk matrisleri ve kararlılık diyagramı



a) Spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri

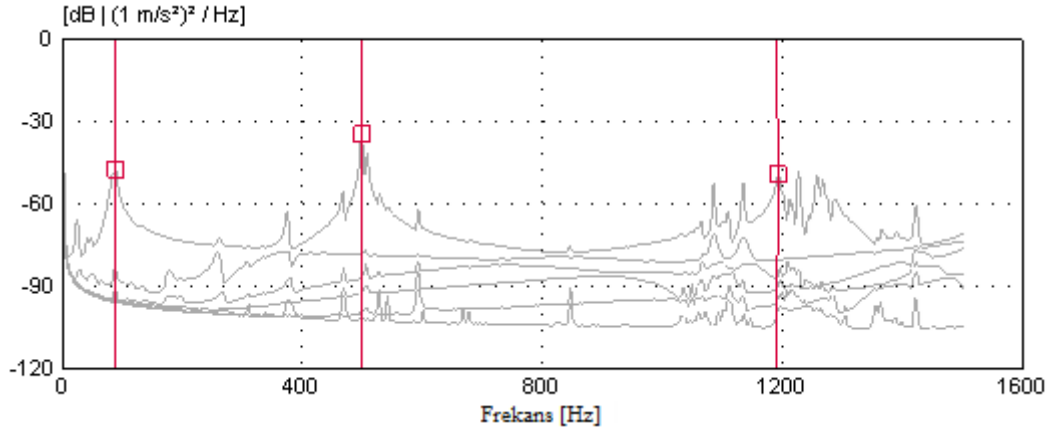


b) Spektral yoğunluk matrislerinin ortalaması

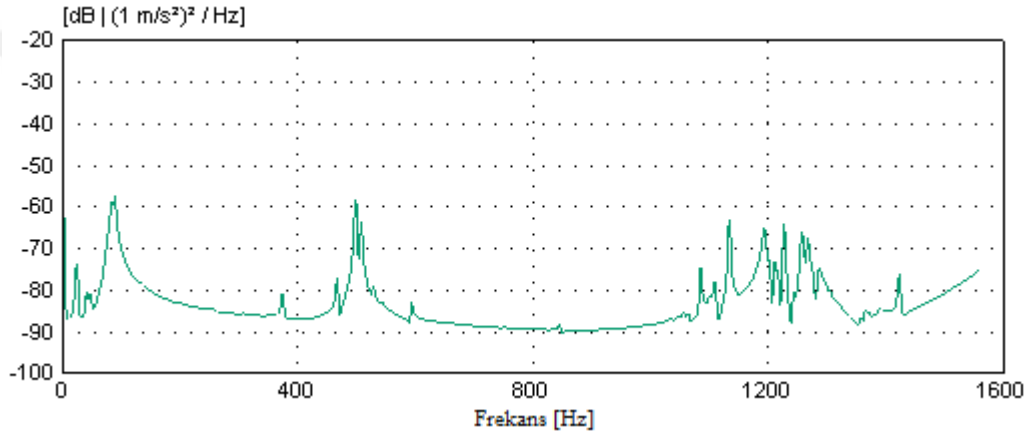


c) Kararlılık diyagramı

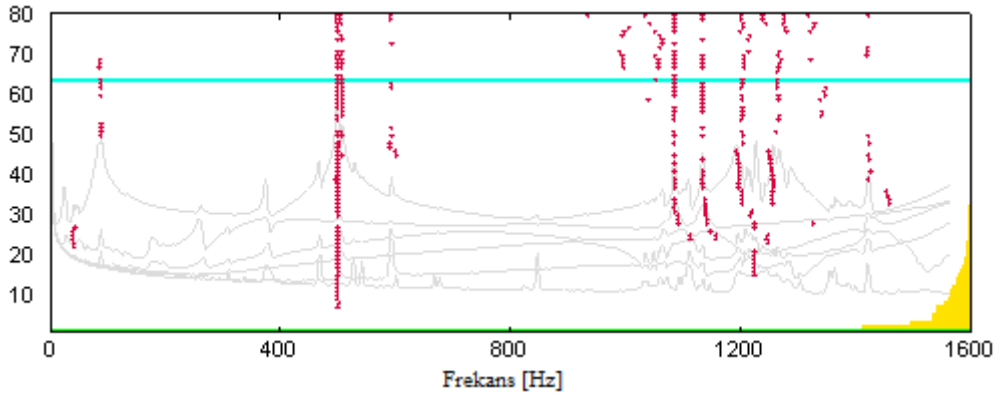
Şekil 2.45. Hasar 1 durumu için elde edilen spektral yoğunluk matrisleri ve kararlılık diyagramı



a) Spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri

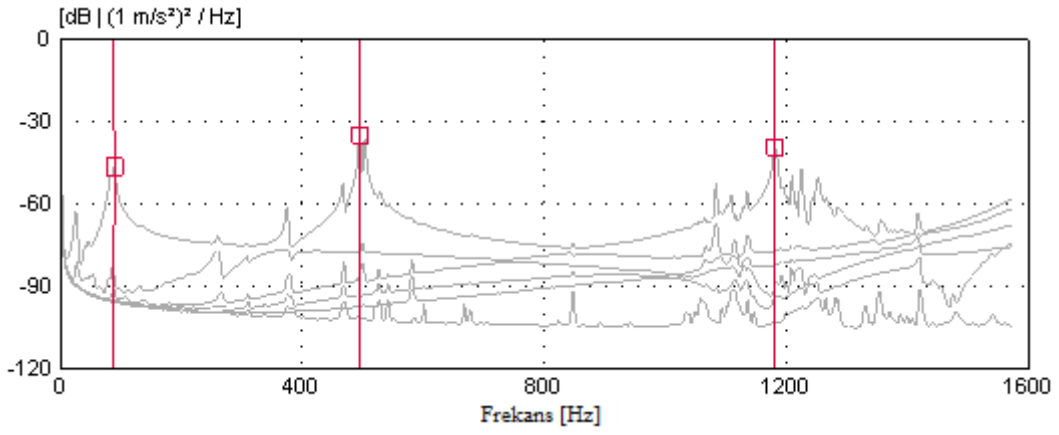


b) Spektral yoğunluk matrislerinin ortalaması

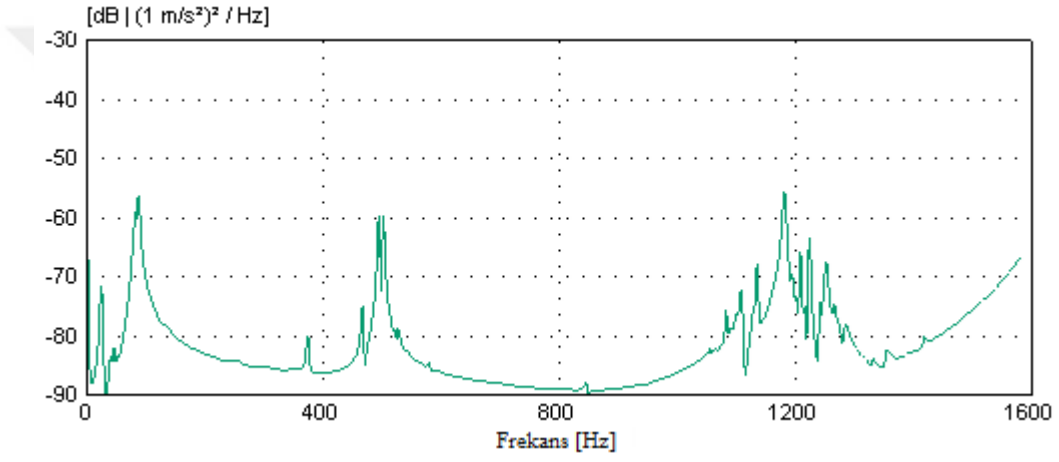


c) Kararlılık diyagramı

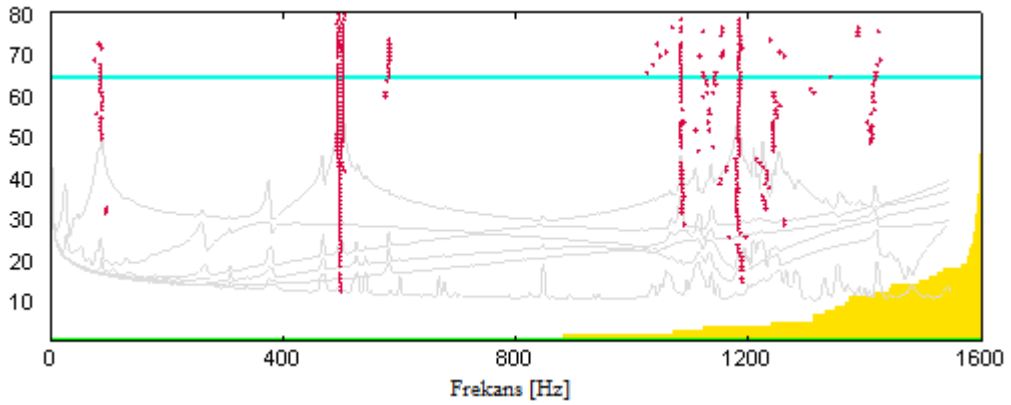
Şekil 2.46. Hasar 2 durumu için elde edilen spektral yoğunluk matrisleri ve kararlılık diyagramı



a) Spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri

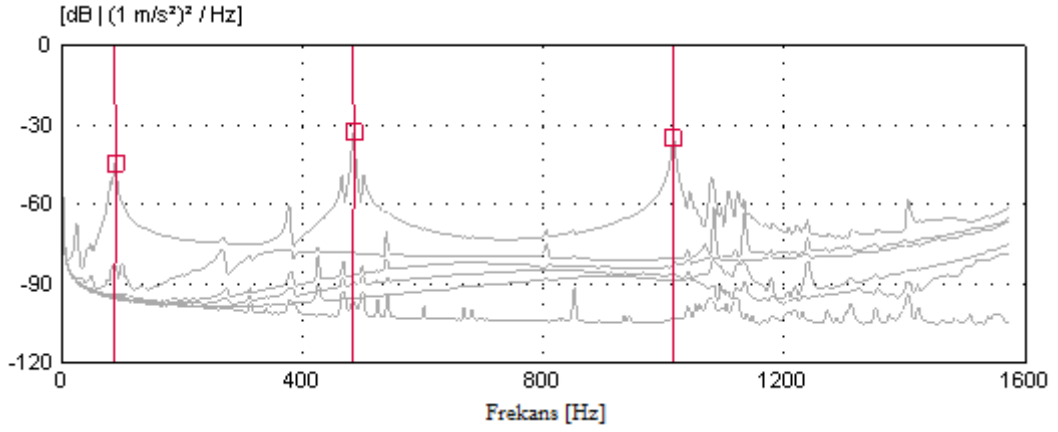


b) Spektral yoğunluk matrislerinin ortalaması

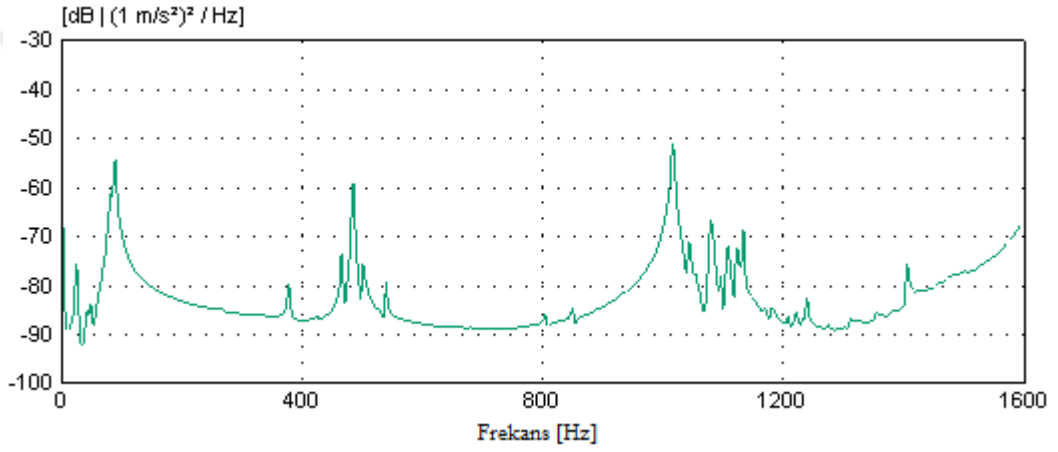


c) Kararlılık diyagramı

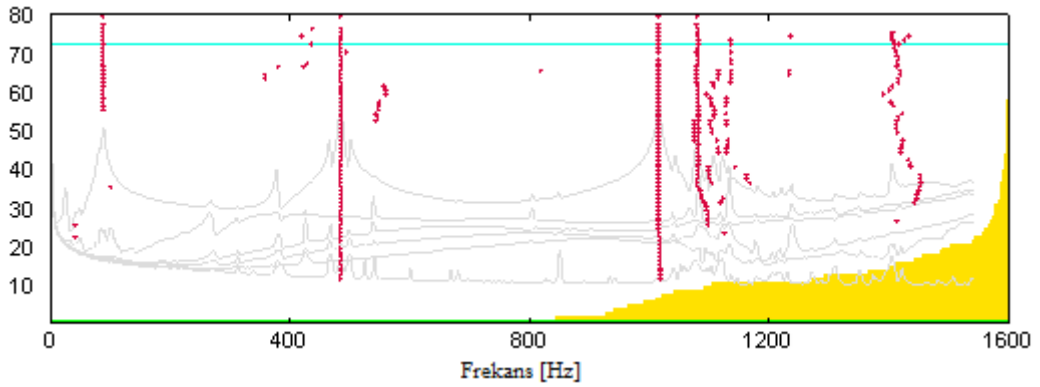
Şekil 2.47. Hasar 3 durumu için elde edilen spektral yoğunluk matrisleri ve kararlılık diyagramı



a) Spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri

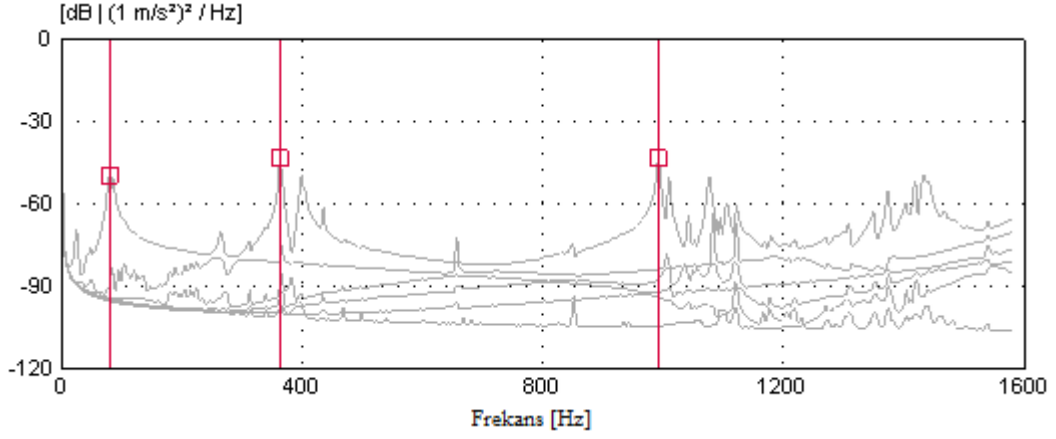


b) Spektral yoğunluk matrislerinin ortalaması

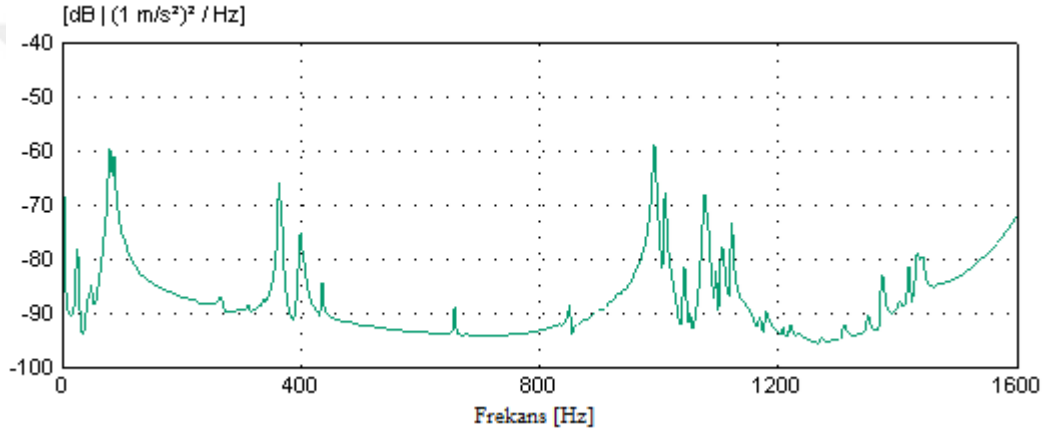


c) Kararlılık diyagramı

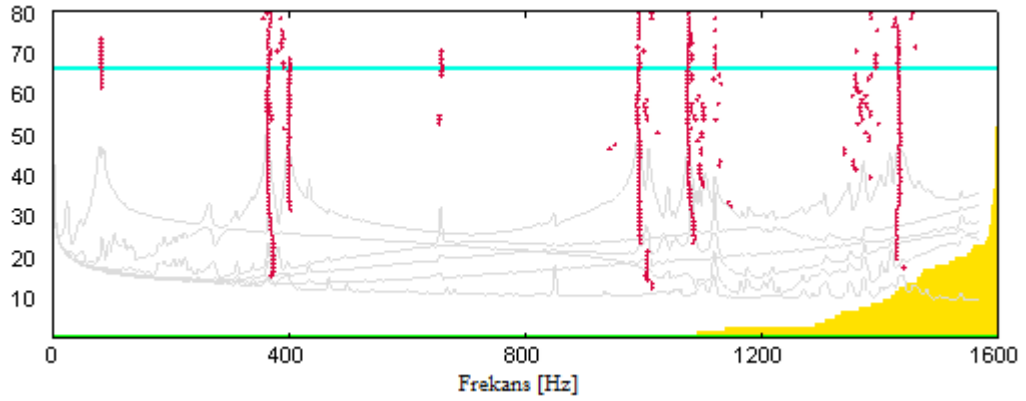
Şekil 2.48. Hasar 4 durumu için elde edilen spektral yoğunluk matrisleri ve kararlılık diyagramı



a) Spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri

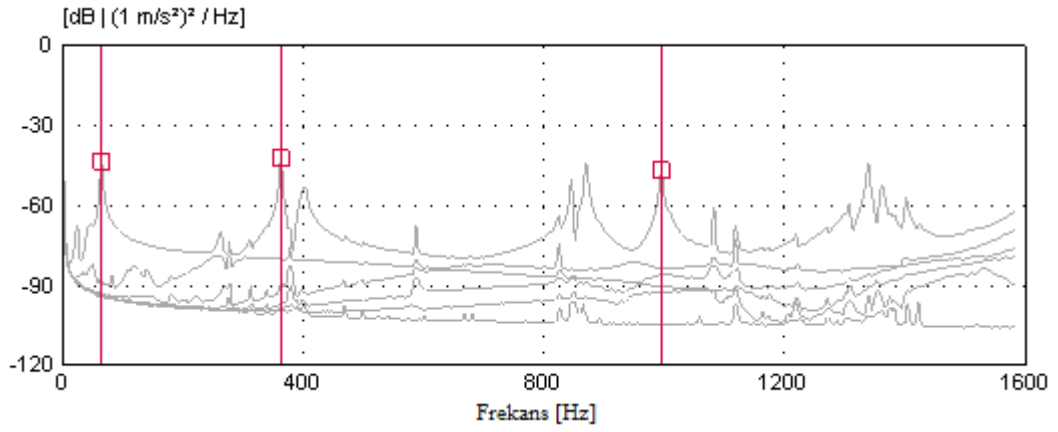


b) Spektral yoğunluk matrislerinin ortalaması

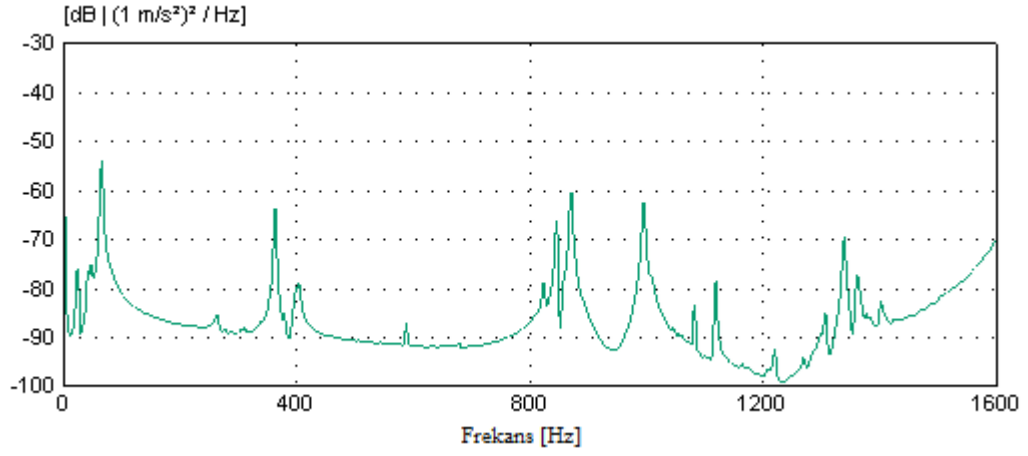


c) Kararlılık diyagramı

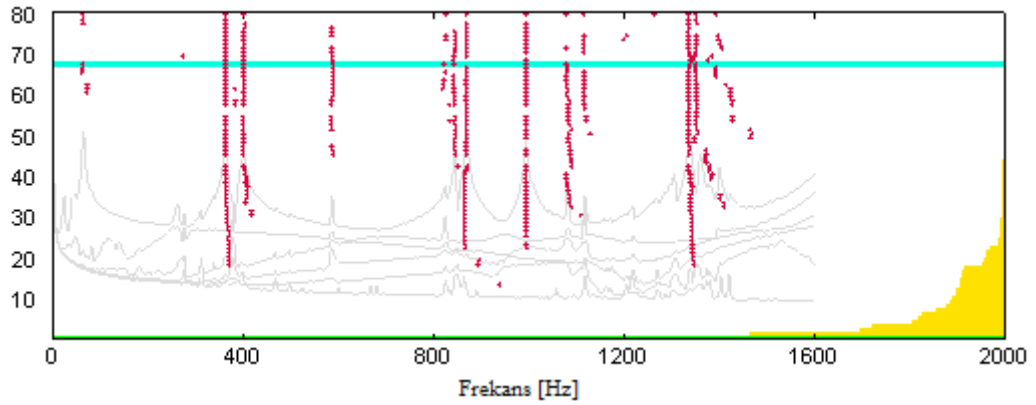
Şekil 2.49. Hasar 5 durumu için elde edilen spektral yoğunluk matrisleri ve kararlılık diyagramı



a) Spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri

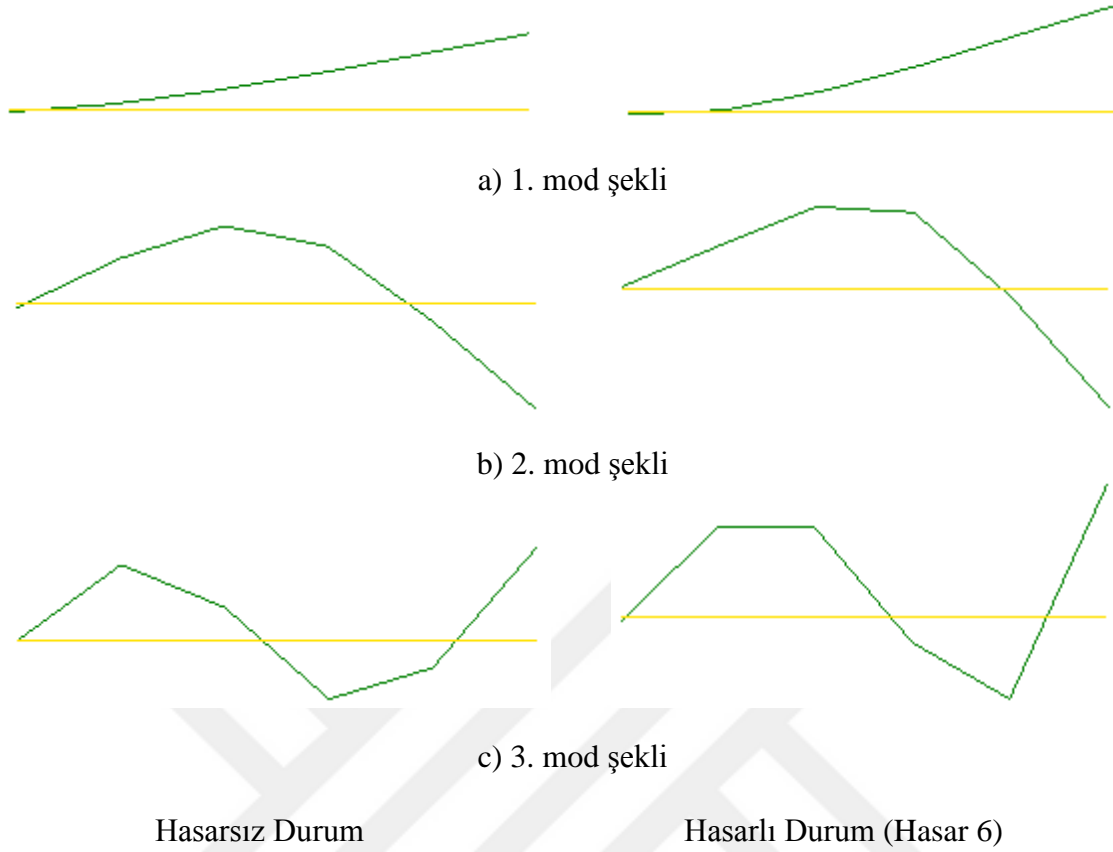


b) Spektral yoğunluk matrislerinin ortalaması



c) Kararlılık diyagramı

Şekil 2.50. Hasar 6 durumu için elde edilen spektral yoğunluk matrisleri ve kararlılık diyagramı



Şekil 2.51. Hasarsız ve hasarlı durum için deneysel olarak elde edilen mod şekli

Tablo 2.11. Deneysel olarak elde edilen frekansların karşılaştırılması

Mod Numarası	Hasarsız	Hasar Durumları					
		1	2	3	4	5	6
1	96,69	85,56	87,62	88,15	89,58	82,74	66,08
2	551,3	548,2	499,3	494,8	485,2	363,8	363,80
3	1330,0	1312,0	1190,0	1183,0	1017,0	992,5	995,80
Maksimum Farklar (%)							
1	-11,51	+2,41	+0,60	+1,62	-7,63	-20,14	
2	-0,56	-8,92	-0,90	-1,94	-25,02	0,00	
3	-1,35	-9,29	-0,59	-14,03	-2,41	+0,33	

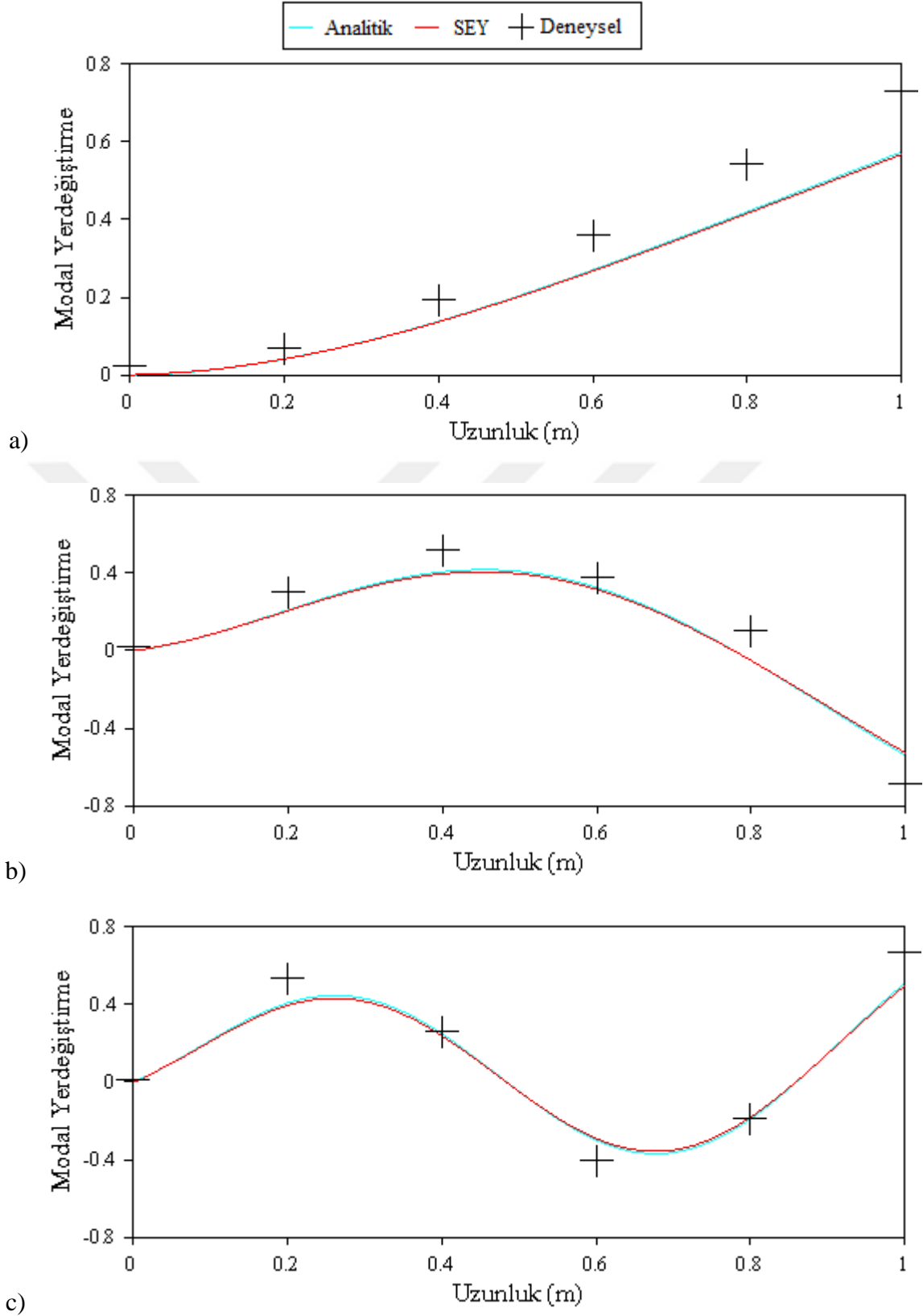
2.2.2.6. Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırılması

Kutu kesitli çelik konsol kirişte hasarlı ve hasarsız durumlar dikkate alınarak analitik, sayısal ve deneysel olarak elde edilen frekans ile bu frekanslara ait maksimum fark Tablo 2.12’de özetlenmekte olup, elde edilen mod şekilleri ise Şekil 2.52-2.58’de

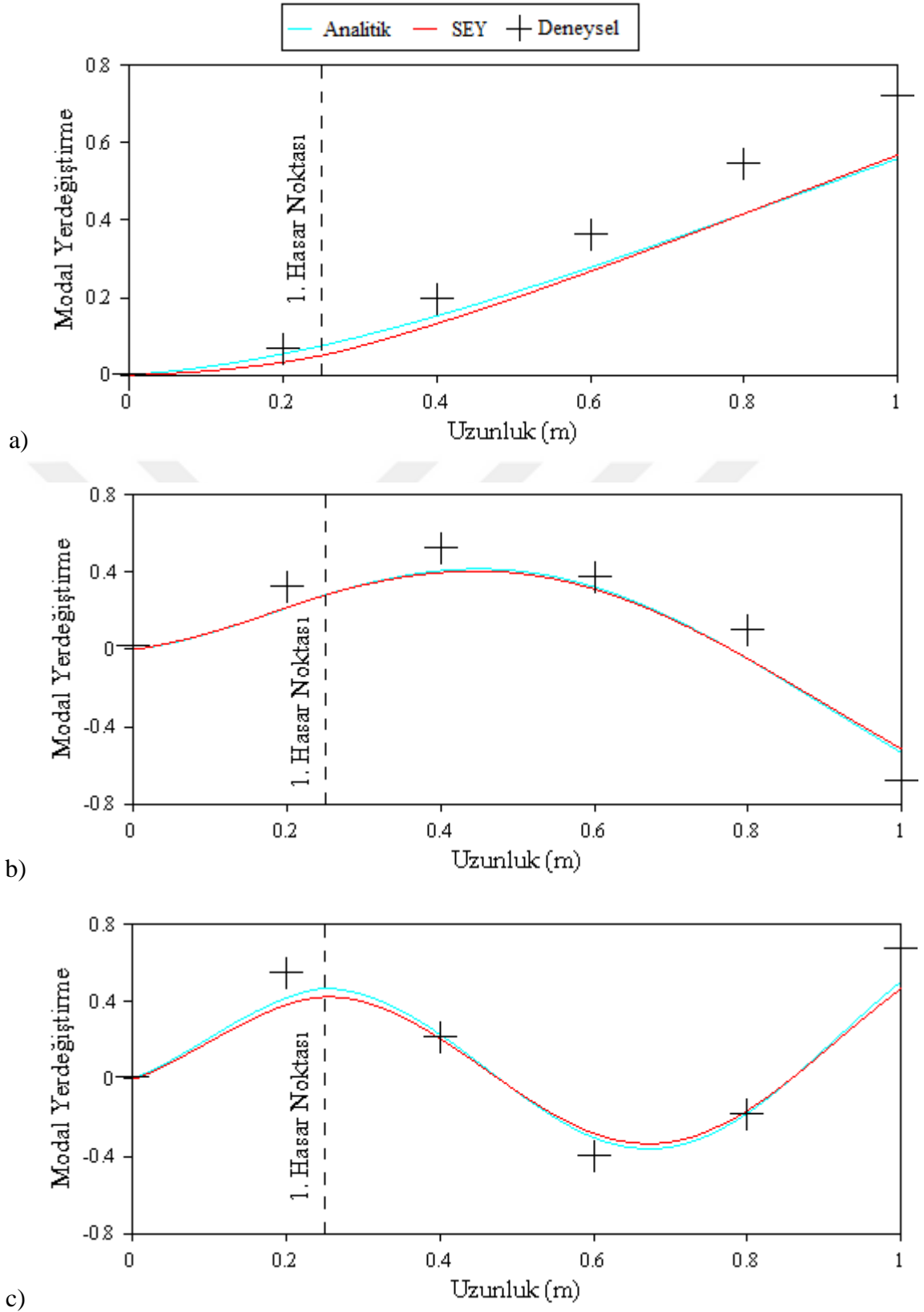
gösterilmektedir. Tablo 2.12 ve Şekil 2.52-2.58 incelendiğinde hasarların frekans ve mod şekilleri üzerinde etkili olduğu analitik, sayısal ve deneysel yöntemlerle de tespit edilmiştir.

Tablo 2.12. Hasarlı ve hasarsız durumlar için analitik, sayısal ve deneysel yöntemlerle elde edilen doğal frekansların karşılaştırılması

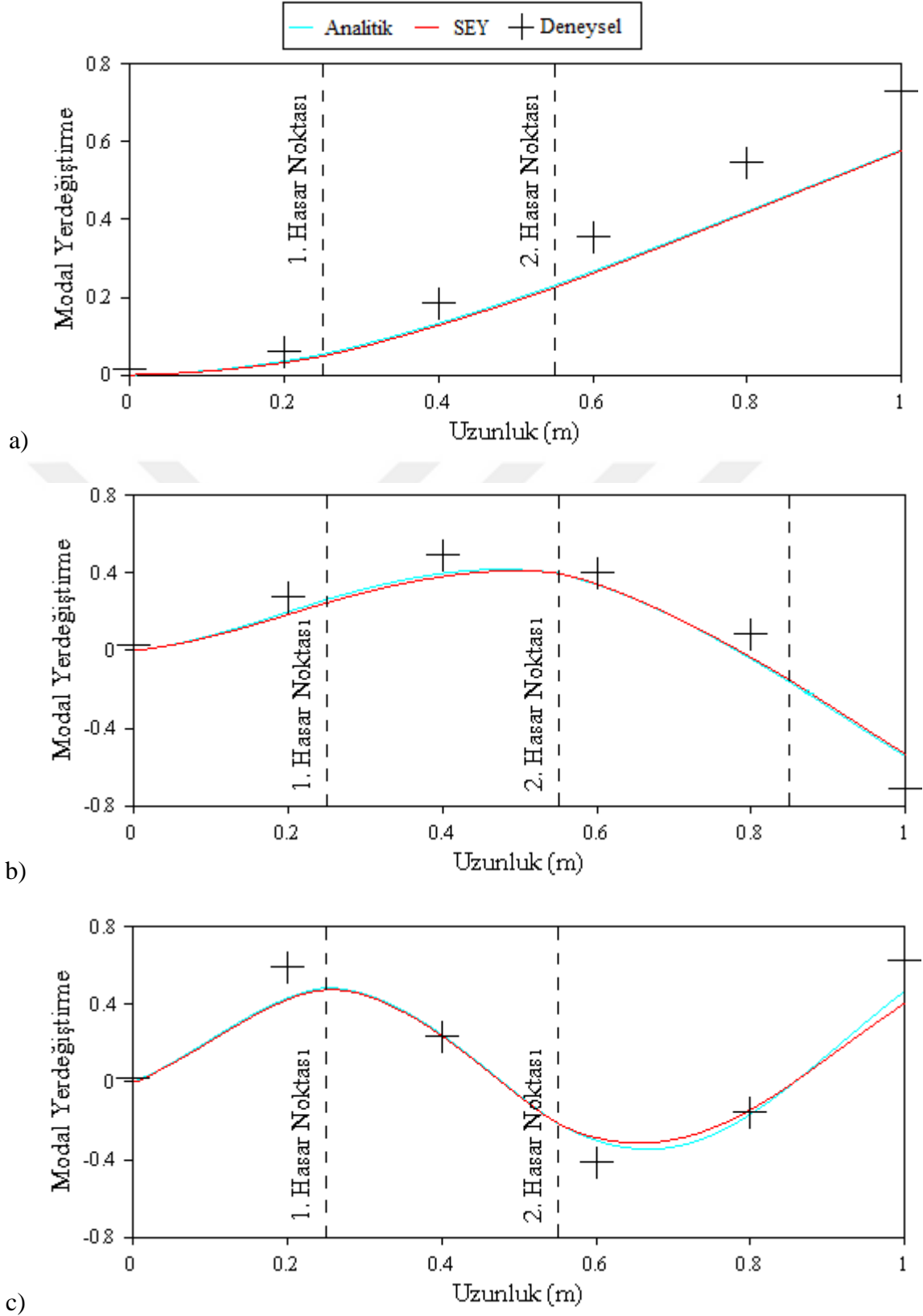
Mod Numarası	Analitik	Fark (%)	Deneysel		Fark (%)	SEY
			GFTAA	SAB		
Hasarsız						
1	110,94	14,73	96,69	95,95	18,81	114,88
2	612,79	11,15	551,3	551,8	14,16	629,37
3	1483,5	11,54	1330	1330	14,51	1523
Hasar 1						
1	104,84	22,53	85,56	86,3	20,69	103,27
2	610,63	11,38	548,2	546,8	14,49	627,66
3	1442,7	9,96	1312	1139	13,32	1486,8
Hasar 2						
1	103,79	18,45	87,62	87,06	15,80	101,47
2	578,58	15,78	499,3	507,1	14,03	569,37
3	1417,1	19,08	1190	1265	18,75	1413,2
Hasar 3						
1	103,88	17,84	88,15	86,55	15,31	101,65
2	576,4	16,49	494,8	494,7	14,32	565,65
3	1397,3	18,11	1183	1187	16,26	1375,3
Hasar 4						
1	103,67	15,73	89,58	88,34	13,43	101,61
2	554,88	14,36	485,2	485,2	12,17	544,24
3	1182,7	16,29	1017	1017	22,66	1247,5
Hasar 5						
1	95,03	14,85	82,74	83,48	13,63	94,02
2	420,88	15,69	363,8	366,8	15,09	418,69
3	1181,2	19,01	992,5	994,5	23,62	1226,9
Hasar 6						
1	70,31	6,4	66,08	64,12	8,02	71,38
2	416,72	14,55	363,80	364,90	13,93	414,49
3	1067,90	7,2	995,80	995,70	11,15	1106,8



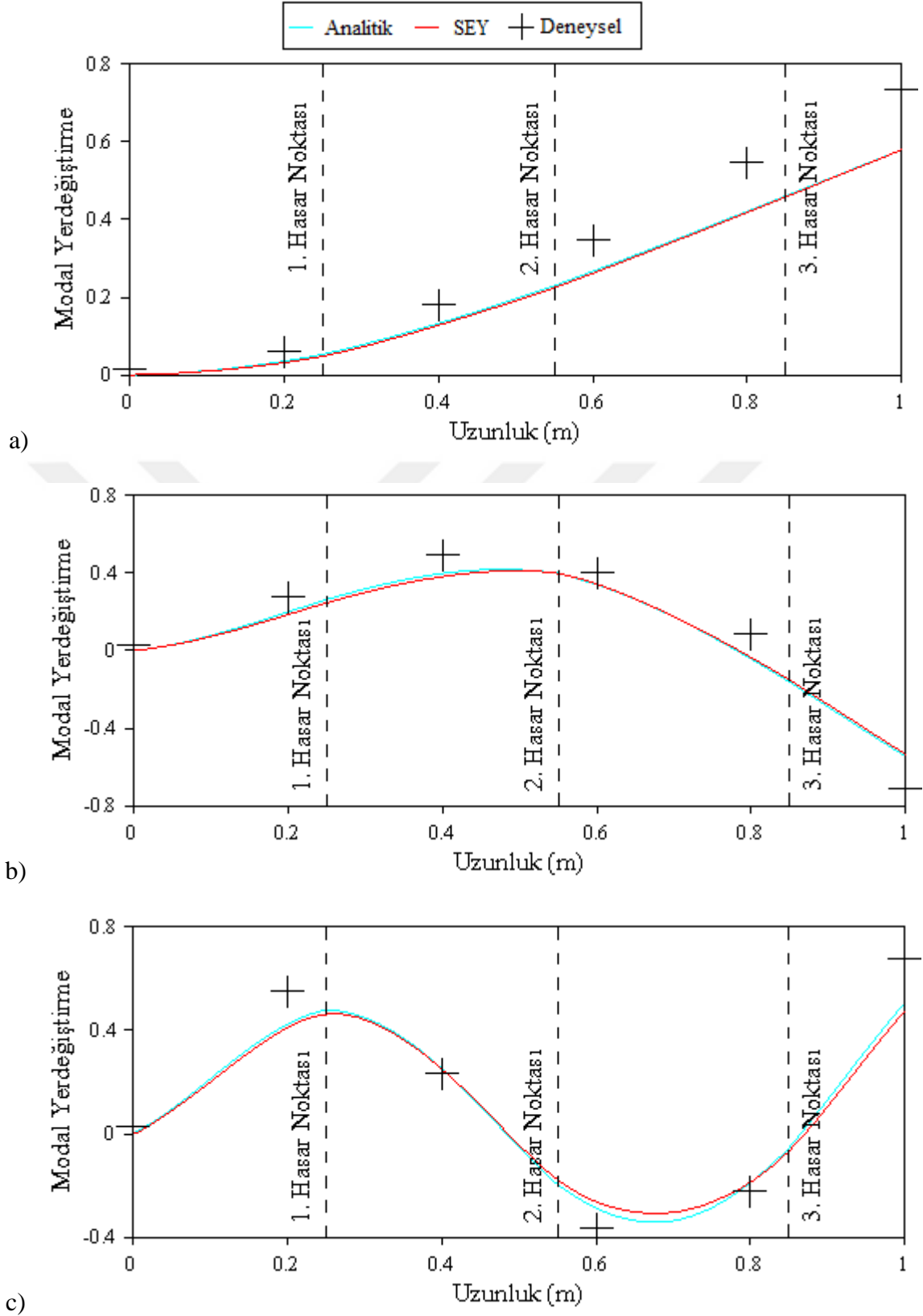
Şekil 2.52. Hasarsız durum için elde edilen (a) birinci, (b) ikinci ve (c) üçüncü mod şeklinin karşılaştırılması



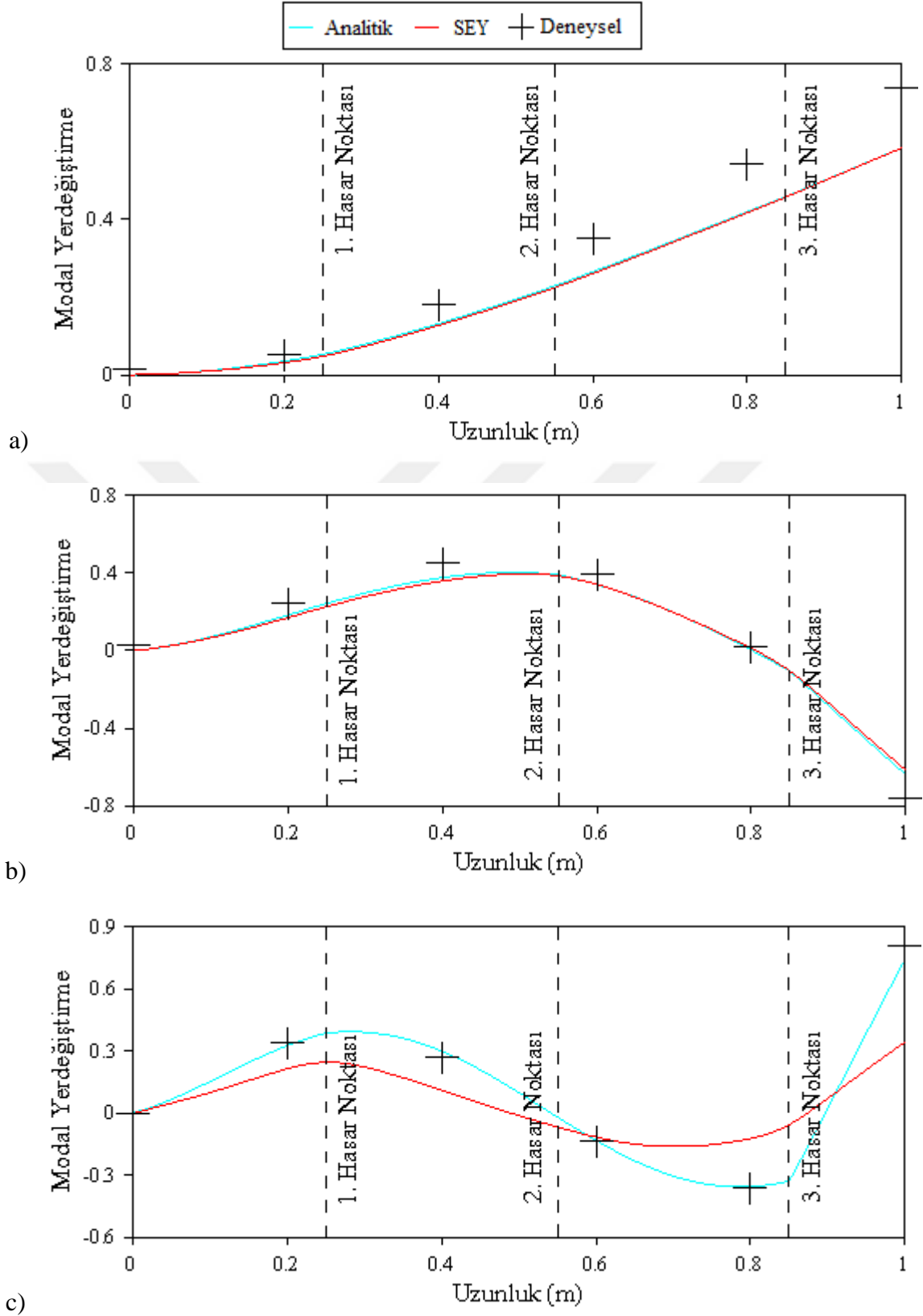
Şekil 2.53. Hasar 1 durumu için elde edilen (a) birinci, (b) ikinci ve (c) üçüncü mod şeklinin karşılaştırılması



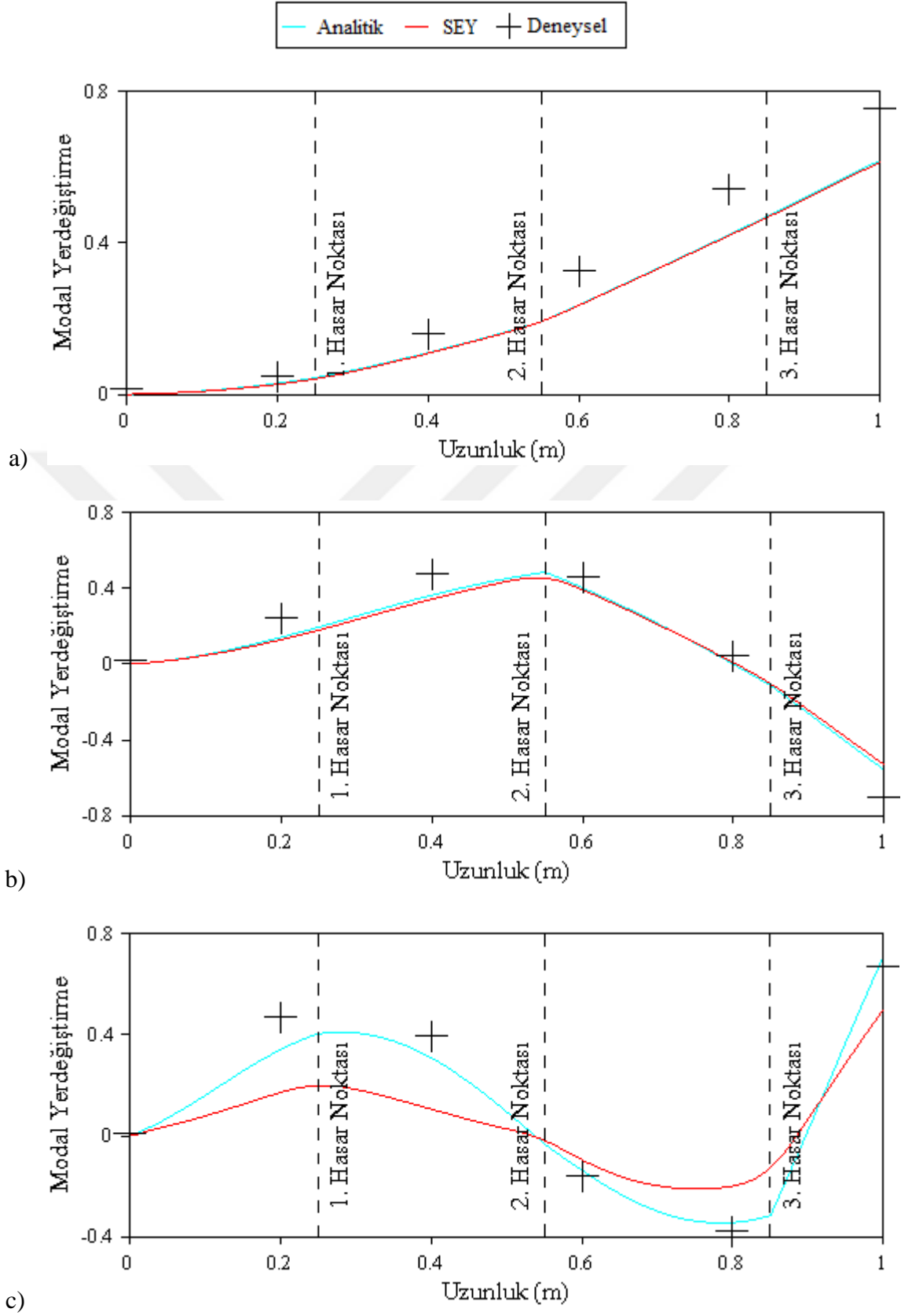
Şekil 2.54. Hasar 2 durumu için elde edilen (a) birinci, (b) ikinci ve (c) üçüncü mod şeklinin karşılaştırılması



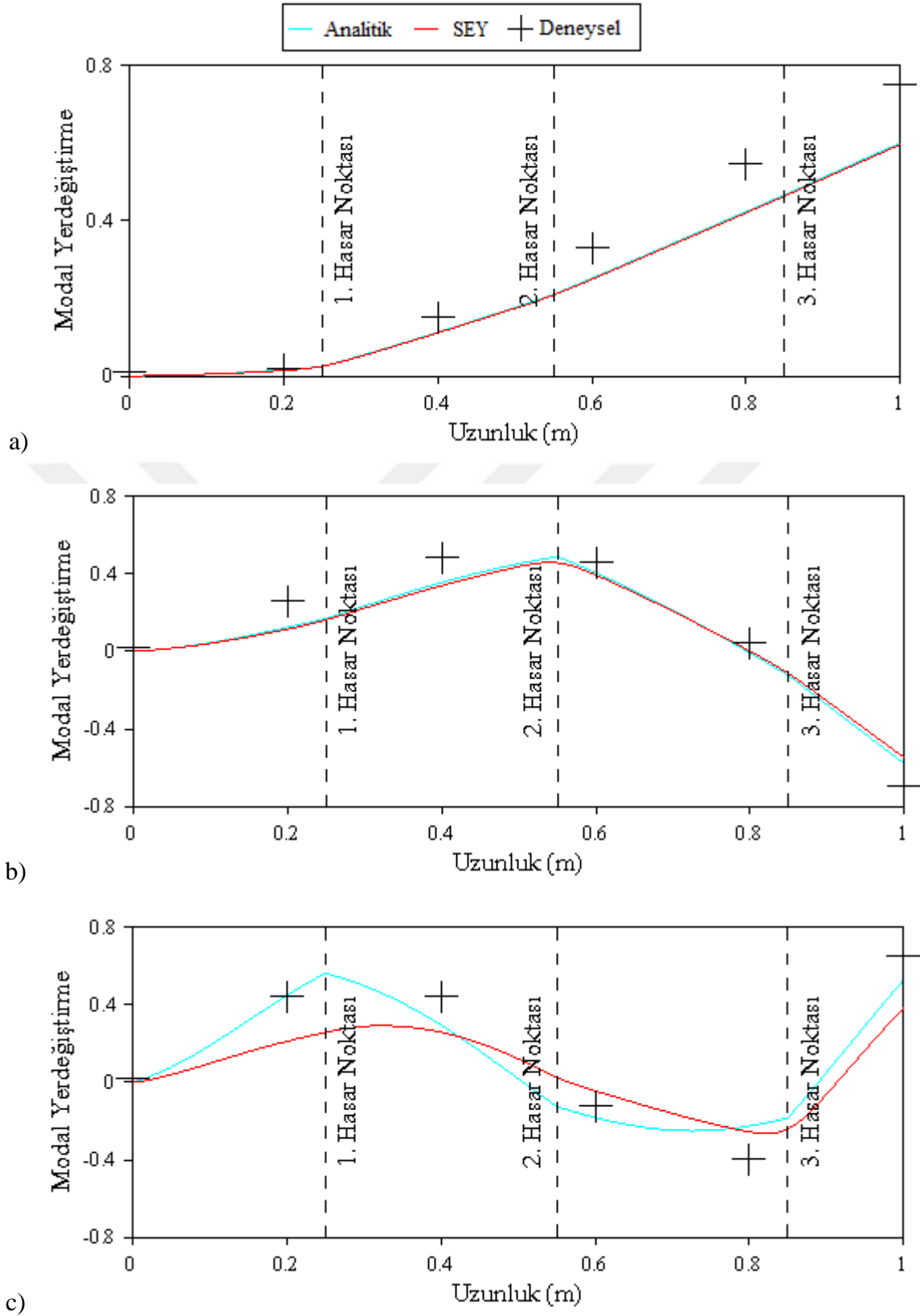
Şekil 2.55. Hasar 3 durumu için elde edilen (a) birinci, (b) ikinci ve (c) üçüncü mod şeklinin karşılaştırılması



Şekil 2.56. Hasar 4 durumu için elde edilen (a) birinci, (b) ikinci ve (c) üçüncü mod şeklinin karşılaştırılması



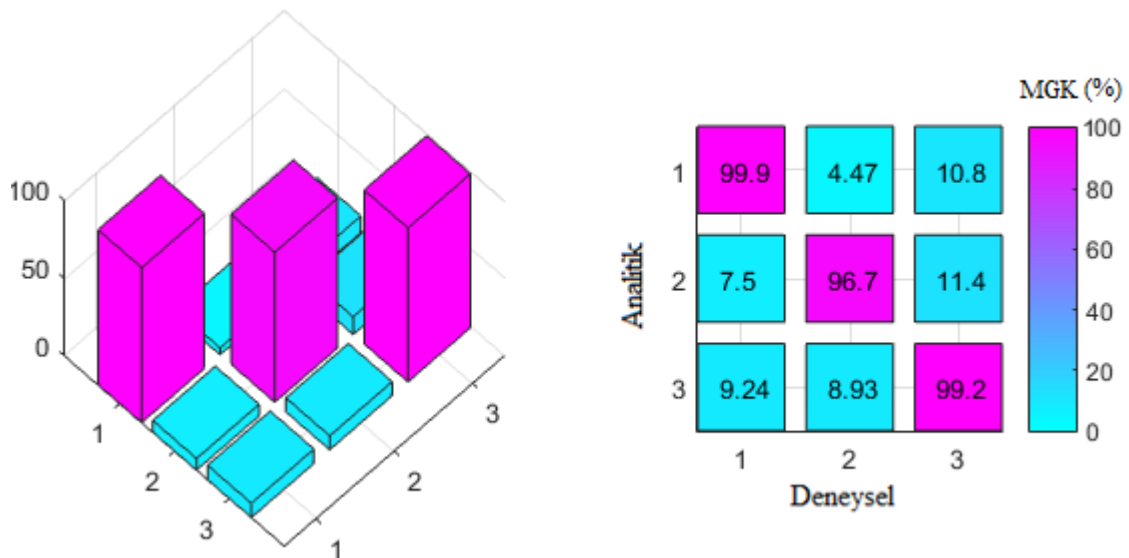
Şekil 2.57. Hasar 5 durumu için elde edilen (a) birinci, (b) ikinci ve (c) üçüncü mod şeklinin karşılaştırılması



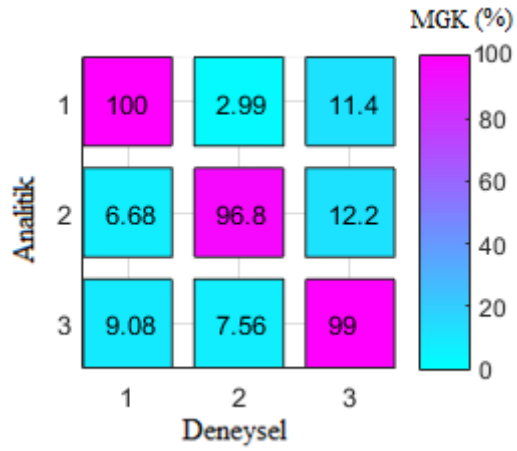
Şekil 2.58. Hasar 6 durumu için elde edilen (a) birinci, (b) ikinci ve (c) üçüncü mod şeklinin karşılaştırılması

Ayrıca farklı hasar durumlarında, analitik, sayısal ve deneysel olarak elde edilen birinci ve ikinci mod şekillerinin birbirleriyle uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Fakat üçüncü mod şekli incelendiğinde, hasarın artmasıyla birlikte sonlu eleman yöntemiyle elde edilen mod şeklinde bozulmaların meydana geldiği belirlenmiştir. Bunun nedeni ise, ilerleyen hasar durumlarında sonlu eleman modelinde bulunan eleman sayısının belirli bir şekilde azalmasıdır. Bu durum, mod şeklinin bozulmasına neden olmaktadır.

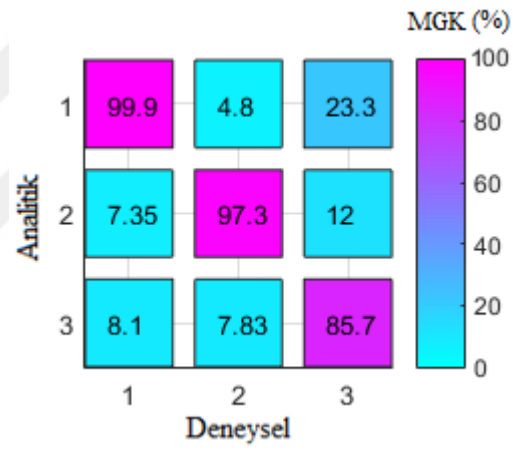
Mod şekilleri arasındaki benzerlik oranının daha net bir şekilde değerlendirilmesi amacıyla, MGK grafikleri elde edilmiş ve karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. İlgili grafikler elde edilirken, sonlu eleman modeli üzerinde ilerleyen hasar durumları için bozulmalar meydana geldiğinden dolayı analitik sonuçlar dikkate alınmıştır. Hasarsız durum için hesaplanan MGK matrisi Şekil 2.59'da, altı farklı hasar durumu için elde edilen MGK grafikleri ise Şekil 2.60'da verilmektedir. Şekil 2.59 ve 2.60 detaylı olarak incelendiğinde, boru kesitli çelik konsol kiriş modeli için çeşitli hasar durumlarında elde edilen analitik ve deneysel sonuçların birbirleriyle uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Buna karşın, analitik ve deneysel olarak elde edilen doğal frekanslar arasındaki maksimum farkın %6,4 ile 22,53 seviyelerinde çıkması, laboratuvar ortamında inşa edilen modelde özellikle sınır şartlarında istenilen şartların sağlanmadığını ve bu bölgelerdeki sınır şartlarının ankastre mesnet yerine belirli rijitliğe sahip yaylar ile temsil edilmesi gerektiğini göstermektedir.



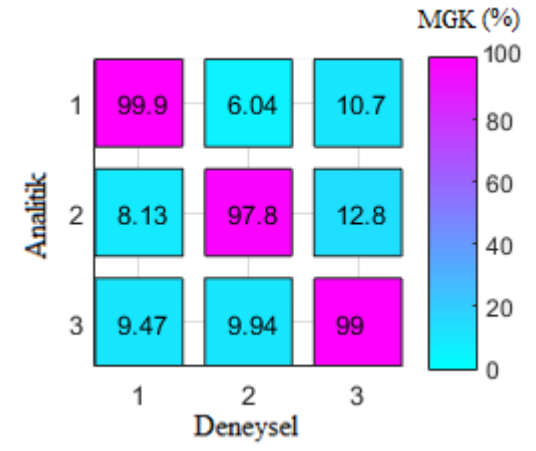
Şekil 2.59. Hasarsız durum için analitik ve deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen MGK grafiği



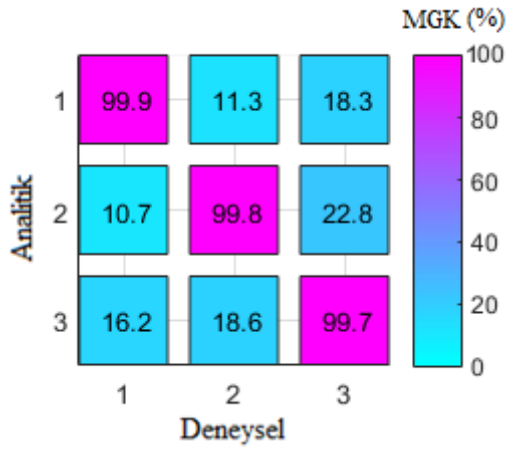
a) Hasar 1



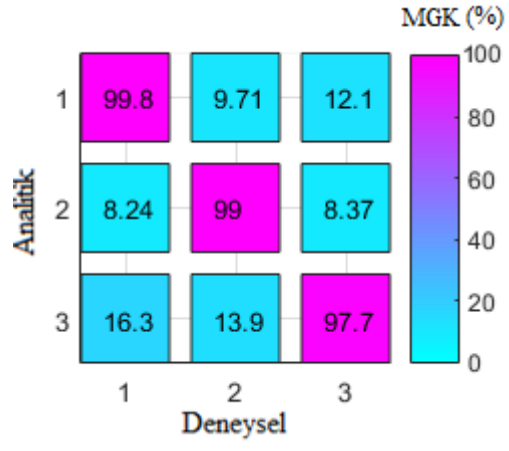
b) Hasar 2



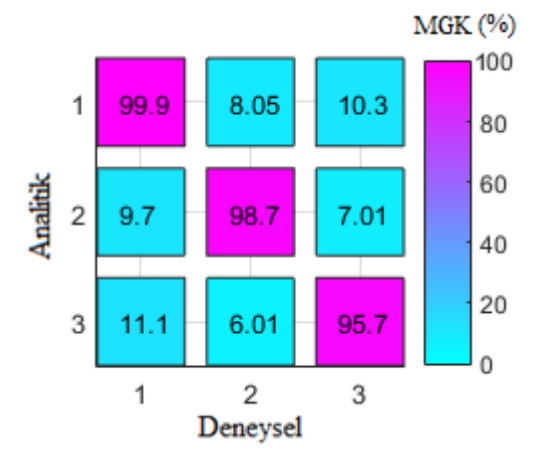
c) Hasar 3



d) Hasar 4



e) Hasar 5



f) Hasar 6

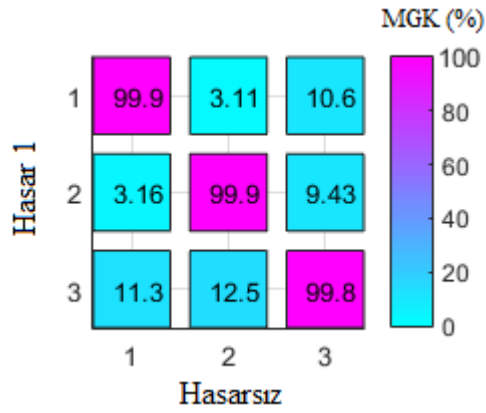
Şekil 2.60. Altı farklı hasar durumu için analitik ve deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen MGK grafikleri

2.2.2.7. Çevresel Titreşimlere Dayalı Hasar Tespit Yöntemlerinin Karşılaştırılması

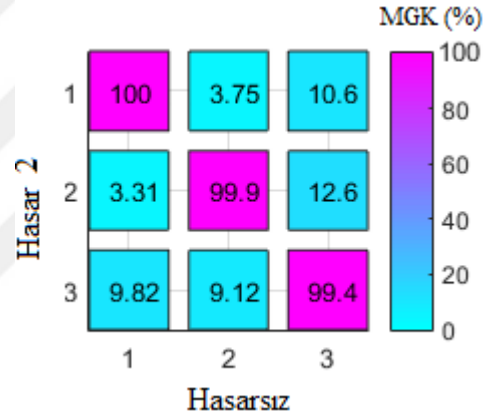
Bu bölümde kutu kesitli konsol kiriş modelinde, analitik, sayısal ve deneysel olarak elde edilen dinamik karakteristikler kullanılarak Modal Güvence Kriteri (MGK), Koordinat Modal Güvence Kriteri (KMGK), Mod Şekli Eğrilik Yöntemi, Modal Esneklik Yöntemi ve Duyarlılığa Bağlı Model Güncelleme Yöntemlerine dayalı hasar tespiti yapılması ve elde edilen sonuçların birbirleriyle karşılaştırılması amaçlanmaktadır.

MGK matrislerine bağlı hasar durumu değerlendirilmesinde hasarın meydana gelmesi ve ileri hasar durumlarının oluşması ile birlikte MGK değerlerinde belirgin bir azalmanın oluşması beklenilmektedir. Hasarsız ve her bir hasar durumu için elde edilen MGK grafikleri incelendiğinde (Şekil 2.61), ilk hasar durumu için ilgili değerlerde belirgin bir azalmanın meydana gelmediği, ilerleyen son üç hasar durumunda ise değerlerde belirgin azalmaların olduğu gözlemlenmiştir.

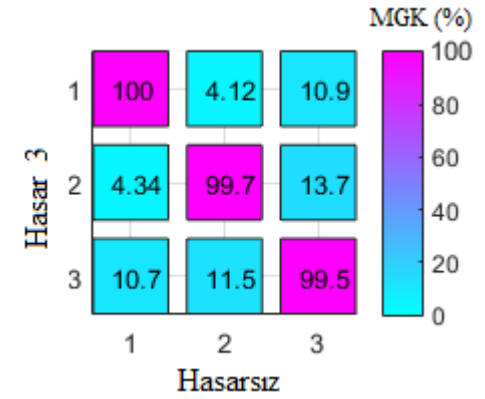
Analitik, sayısal ve deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen KMGK grafiklerinin incelenmesi ile, meydana gelebilecek hasarların yerlerinin belirlenmesi amaçlanmaktadır. KMGK değeri 1'e yakın oldukça ilgili düğüm noktasındaki değerlerin birbirleriyle uyumlu olduğu anlaşılmakta, ilerleyen hasar durumlarında bu değerlerin azalması beklenmektedir. Fakat azalma oranı bazı durumlarda gözle görülemeyecek kadar küçük olduğundan, yanlış bir yorumlama yapılmaması ve hasar bölgelerin net bir şekilde tespit edilmesi için değerlerin hesaplanmasında (1-KMGK) ifadesi kullanılmaktadır (Şekil 2.62). Şekil 2.62 detaylı olarak incelendiğinde, ilk üç hasar durumu için grafikteki değerlerde belirgin bir değişim meydana gelmediği tespit edilmiştir. Fakat ilerleyen son üç hasar durumunda ise değerler arasında oluşan farklılıklar gözle görülebilir düzeyde olmuştur. Ayrıca, analitik ve sayısal yöntemler de konsol kirişin mesnet şartı ankastre kabul edildiğinden dolayı bu bölgedeki (1-KMGK) sıfır olarak hesaplanmaktadır. Deneysel ölçümlerde ise mesnet noktasına ivmeölçer yerleştirilmiş ve bu bölgede hesaplanan değerler sıfır olarak elde edilememiştir. Bu durumda tasarım aşamasında istenilen ankastre mesnet şartının laboratuvar ortamında tam olarak sağlanamadığı tekrar ortaya çıkmıştır. Bu nedenle, konsol kirişe ait sonlu eleman modelinin hasarsız durum dikkate alınarak mesnet şartlarına göre iyileştirilmesi gereklidir.



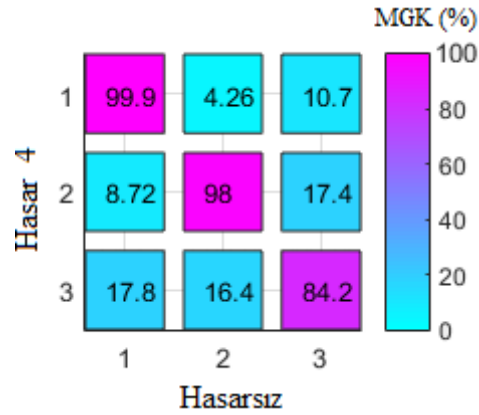
a) Hasar 1



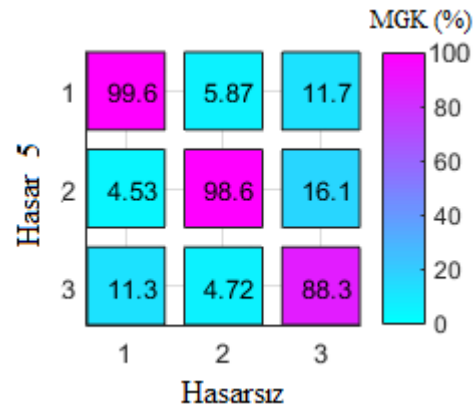
b) Hasar 2



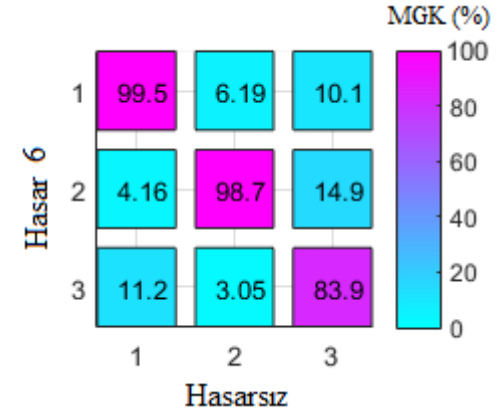
c) Hasar 3



d) Hasar 4

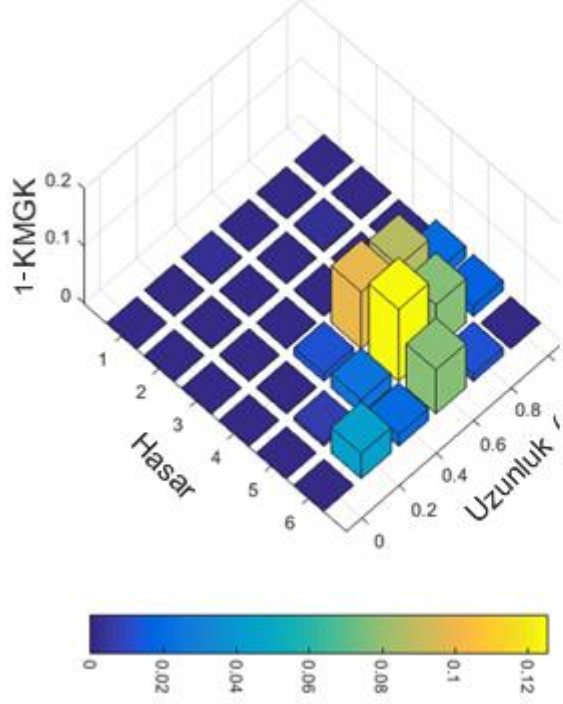


e) Hasar 5

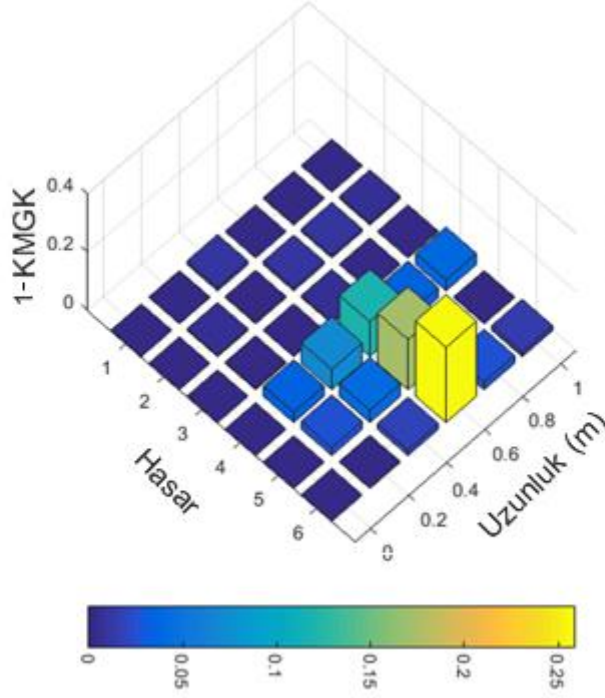


f) Hasar 6

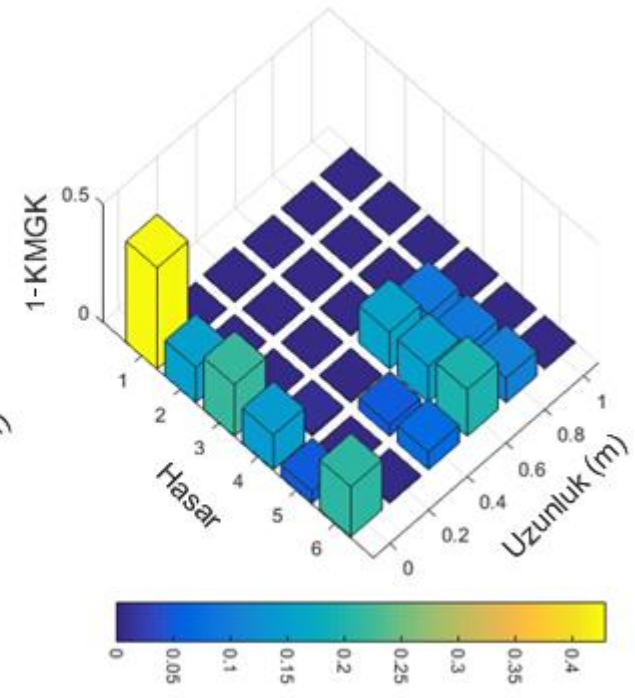
Şekil 2.61. Hasarsız durum ile her bir hasar durumunun karşılaştırılması sonucu elde edilen deneysel MGK değerleri



a) Analitik



b) Sayısal



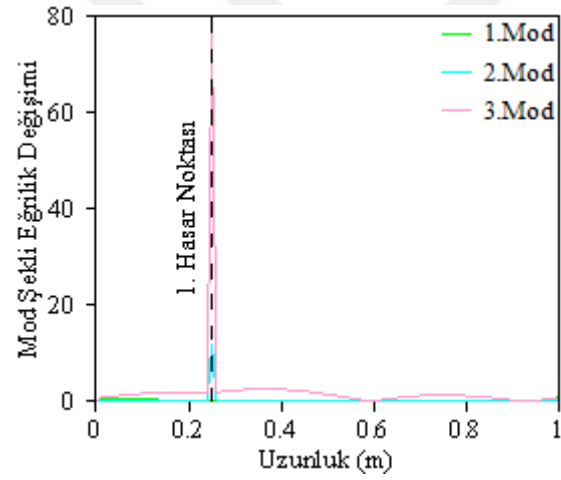
c) Deneysel

Şekil 2.62. Analitik, sayısal ve deneysel olarak elde edilen (1-KMGK) grafikleri

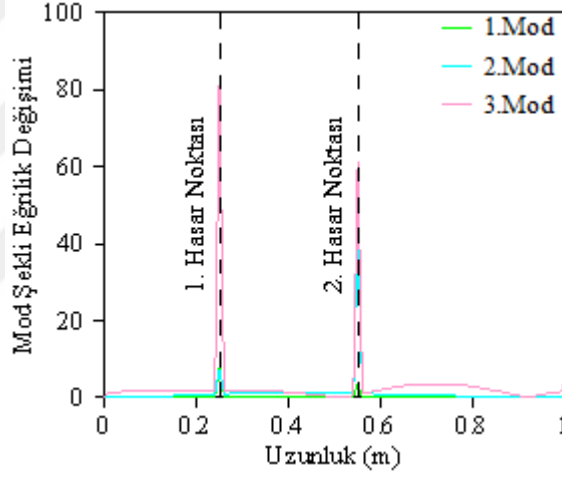
Hasarsız ve farklı hasar durumları için Mod Şekli Eğrilik Yöntemi ile birlikte analitik olarak elde edilen hasar tespit grafikleri Şekil 2.63'de gösterilmiştir. Analitik çözümde, 1m uzunluğundaki konsol kirişe ait mod şekli fonksiyonunda 1cm aralıklarla 101 adet düğüm noktası oluşturularak modal yerdeğiştirme değerleri elde edilmiştir. Şekil 2.63'de görüldüğü gibi hasarın olduğu yerlerde ani pik değerleri oluşmakta ve hasar şiddetinin artmasıyla mod şekli eğrilik değişim değerlerinde de ani bir artış meydana gelmektedir. Ayrıca, mod şekli eğrilik değişimlerinde 3. modun daha etkin olduğu bulunmuştur.

Hasarsız ve farklı hasar durumları arasında Mod Şekli Eğrilik Yöntemi ile birlikte deneysel olarak elde edilen hasar tespit grafikleri Şekil 2.64'de gösterilmiştir. Deneysel olarak 6 adet ivmeölçer kullanıldığından dolayı, konsol kirişte de 6 adet düğüm noktası oluşturulmuş ve düğüm noktalarına ait mod şekli eğrilik değişim değerleri hesaplanarak doğrusal olarak birleştirilmiştir. Şekil 2.64 incelendiğinde hasarın olması durumunda o bölgedeki mod şekli eğrilik değişiminin arttığı, hasar şiddetinin artmasıyla mod şekli eğrilik değişiminin de arttığı ve doğal frekans değerleri arttıkça mod şekli eğrilik değişim değerlerinin daha belirgin olduğu görülmektedir.

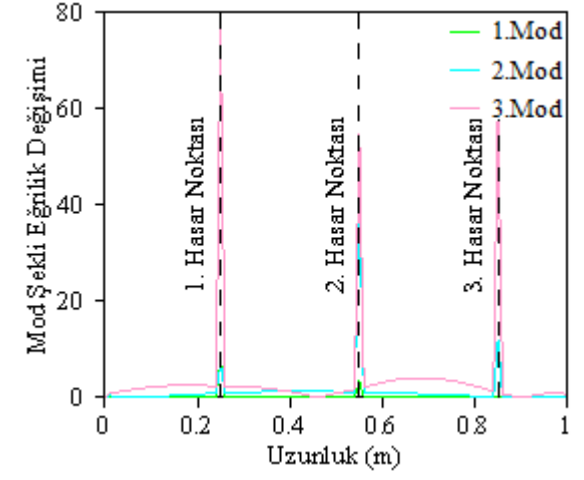
Şekil 2.65'te analitik ve deneysel olarak elde edilen mod şekli eğrilik değişim grafikleri (Şekil 2.63 ve Şekil 2.64) verilmektedir. Deneysel olarak 6 düğüm noktası olduğu için karşılaştırmanın sağlıklı olması açısından analitik olarak da 6 düğüm noktası dikkate alınmıştır. Şekil 2.63-2.64'de analitik ve deneysel şekillere bakıldığında hasar bölgesinde mod şekli eğrilik değişiminin yüksek olduğu bölgelerde 3. modun daha etkin olduğu görülmektedir. Bu nedenle analitik ve deneysel olarak mod şekli eğrilik değişimlerinde 3. modlar dikkate alınarak karşılaştırma yapılmıştır. Şekil 2.65 incelendiğinde, Hasar 1, Hasar 2 durumunda analitik ve deneysel olarak elde edilen mod şekli eğrilik değişimlerinde hasar bölgesini tespit edebildiği, Hasar 3 durumunda ise her iki yöntemin 3.hasar noktasını tespit edemediği, Hasar 4 ve Hasar 5 durumunda ağır hasarların bölgesini tespit edildiği ve Hasar 6 durumunda ise 3. ve 4. hasar durumları tespit edilemediği görülmektedir. Tüm grafikler genel olarak incelendiğinde, analitik ve deneysel grafiklerin bir uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Buradan, kutu kesitli çelik konsol kiriş modelinde analitik ve deneysel olarak elde edilen verilerle Mod Şekli Eğrilik Yöntemi kullanılarak, hasar bölgesini daha etkili bir şekilde tespit ettiği anlaşılmaktadır.



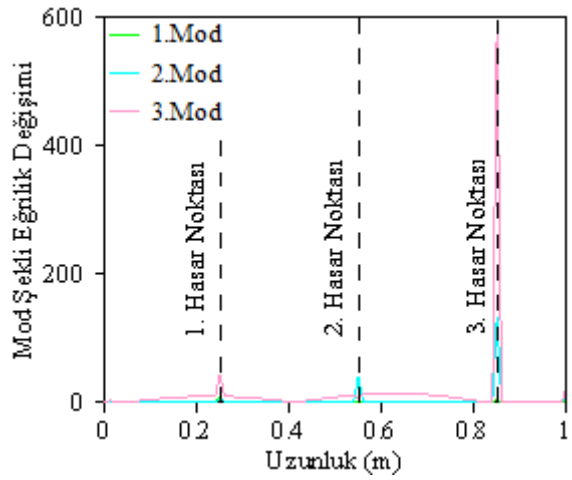
a) Hasar 1



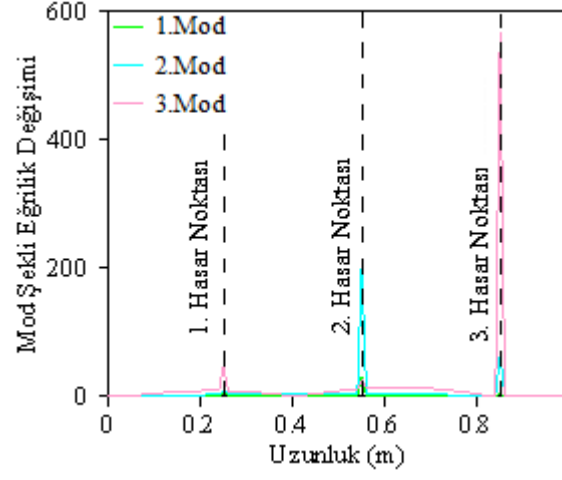
b) Hasar 2



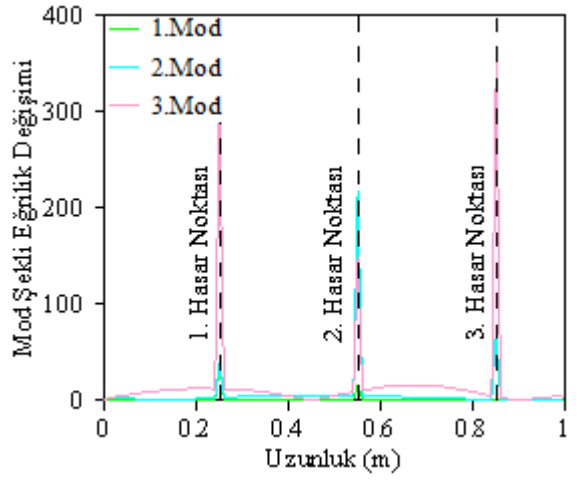
c) Hasar 3



d) Hasar 4

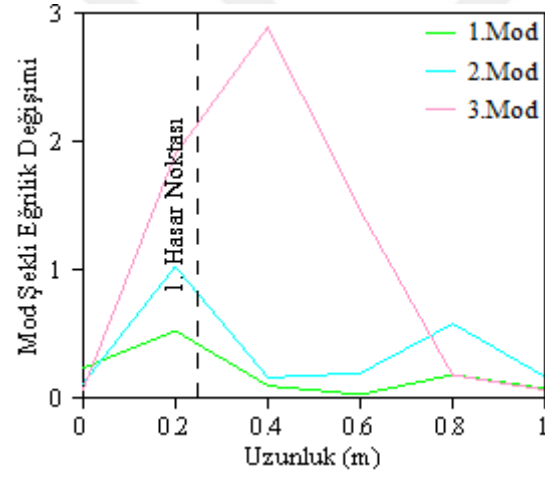


e) Hasar 5

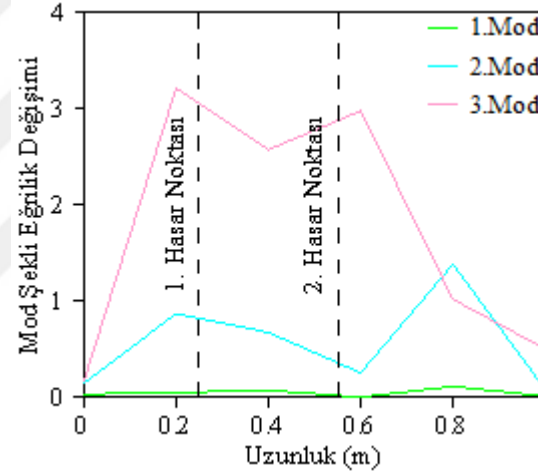


e) Hasar 6

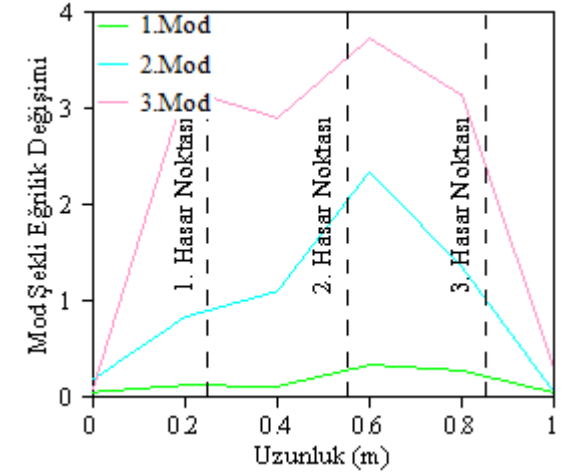
Şekil 2.63. Mod Şekli Eğrilik Yöntemi kullanılarak analitik çözüme dayalı elde edilen hasar tespit grafikleri



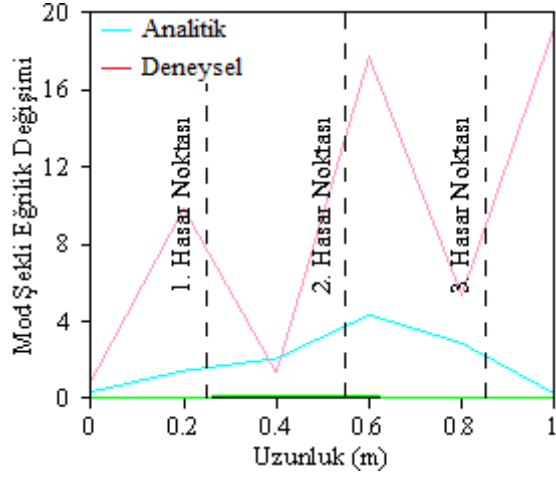
a) Hasar 1



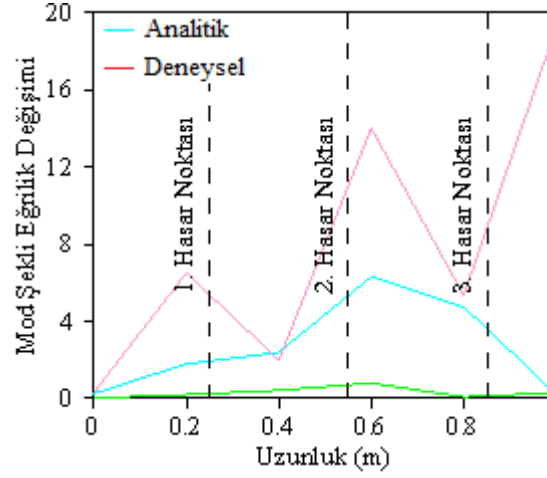
b) Hasar 2



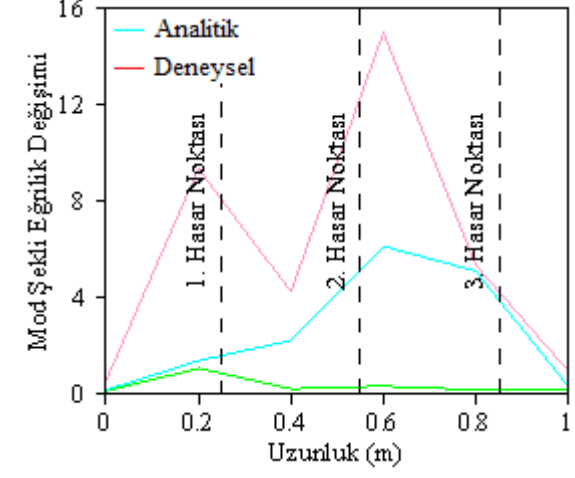
c) Hasar 3



d) Hasar 4

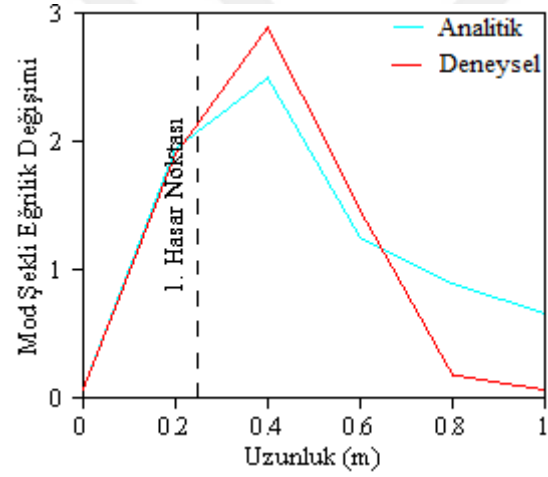


e) Hasar 5

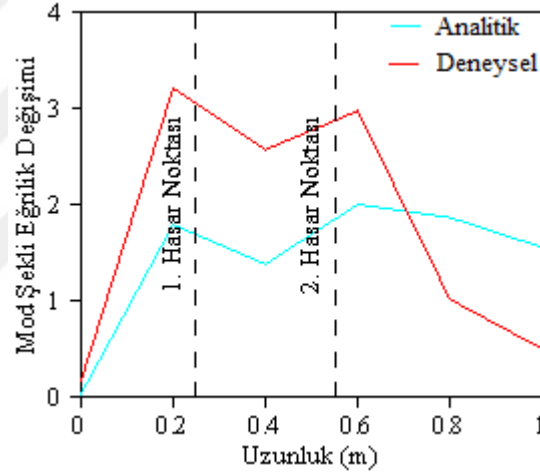


e) Hasar 6

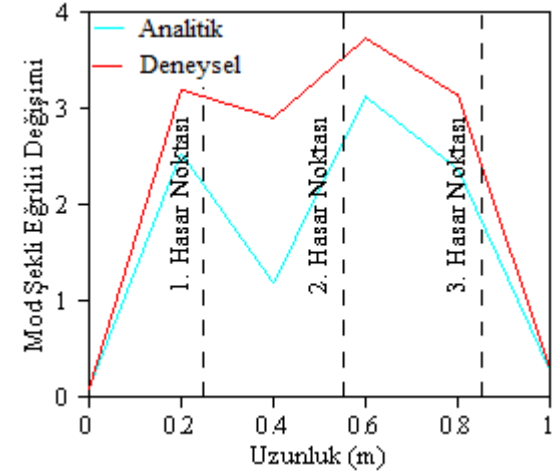
Şekil 2.64. Mod Şekli Eğrilik Yöntemi kullanılarak deneysel çözüme dayalı elde edilen hasar tespit grafikleri



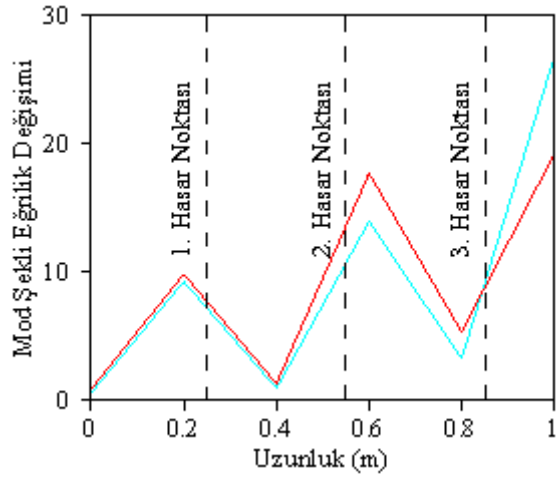
a) Hasar 1



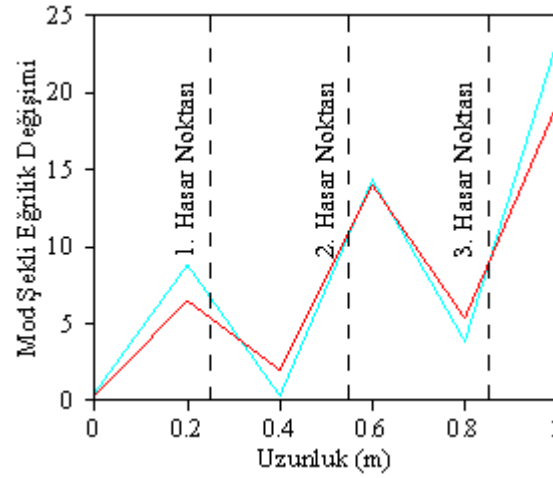
b) Hasar 2



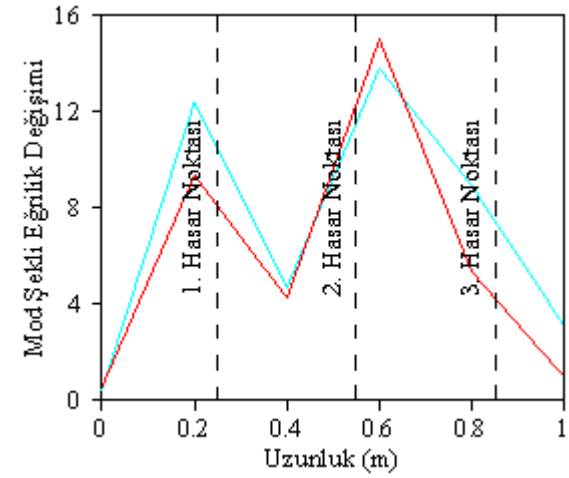
c) Hasar 3



d) Hasar 4



e) Hasar 5



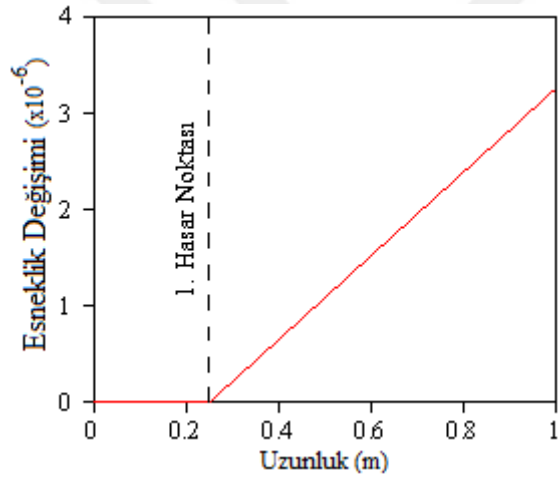
e) Hasar 6

Şekil 2.65. Mod Şekli Eğrilik Yöntemi kullanılarak analitik ve deneysel çözüme dayalı elde edilen hasar tespit grafikleri

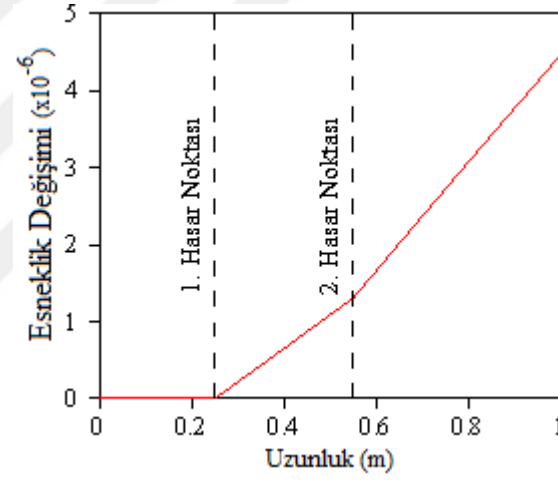
Hasarsız ve farklı hasar durumları arasında Modal Esneklik Yöntemi ile birlikte analitik olarak elde edilen hasar tespit grafikleri Şekil 2.66'da gösterilmiştir. Analitik çözümden elde edilen 101 adet düğüm noktasının modal yerdeğiştirmeleri dikkate alınmıştır. Şekil 2.66 incelendiğinde, hasarın olduğu noktada esneklik grafiğinin eğimi değıştiği ve bu da ilgili düğüm noktasında bir sıkıntı meydana geldiğini görölmektedir. Ayrıca, hasar şiddeti arttıkça esneklik değışiminin de arttđı görölmektedir. Hasar 4 durumunda 4.hasar durumunun yeri tespit edilirken, Hasar 5 ve Hasar 6 durumu incelendiğinde, 3.hasar noktasının mesnetten uzak olmasından dolayı eğiminde çok az bir sapma olduğu ve hasarın tam olarak tespit edilemediği görölmektedir. Ayrıca, hasar şiddetlerinin artmasıyla esneklik değışim değerlerinin de arttđı görölmektedir.

Hasarsız ve farklı hasar durumları arasında Modal Esneklik Yöntemi ile birlikte deneysel olarak elde edilen hasar tespit grafikleri Şekil 2.67'de görölmektedir. Şekil 2.67'de göröldüğu gibi, hasarın olduğu bölgede esneklik değışim grafiğinin eğiminin değıştiği, bu bölgede bir hasarın meydana geldiği ve hasarın şiddeti arttıkça esneklik değışiminin de arttđı görölmektedir.

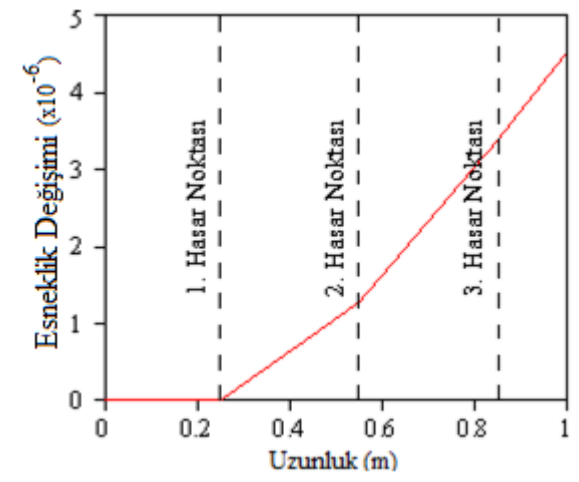
Şekil 2.68, analitik ve deneysel olarak elde edilen esneklik değışim grafiklerini göstermektedir. Deneysel olarak 6 düğüm noktası olduğu için analitik olarak da 6 düğüm noktası dikkate alınmıştır. Şekil 2.68 incelendiğinde, Hasar 1 durumunda, analitik ve deneysel olarak 1. hasar noktasının yeri tespit edilirken, deneysel modelde mesnet noktasındaki değışiminden dolayı bu bölgede bir problem olduğu anlaşılmaktadır. Hasar 2 durumunda her iki yöntemle hasar bölgelerinin yeri tespit edilebilmektedir. Hasar 3 durumunda, 1. ve 2. hasar noktaları belirlenebilirken 3. hasar noktasındaki yer tam olarak belirlenememektedir. Hasar 4 durumunda, hasarın şiddeti arttđı zaman analitik olarak bölgeler tespit edilebilirken, deneysel olarak tam tespit edilememektedir. Hasar 5 ve Hasar 6 durumlarında, mesnet bölgesine doğru hasar şiddeti arttđı zaman mesnete yakın bölgelerde hasarı tespit edilebildiği fakat mesnetten uzak olan 3. hasar noktasını tam olarak belirlenemediği görölmektedir. Buradan, kutu kesitli konsol kiriş modelinde Modal Esneklik Yöntemi kullanılarak mesnetten uzaktaki hasarların yerinin tespit edilmesinin zor olduğu anlaşılmaktadır.



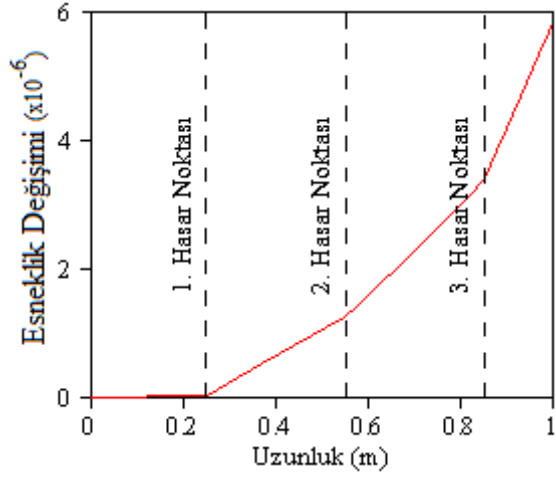
a) Hasar 1



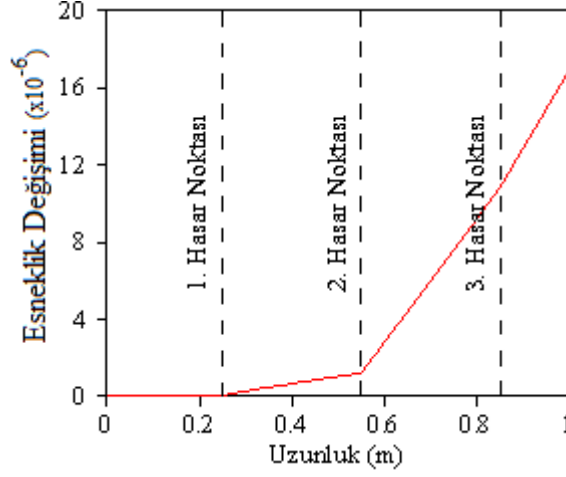
b) Hasar 2



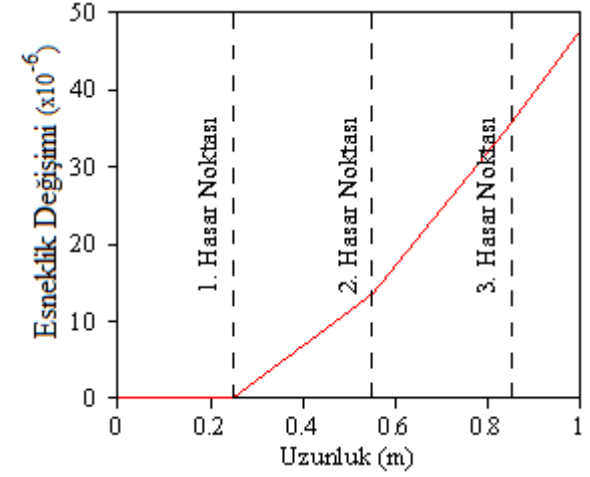
c) Hasar 3



d) Hasar 4

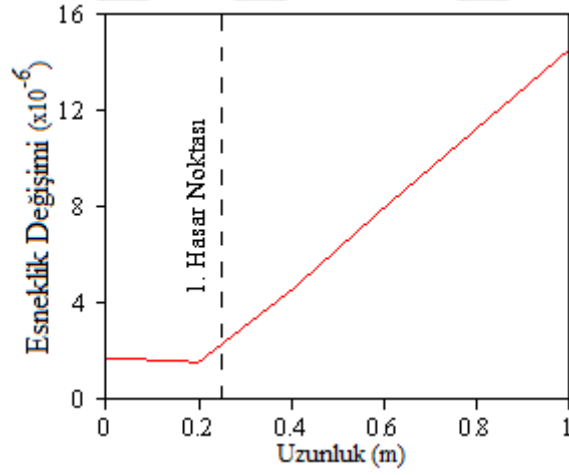


e) Hasar 5

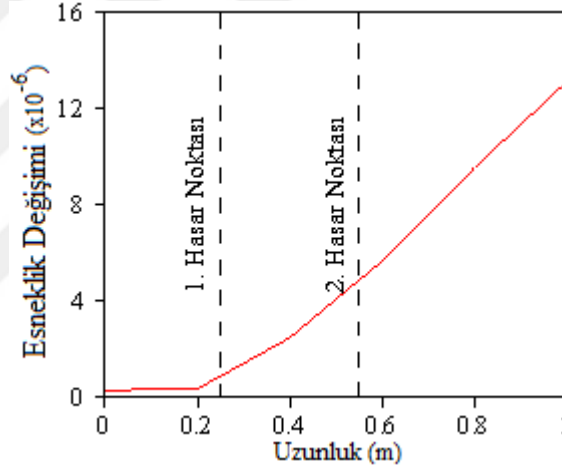


f) Hasar 6

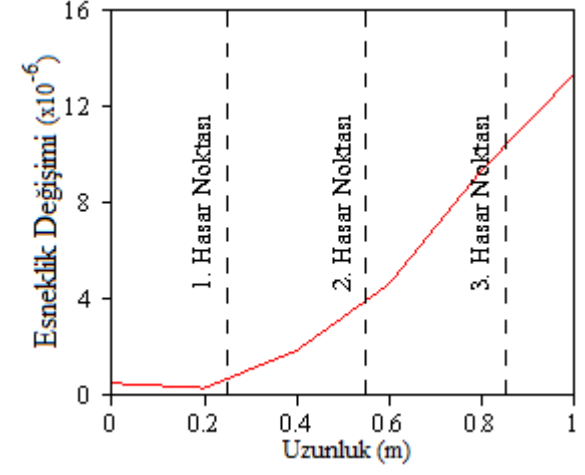
Şekil 2.66. Modal Esneklik Yöntemi kullanılarak analitik çözüme dayalı elde edilen hasar tespit grafikleri



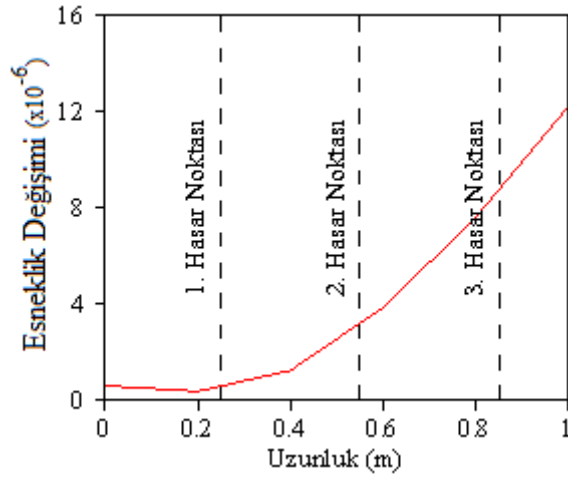
a) Hasar 1



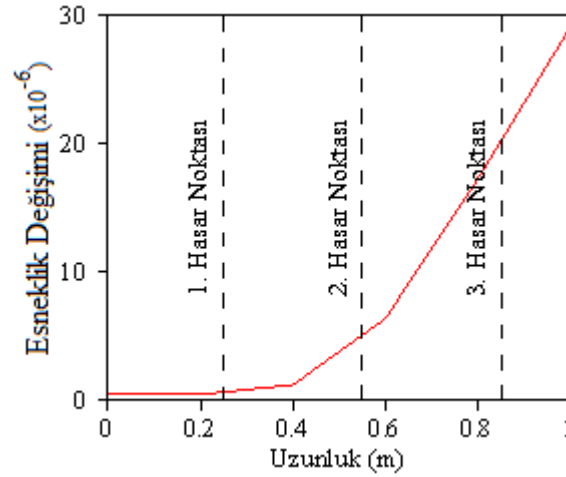
b) Hasar 2



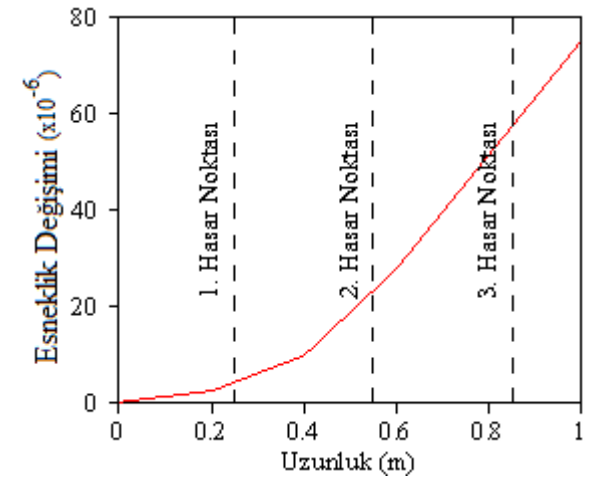
c) Hasar 3



d) Hasar 4

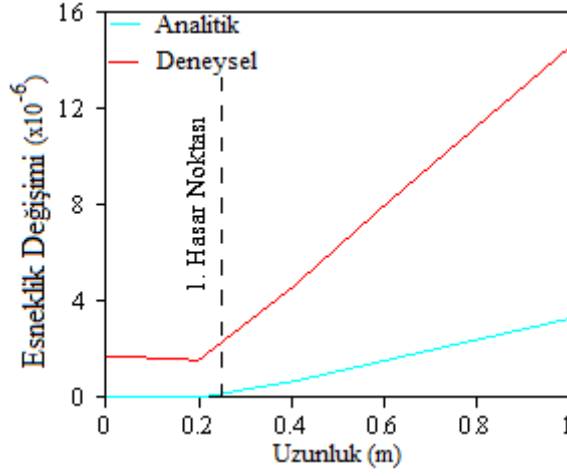


e) Hasar 5

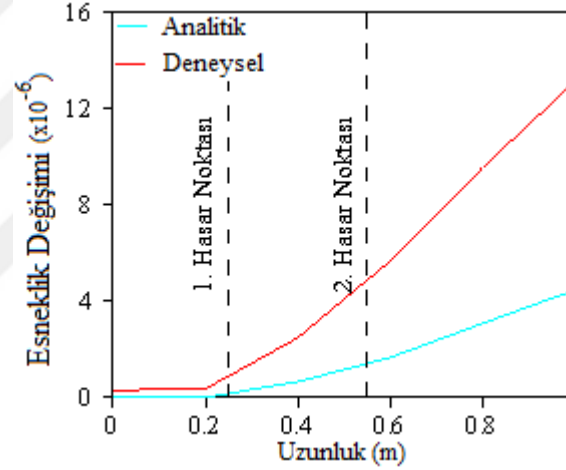


f) Hasar 6

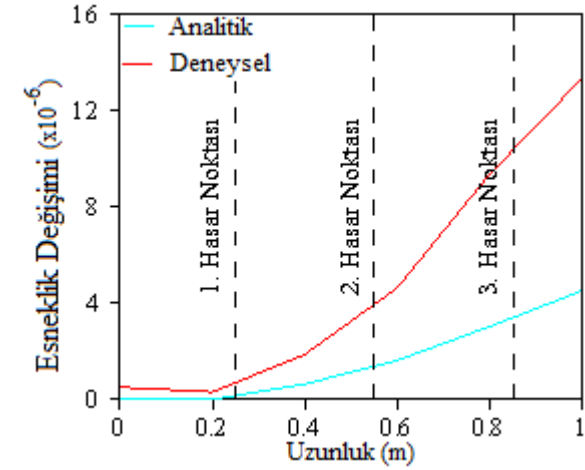
Şekil 2.67. Modal Esneklik Yöntemi kullanılarak deneysel çözüme dayalı elde edilen hasar tespit grafikleri



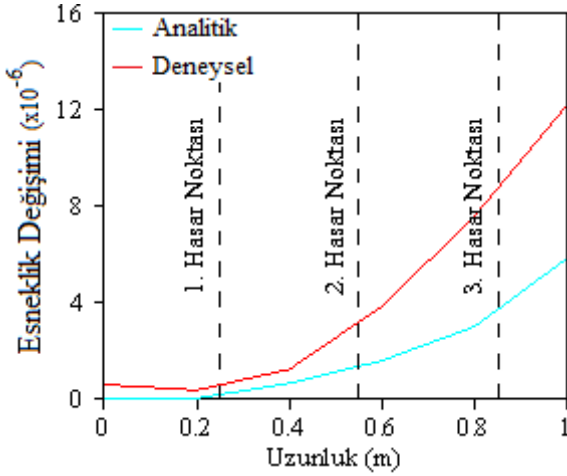
a) Hasar 1



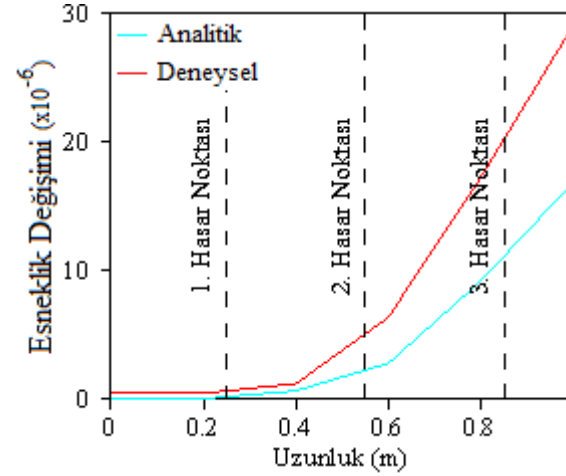
b) Hasar 2



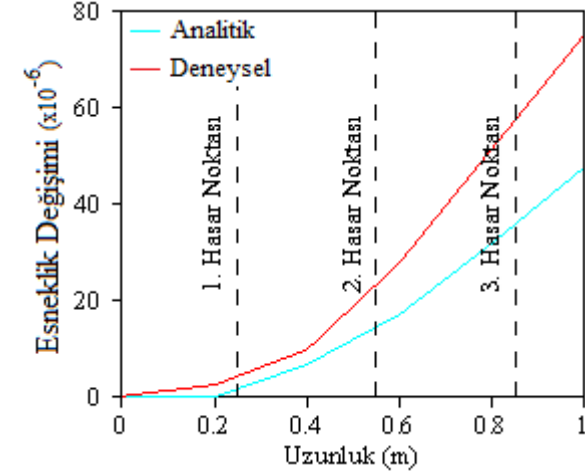
c) Hasar 3



d) Hasar 4



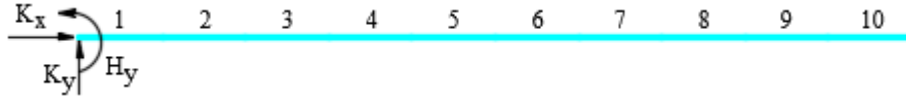
e) Hasar 5



f) Hasar 6

Şekil 2.68. Modal Esneklik Yöntemi kullanılarak analitik ve deneysel çözüme dayalı elde edilen hasar tespit grafikleri

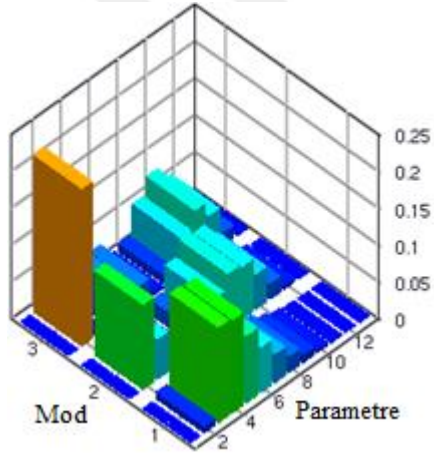
Konsol kiriş modelinde, son olarak Duyarlılığa Bağlı Model Güncelleme Yöntemi ile hasar tespiti yapılması amaçlanmıştır. FEMtools programında model 10 parçaya bölünmüştür. Ankastre şartını sağlamak amacıyla mesnet noktasında yay eleman tanımlanmıştır. Kutu kesitli çelik konsol kiriş modeline ait eleman isimleri Şekil 2.69'da gösterilmiştir.



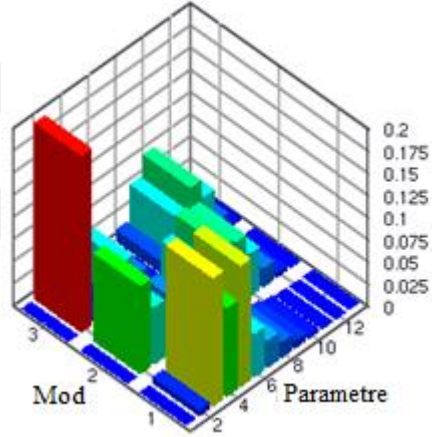
Şekil 2.69. Kutu kesitli çelik konsol kiriş modeline ait eleman isimleri

Modele ait başlangıç malzeme özellikleri için Tablo 2.8'de belirtilen parametreler kullanılmış olup, hasarsız duruma ait yay sabitleri deneysel ölçüm verilerine göre güncellenmiştir. Model güncellemesi için seçilen belirsiz parametreler, her bir elemanın atalet momenti değerleri ile ankastre mesnet noktasında tanımlanan yay sabitleri olmak üzere toplam 13 tanedir. Farklı hasar durumları için bu parametreler üzerinden parametrelerin etkinliğini göstermek amacıyla Duyarlılık Analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.70'te konsol kiriş modeline ait Duyarlılık Analizi sonuçları gösterilmektedir. İlk üç parametre K_x, K_y, H_y olmak üzere yay sabitlerini, geri kalan numaralar ise her elemanın atalet momentinin etkinliğini göstermektedir.

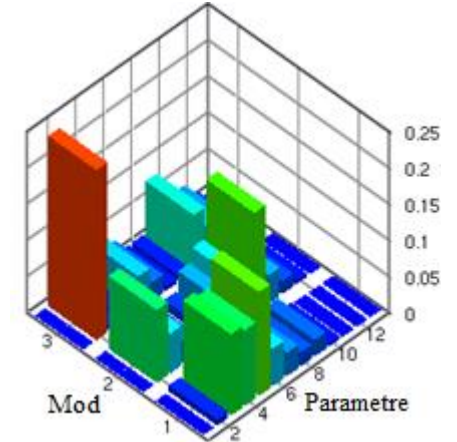
Duyarlılık Analizi sonuçları kullanılarak Parametrik Tahmin Yöntemi'yle birlikte model güncelleme yapılmıştır. Tablo 2.13'de hasarlı ve hasarsız durumlar için Duyarlılığa Bağlı Model Güncelleme Yöntemi ile elde edilen sonuçlar özetlenmektedir. Tablo 2.13 incelendiğinde, başlangıç sonlu eleman modeli ile deneysel ölçümlerde elde edilen frekans değerleri arasındaki fark %0.10-32.19 arasında olurken, Model Güncelleme Yöntemiyle birlikte %0.00-0.90 seviyelerine kadar azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca, analitik mod şekli ile deneysel mod şekilleri eşleştirilmiş olup, MGK değerleri de karşılaştırılmıştır. MGK değerleri incelendiğinde, güncellenen sonlu eleman modeli kullanılarak elde edilen mod şekillerinin, deneysel mod şekilleriyle uyum içerisinde olduğu tespit edilmiştir.



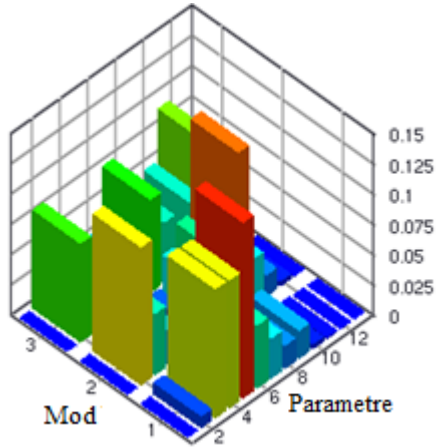
a) Hasar 1



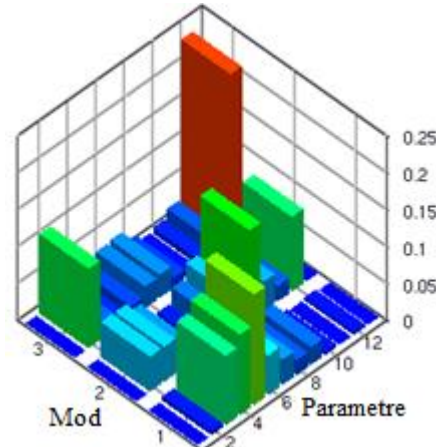
b) Hasar 2



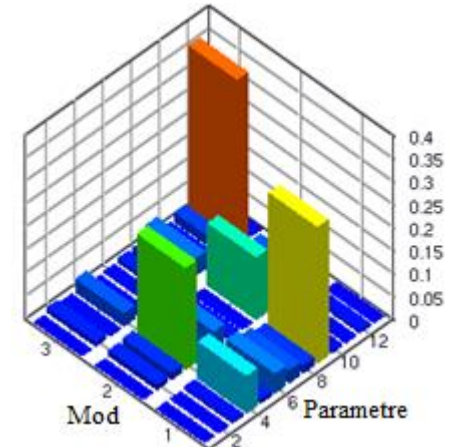
c) Hasar 3



e) Hasar 4



f) Hasar 5

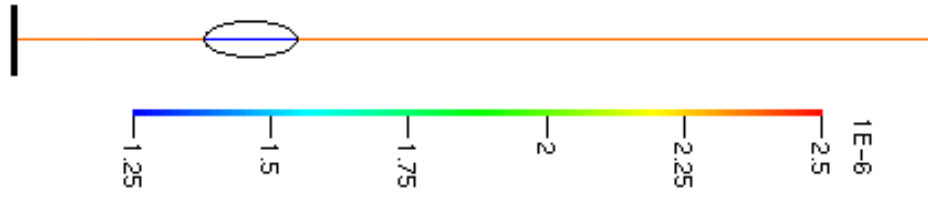


g) Hasar 6

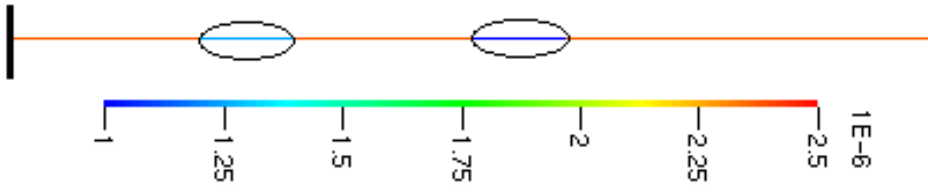
Şekil 2.70. Kutu kesitli çelik konsol modelinde farklı hasar durumları ait Duyarlılık Analizi sonuçları

Tablo 2.13. Hasarsız ve farklı hasar durumları için model güncelleme ile elde edilen frekans değerleri

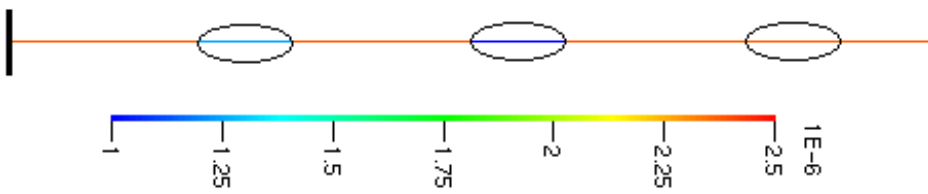
Mod Numarası	SEM	Fark (%)	Deneysel		Fark (%)	Güncel SEM	MGK
			GFTAA	SAB			
Hasarsız							
1	110,94	14,73	96,69	95,95	-0,32	96,36	0,96
2	612	11,15	551,3	551,8	0,77	555,58	0,95
3	1483,50	11,54	1330	1330	-0,4	1324,94	0,97
Hasar 1							
1	96,36	12,62	85,56	86,3	0,01	85,51	0,96
2	555,58	1,35	548,2	546,8	-0,06	547,91	0,94
3	1324,94	0,97	1312	1139	0,03	1312,62	0,95
Hasar 2							
1	85,51	-2,31	87,62	87,06	-0,01	87,52	0,96
2	547,91	9,73	499,3	507,1	0,02	499,43	0,94
3	1312,62	10,26	1190	1265	-0,02	1190,22	0,94
Hasar 3							
1	87,52	-0,64	88,15	86,55	-0,05	88,03	0,93
2	499,43	0,93	494,8	494,7	0,04	495,02	0,95
3	1190,22	0,65	1183	1187	0,00	1182,52	0,90
Hasar 4							
1	88,03	-1,71	89,58	88,34	-0,08	89,50	0,94
2	495,02	2,02	485,2	485,2	-0,90	480,87	0,95
3	1182,52	16,28	1017	1017	0,05	1017,17	0,95
Hasar 5							
1	89,50	8,31	82,74	83,48	0,04	82,67	0,91
2	480,87	32,19	363,8	366,8	-0,09	363,44	0,94
3	1017,17	2,48	992,5	994,5	0,01	992,59	0,97
Hasar 6							
1	82,67	25,13	66,08	64,12	-0,23	65,92	0,92
2	363,44	-0,10	363,80	364,90	-0,06	363,56	0,95
3	992,59	-0,32	995,80	995,70	-0,63	989,49	0,94



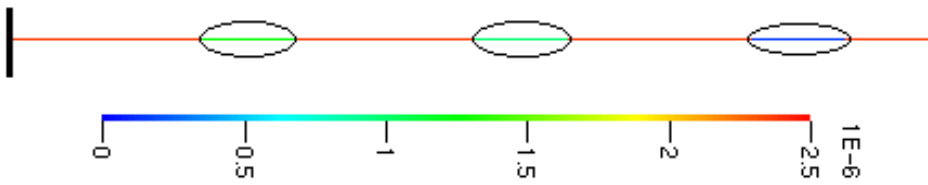
a) Hasar 1



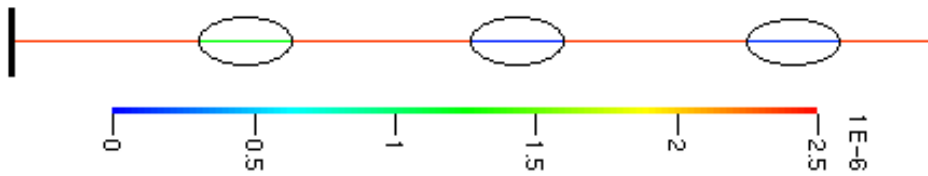
b) Hasar 2



c) Hasar 3



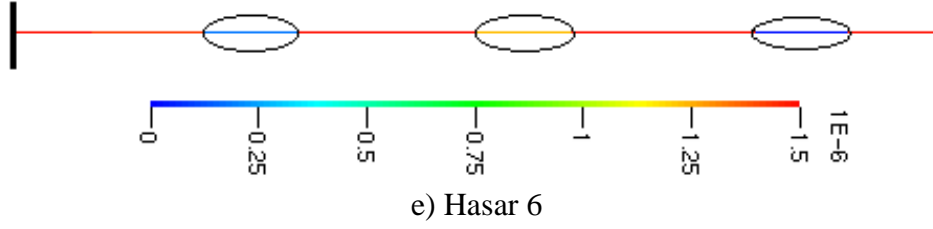
d) Hasar 4



e) Hasar 5

Şekil 2.71. Farklı hasar durumları için konsol kiriş modeline ait atalet momentindeki değişimleri

Şekil 2.71'in devamı



Tablo 2.14. Sonlu eleman model güncellemesine ait parametre değişimleri

Parametre Numarası	Eleman	Başlangıç	Hasar					
			1	2	3	4	5	6
Sınır Koşulları ($\times 10^8$ N/m)								
1	Kx	1000	1000	30,773	30,773	30,773	30,584	30,584
2	Kz	1000	1,645	1,364	1,218	1,218	1,218	1,218
3	Ry	1000	0,039	0,039	0,039	0,039	0,039	0,016
Atalet Momenti ($\times 10^{-6}$ m ⁴)								
4	1	2,363	2,363	2,363	2,363	2,363	2,363	2,363
5	2	2,363	2,363	2,363	2,363	2,363	2,363	2,363
6	3	2,363	1,243	1,243	1,243	1,243	1,243	0,167
7	4	2,363	2,363	2,363	2,363	2,363	2,363	2,363
8	5	2,363	2,363	2,363	2,363	2,363	2,363	2,363
9	6	2,363	2,363	0,980	0,980	0,980	0,791	0,791
10	7	2,363	2,363	2,363	2,363	2,363	2,363	2,363
11	8	2,363	2,363	2,363	2,363	2,363	2,363	2,363
12	9	2,363	2,363	2,363	2,356	0,141	0,141	0,141
13	10	2,363	2,363	2,363	2,363	2,363	2,363	2,363

Şekil 2.71, farklı hasar durumlarındaki konsol kiriş modeline ait sonlu eleman model güncelleme işleminin sonucunda elde edilen hasarın yerini ve atalet momentindeki değişimleri göstermektedir. Konsol kiriş modelinde hasarlı durum için gerçekleştirilen değerlendirmeler sonucunda, kesit atalet momentlerindeki değişimlerin en fazla olduğu elemanlar belirlenmiştir. Bu durum gerçek hasar durumuyla karşılaştırıldığında, kullanılan yöntem ile konsol kiriş modelindeki hasar yerinin gerçekçi bir şekilde belirlenebildiği görülmektedir.

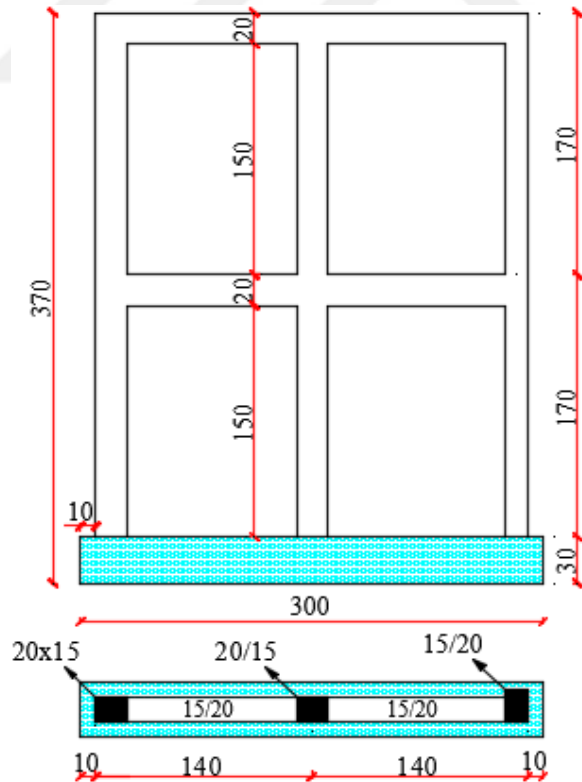
Tablo 2.14, hasarsız ve farklı hasar durumlarındaki konsol kiriş modeline ait parametre değişim değerlerini göstermektedir. Tablo 2.14 incelendiğinde, sınır koşullarının hasar durumlarıyla birlikte değiştiği görülmüştür. Bu durum laboratuvar ortamında konsol

modele hasar verilirken mesnet bölgesinin etkilenmesinden kaynaklanmış olabilir.. Ayrıca, her bir elemanda hasar bölgesindeki atalet momenti değişimleri incelendiğinde, hasarın olduğu noktadaki elemanda atalet momentindeki değerlerin azaldığı görülmektedir.

2.2.3. Betonarme Taşıyıcı Sisteme Sahip Düzlem Çerçeve Modeli

2.2.3.1. Modelin Özellikleri

Betonarme taşıyıcı sisteme sahip düzlem çerçeve modeli, kolonları ve kirişleri 15×20 cm olacak şekilde laboratuvar ortamında inşa edilmiştir. Kolonlar arasındaki mesafe 140 cm'dir. İki kat şeklinde inşa edilen çerçeve sistemin kat yüksekliği 170 cm'dir. Ankastre şartının sağlanabilmesi için, çerçeve sisteminin alt kısmına 30 cm kalınlığında betonarme temel inşa edilmiştir. Betonarme taşıyıcı sisteme sahip düzlem çerçeve modeline ait görünüş detayları Şekil 2.72'de verilmektedir.



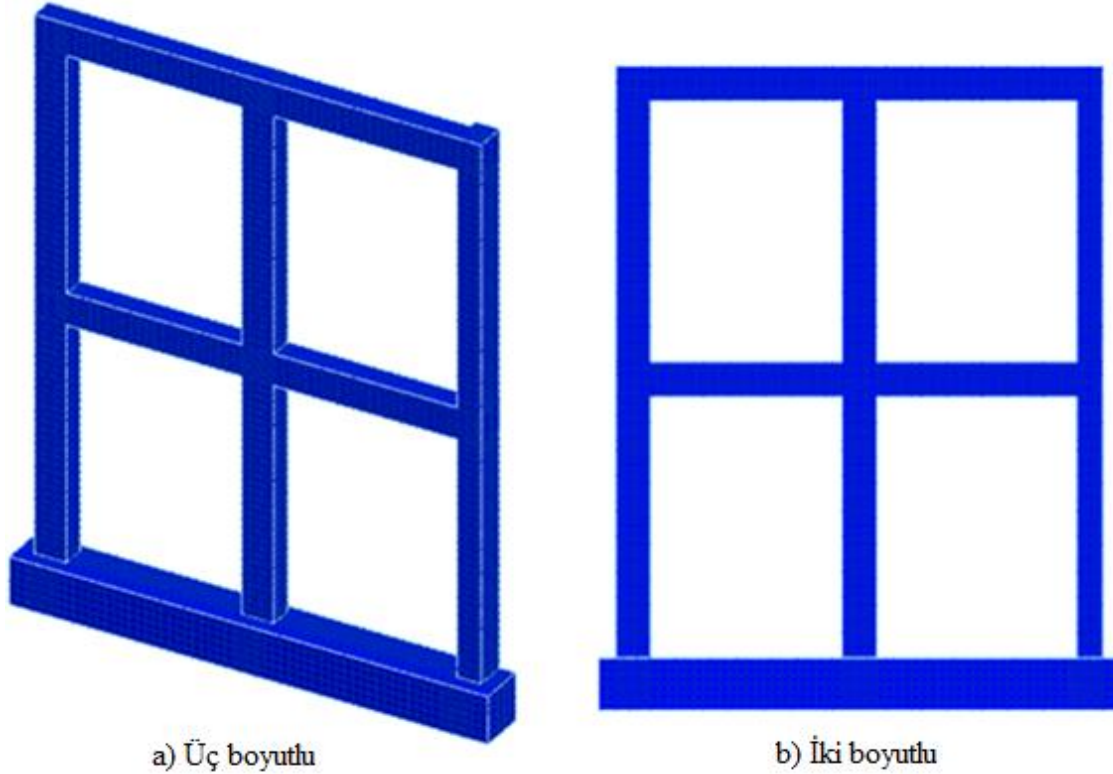
Şekil 2.72. Betonarme çerçeve sistemine ait kesit detayları (birimler cm cinsindedir.)

2.2.3.2. Sonlu Eleman Yöntemiyle Dinamik Karakteristiklerin Elde Edilmesi

Betonarme düzlem çerçeve sisteminin sonlu eleman modeli, ANSYS programında oluşturulmuş, dinamik karakteristiklerin belirlenmesi amacıyla ilgili model FEMtools programına aktarılarak modal analizler sonucunda frekans ve mod şekilleri elde edilmiştir. Betonarme düzlem çerçeve sistemi için oluşturulan sonlu eleman modeline ait bazı görünüşler Şekil 2.73’de gösterilmektedir. Modelin laboratuvar ortamında inşası sırasında C16 beton dayanım sınıfı kullanılmıştır. Başlangıç model için dikkate alınan C16 beton dayanım sınıfına ait malzeme özellikleri Tablo 2.15’de verilmektedir.

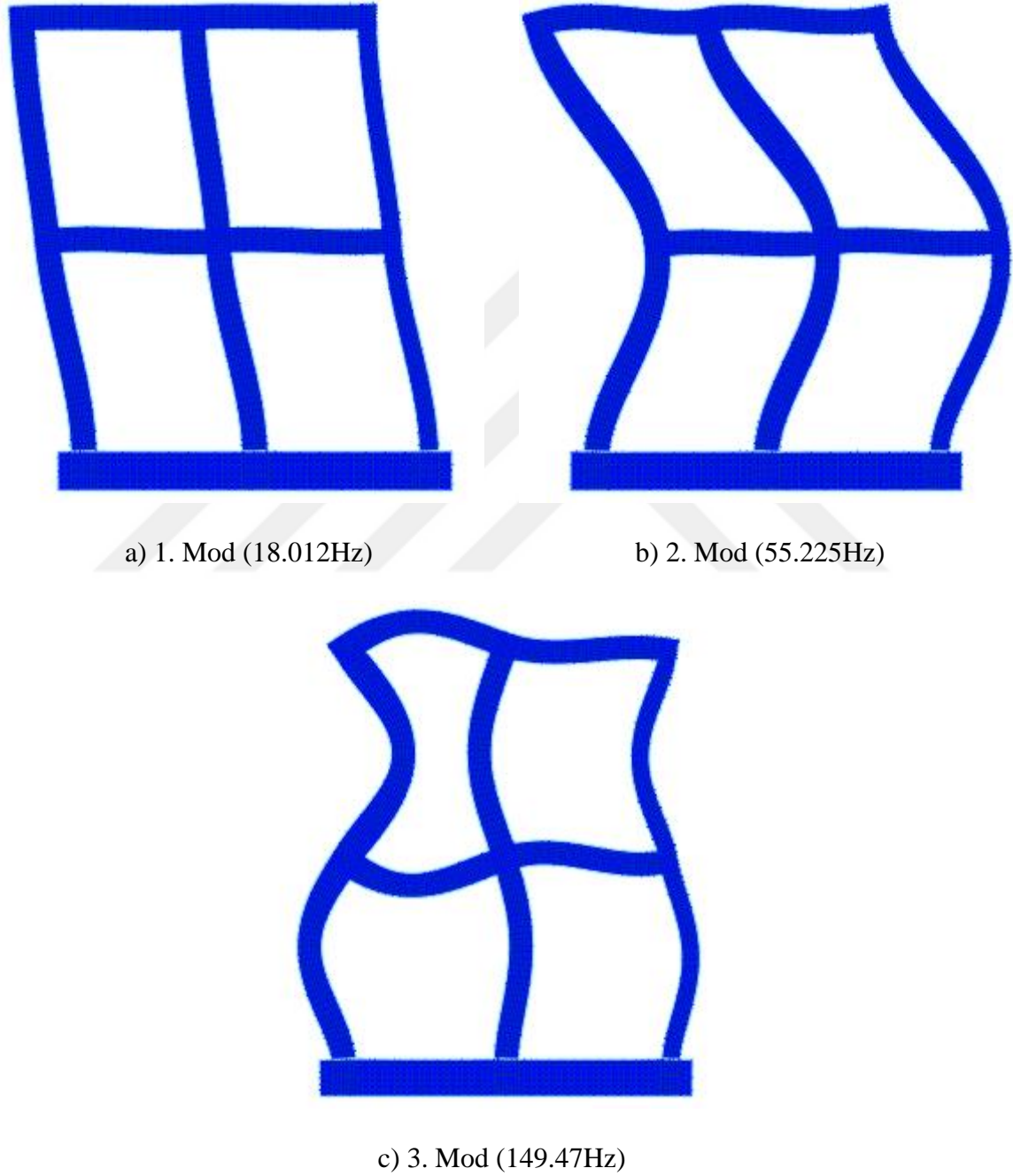
Tablo 2.15. Betonarme çerçeve sistemine ait malzeme özellikleri

Malzeme Özellikleri	Değerler
Elastisite Modülü (N/m^2)	$2,7 \times 10^{10}$
Birim Kütle (kg/m^3)	2400
Poisson Oranı (-)	0,2



Şekil 2.73. Betonarme düzlem çerçeve sistemine ait iki ve üç boyutlu sonlu eleman modeli görünüşleri

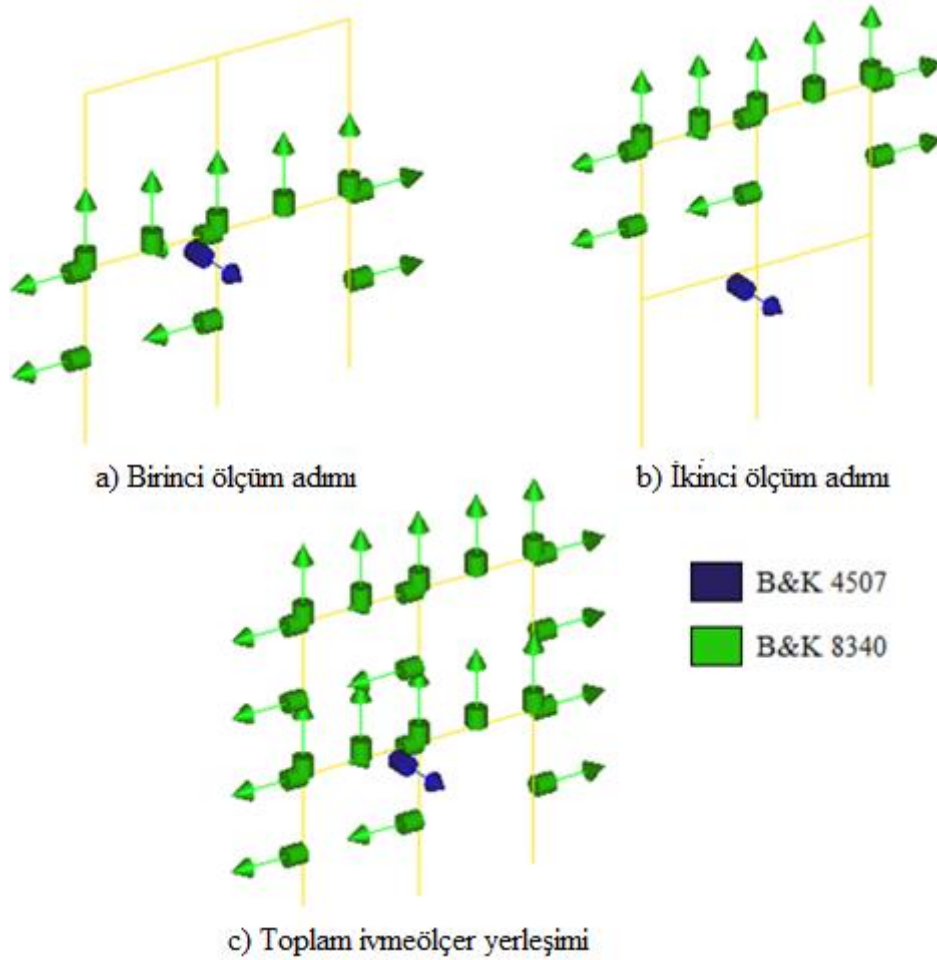
Başlangıç modele ait malzeme özellikleri belirlendikten sonra FEMtools programı kullanılarak modal analiz yapılmıştır. Analiz sonucunda elde edilen frekans değerleri ile ilgili mod şekilleri Şekil 2.74’de gösterilmektedir. Şekil 2.74’den de görüldüğü gibi, ilk üç frekans değeri sırasıyla 18.012Hz, 55.225Hz ve 149.47Hz olarak elde edilmiştir.



Şekil 2.74. Sonlu eleman analizleri sonucunda elde edilen ilk üç frekans değeri ve mod şekilleri

2.2.3.3. Deneysel Modal Analiz Yöntemiyle Dinamik Karakteristiklerin Elde Edilmesi

Betonarme düzlem çerçeve sisteminin hasarsız ve hasarlı durumlarına ait dinamik karakteristiklerini deneysel olarak belirlenmek amacıyla 11 adet B&K 8340 tipi tek eksenli ivmeölçer, B&K 3560 tipi 17 kanallı veri toplama ünitesi, B&K 8210 tipi darbe çekici, OMA ve PULSE yazılımları kullanılmış olup, çevresel titreşimler altında deneysel ölçümler gerçekleştirilmiştir. Sonlu eleman analizleriyle elde edilen mod şekilleri dikkate alınarak ivmeölçerlerin yerleri belirlenmiştir. Deneysel ölçümler sırasında daha hassas sonuçlar elde etmek amacıyla referanslı ölçüm gerçekleştirilmiş olup, ölçümlerde toplam 22 adet ivmeölçer noktası kullanılmıştır. 1 adet B&K 4507 tipi tek eksenli ivmeölçer referans ivmeölçer olarak kullanılmış ve ölçümler sırasında bunun yeri sabit tutulmuştur. İvmeölçerlere ait yerleşim planı Şekil 2.75'te gösterilmektedir.

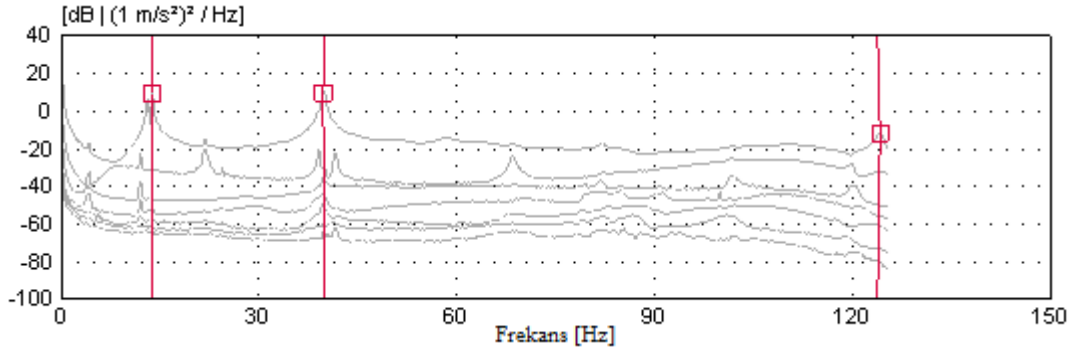


Şekil 2.75. Betonarme düzlem çerçeve modeli için gerçekleştirilen deneysel ölçümlere ait ivmeölçer yerleşim planı

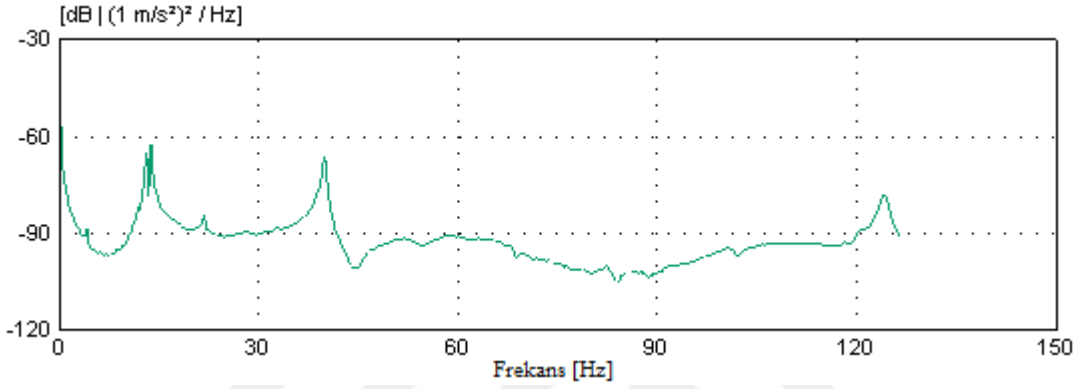
Şekil 2.75'den de görüldüğü gibi önce birinci kattan ölçümler alınmış, daha sonra referans ivmeölçer sabit tutularak diğer 11 ivmeölçer ikinci kata taşınarak tekrar ölçüm alınmıştır. Çevresel titreşim testlerinde ölçüm aralığı 0-200 Hz, ölçüm süresi ise her bir kat için 10 dakika olmak üzere toplam 20 dakikadır. Ölçümler sırasında elde edilen bazı fotoğraflar Şekil 2.76'da gösterilmektedir. Her bir kat için toplanan titreşim sinyalleri PULSE yazılımı yardımıyla işlendikten sonra OMA yazılımına aktarılmıştır. Hasarsız durum için GFTAA yöntemine göre elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri ve bu matrislerin ortalamaları ile SAB yöntemi kullanılarak elde edilen kararlılık diyagramları Şekil 2.77'de verilmektedir.



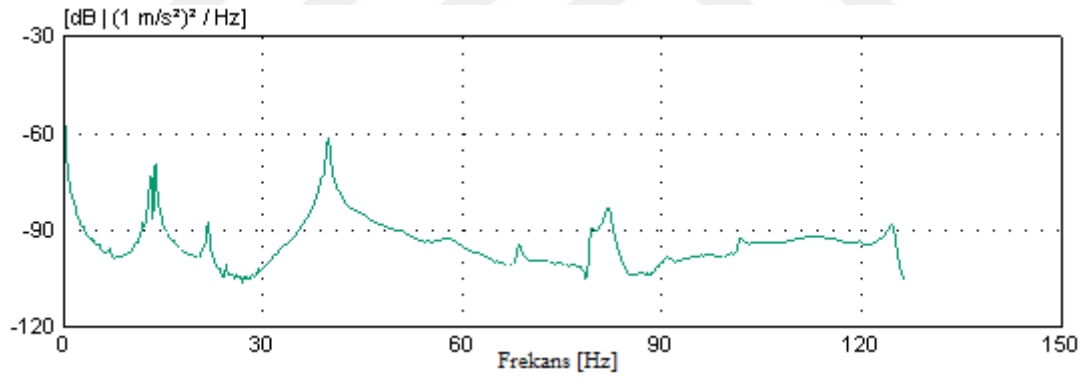
Şekil 2.76. Betonarme düzlem çerçeve sistemi üzerinde gerçekleştirilen deneysel ölçümlere ait bazı fotoğraflar



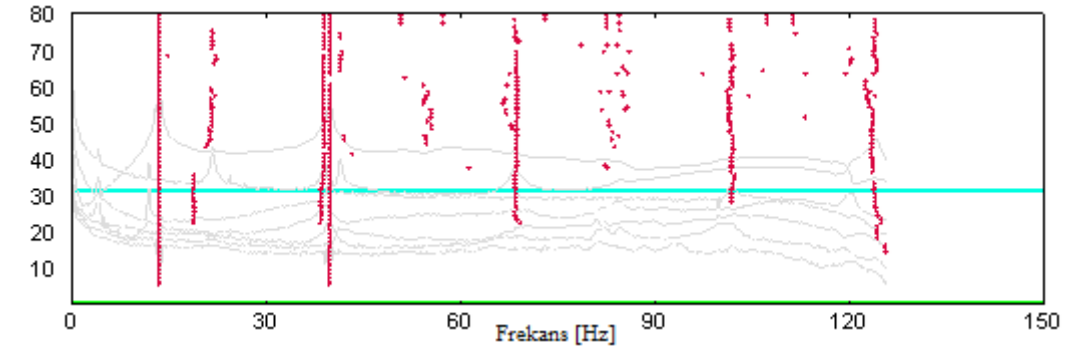
a) Spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri



b) 1. Kat için elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin ortalaması



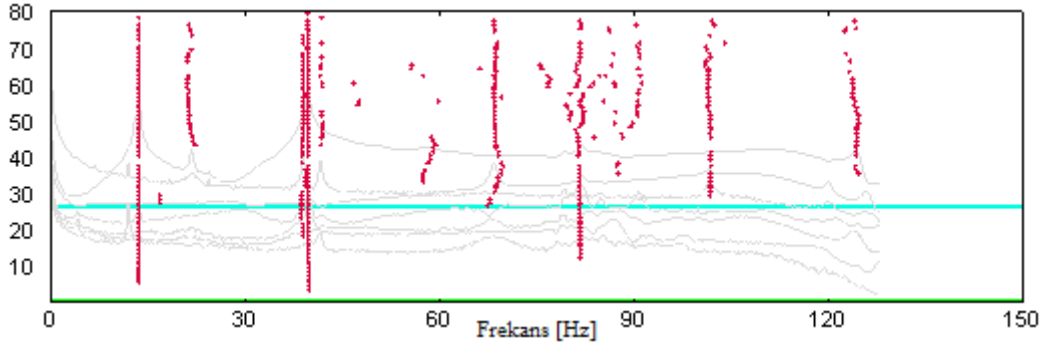
c) 2. Kat için elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin ortalaması



d) 1. Kat için elde edilen kararlılık diyagramı

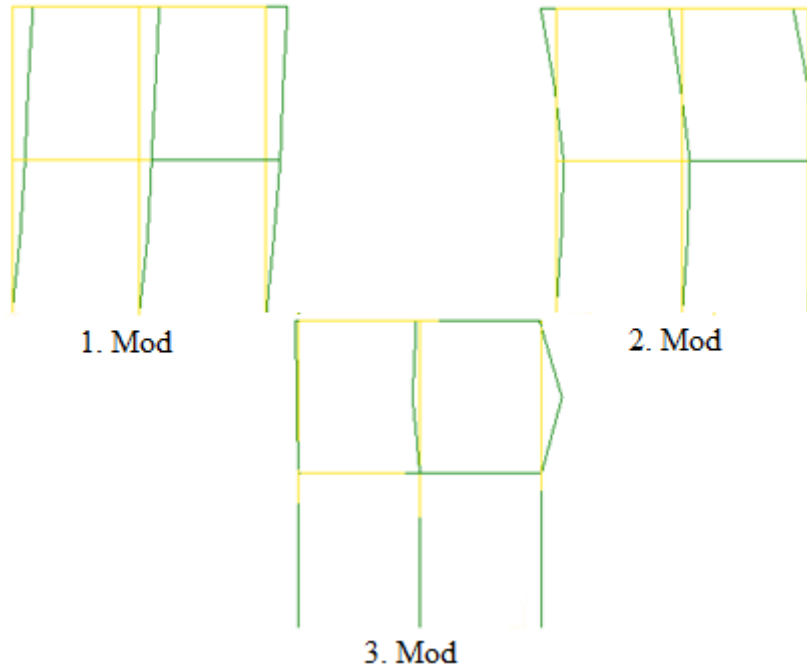
Şekil 2.77. Betonarme çerçeve sistemine ait hasarsız durum için elde edilen spektral yoğunluk matrisleri ve kararlılık diyagramları

Şekil 2.77'nin devamı



e) 2.Kat için elde edilen kararlılık diyagramı

Betonarme çerçeve sisteminde hasarsız duruma ait gerçekleştirilen ölçümler sonucunda elde edilen ilk üç mod şekli Şekil 2.78'de gösterilmektedir. GFTAA ve SAB yöntemlerinden elde edilen frekans değerleri Tablo 2.16'da özetlenmektedir. Tablo 2.16 detaylı olarak incelendiğinde, hasarsız durum için ilk üç doğal frekans değerleri GFTAA yöntemine göre 13,898-123,84Hz ve SAB yöntemine göre ise 13,69-124,7Hz arasında elde edilmiştir.

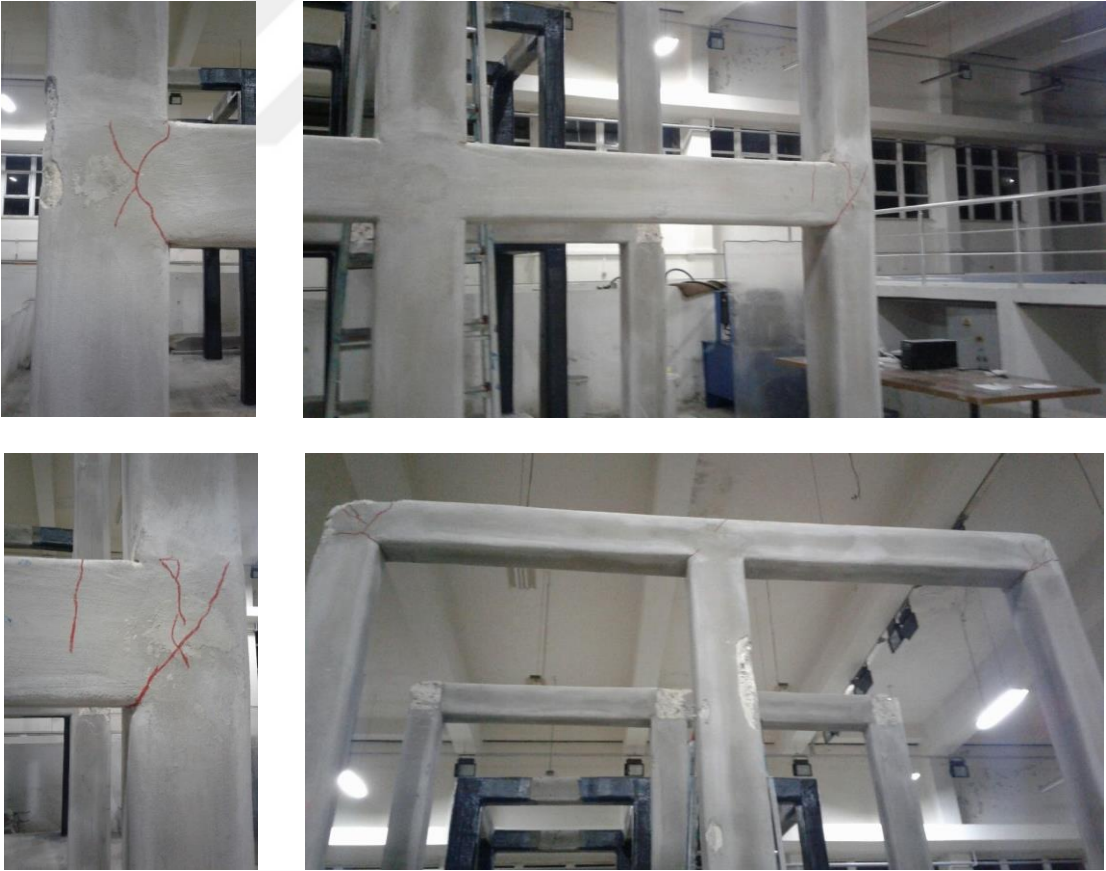


Şekil 2.78. Betonarme düzlem çerçeve sisteminin hasarsız duruma ait elde edilen ilk üç mod şekli

Tablo 2.16. Betonarme düzlem çerçeve sisteminin hasarsız durumuna ait GFTAA ve SAB yöntemleriyle elde edilen frekans değerleri

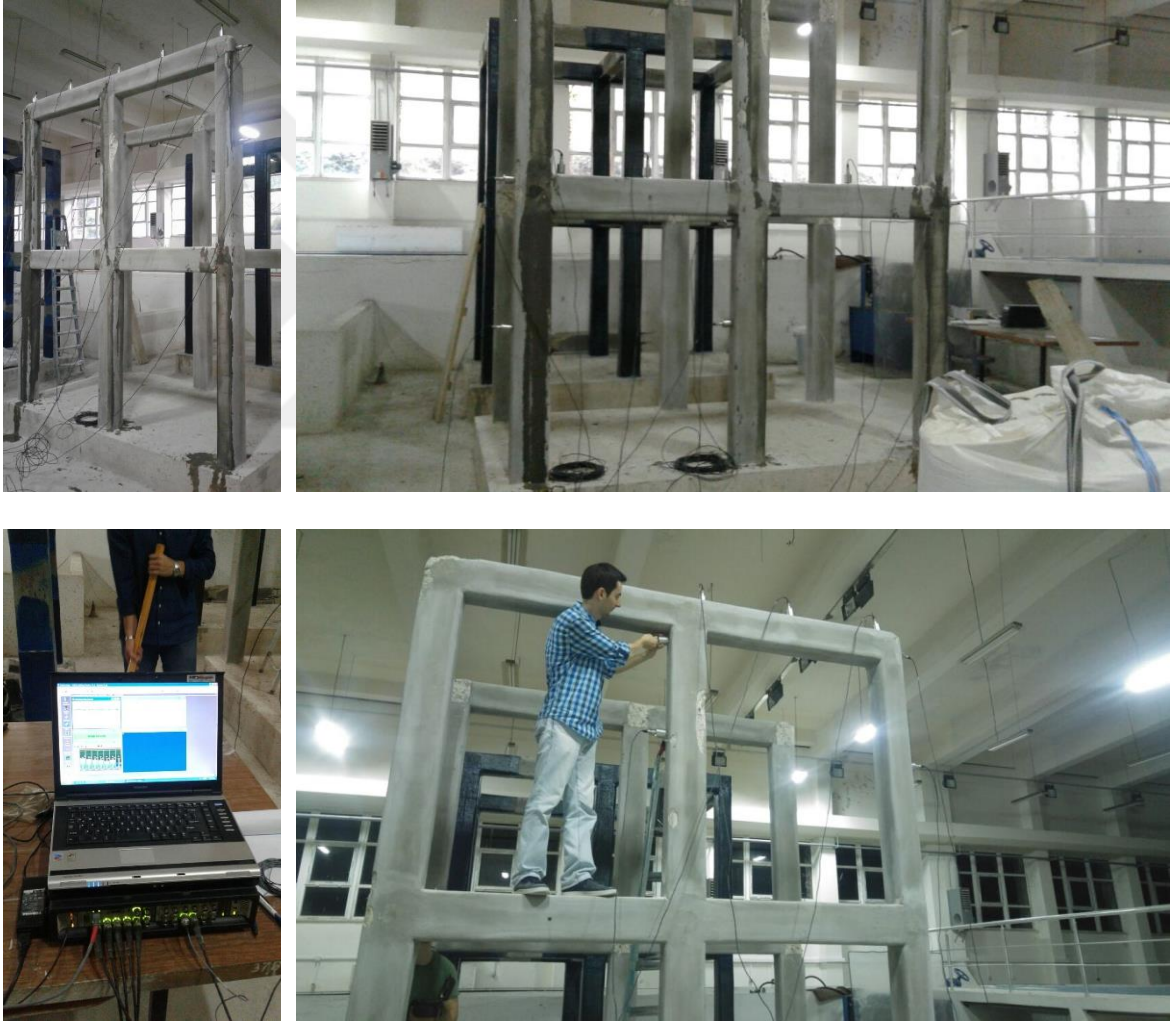
Mod Numarası	Frekans (Hz)		
	GFTAA	Fark (%)	SAB
1	13,898	1,49	13,69
2	39,907	0,06	39,93
3	123,84	0,69	124,7

Hasarsız duruma ait deneysel ölçümler gerçekleştirilip dinamik karakteristikler elde edildikten sonra modele darbe yükü etkisiyle hasar verilmiştir. Darbe etkisinin uygulanması sırasında düğüm noktalarının zorlanması ve hasar görmesi amaçlanmıştır. Şekil 2.79’da betonarme düzlem çerçeve sisteminin hasar sonrasına ait elde edilen bazı görüşler verilmektedir. Gözle tespit edilen hasarlar işaretlenerek daha da belirgin hale getirilmiştir.

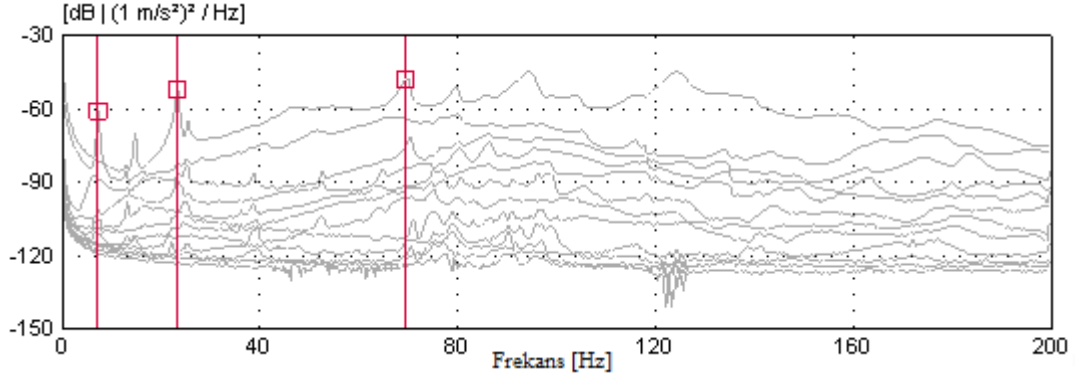


Şekil 2.79. Hasarlı durumdaki betonarme düzlem çerçeve sisteme ait elde edilen bazı görüşler

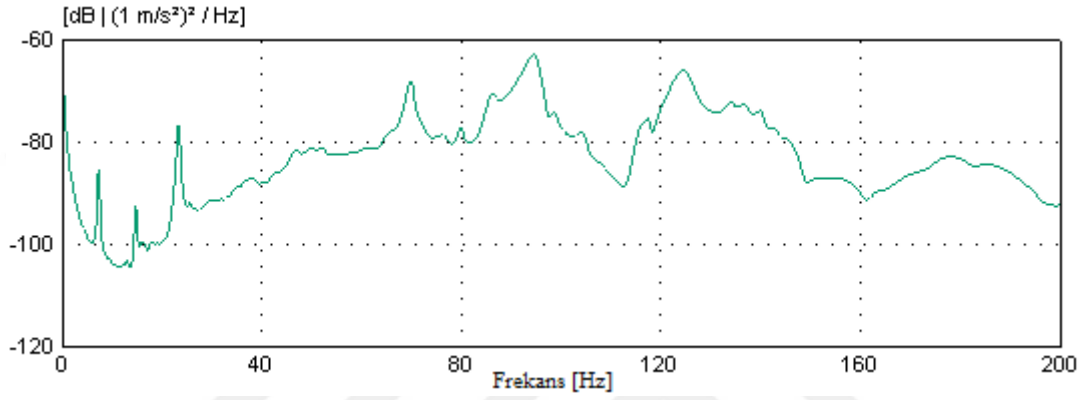
Hasarlı durum için aynı deneysel ölçümler tekrarlanmıştır. Hasarlı duruma ait çevresel titreşim testlerinde ölçüm aralığı 0-200 Hz ve ölçüm süresi her kat için 10 dakika olmak üzere toplam 20 dakikadır. Hasarlı duruma ait çevresel titreşim testleri sırasında elde edilen görüntüler Şekil 2.80’de verilmektedir. Her bir kat için toplanan titreşim sinyalleri PULSE yazılımı yardımıyla işlendikten sonra OMA yazılımına aktarılmıştır. GFTAA yöntemine göre elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri ve bu matrislerin ortalamaları ile SAB yöntemine göre elde edilen kararlılık diyagramları Şekil 2.81’de gösterilmektedir.



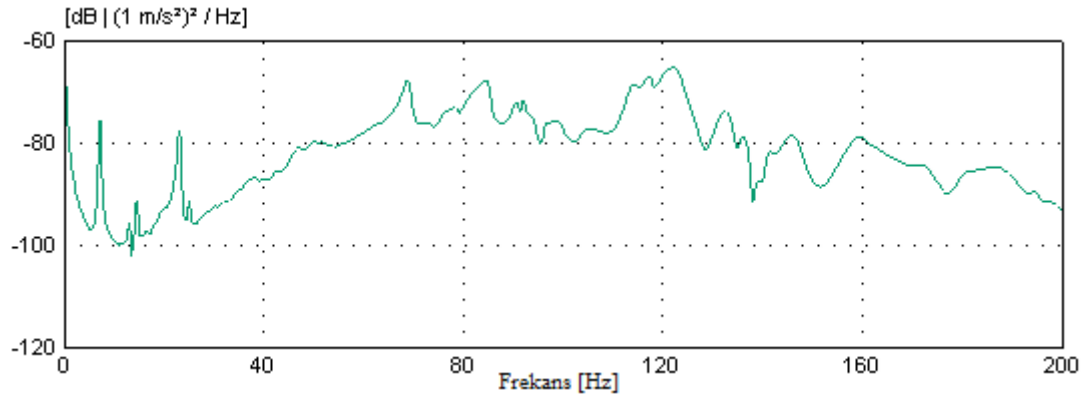
Şekil 2.80. Betonarme düzlem çerçeve sistemi üzerinde hasarlı durum için gerçekleştirilen deneysel ölçümlere ait bazı fotoğraflar



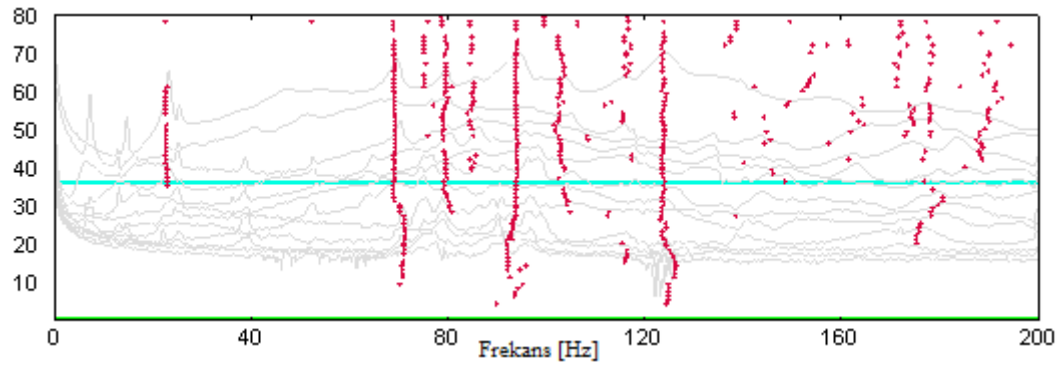
a) Spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri



b) 1. Kat için elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin ortalaması



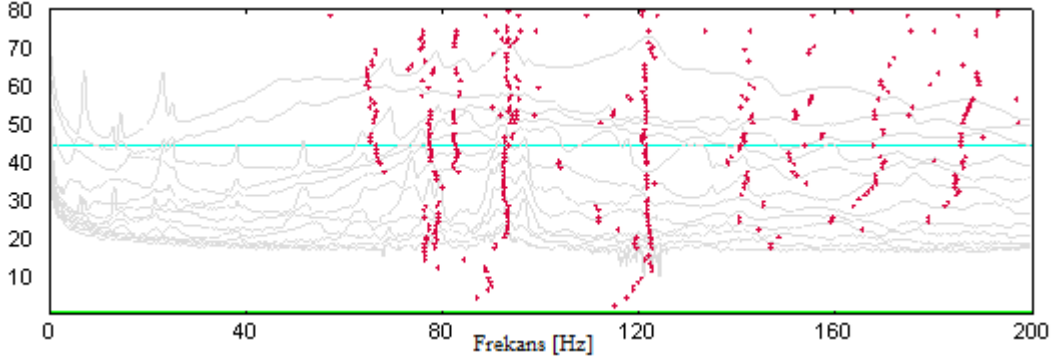
c) 2. Kat için elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin ortalaması



d) 1. Kat için elde edilen kararlılık diyagramı

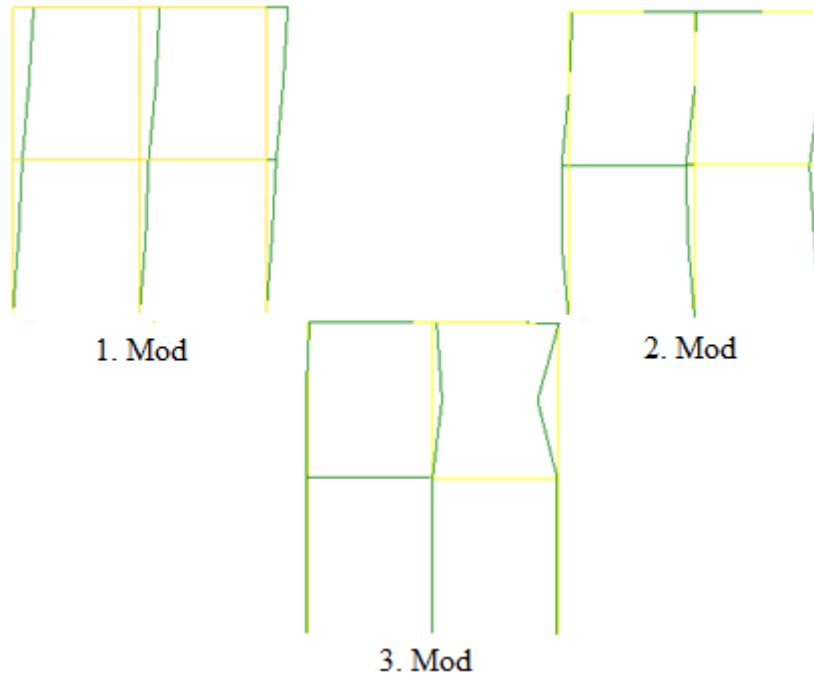
Şekil 2.81. Betonarme düzlem çerçeve sistemi üzerinde hasarlı duruma ait elde edilen spektral yoğunluk matrisleri ve kararlılık diyagramları

Şekil 2.81'in devamı



e) 2. Kat için elde edilen kararlılık diyagramı

Betonarme çerçeve sisteminde hasarlı duruma ait gerçekleştirilen ölçümler sonucunda elde edilen ilk üç mod şekli Şekil 2.82'de gösterilmektedir. GFTAA ve SAB yöntemlerinden elde edilen frekans değerleri Tablo 2.17'da özetlenmektedir. Tablo 2.17 incelendiğinde hasarlı durum için ilk üç doğal frekans değerleri GFTAA yöntemine göre 7,269–69,293 Hz ve SAB yöntemine göre 4,441-62,65 Hz arasında elde edilmiştir.



Şekil 2.82. Betonarme düzlem çerçeve sistemi üzerinde hasarlı duruma ait elde edilen ilk üç mod şekli

Tablo 2.17. Betonarme düzlem çerçeve sisteminin hasarlı durumuna ait GFTAA ve SAB yöntemleriyle elde edilen frekans değerleri

Mod Numarası	Frekans (Hz)		
	GFTAA	Fark (%)	SAB
1	7,269	38,90	4,441
2	23,263	1,28	23,6
3	69,293	9,59	62,65

Tablo 2.18’de betonarme düzlem çerçeve sistemine ait hasarlı ve hasarsız durumlar için deneysel olarak elde edilen frekansların karşılaştırılması gösterilmektedir. Tablo 2.18 incelendiğinde hasarın oluşmasıyla birlikte frekansların azaldığı görülmektedir. Hasarlı ve hasarsız durumlar için GFTAA ve SAB yöntemine göre elde edilen frekans değerleri arasındaki maksimum fark sırasıyla %47,70 ve %65,56 olarak elde edilmiştir.

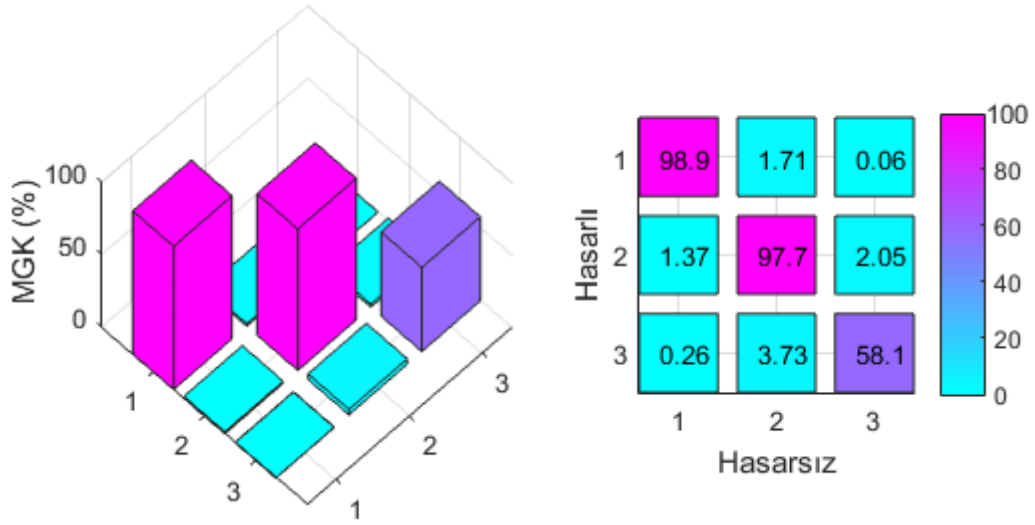
Tablo 2.18. Betonarme düzlem çerçeve sistemine ait hasarlı ve hasarsız durumlar için deneysel olarak elde edilen frekansların karşılaştırılması

Mod Numarası	Frekans (Hz)					
	GFTAA			SAB		
	Hasarsız	Fark (%)	Hasarlı	Hasarsız	Fark (%)	Hasarlı
1	13,898	-47,70	7,269	13,69	-65,56	4,441
2	39,907	-41,71	23,263	39,93	-40,89	23,6
3	123,84	-44,04	69,293	124,7	-49,76	62,65

2.2.3.4. Çevresel Titreşimlere Dayalı Hasar Tespit Yöntemlerinin Uygulanması

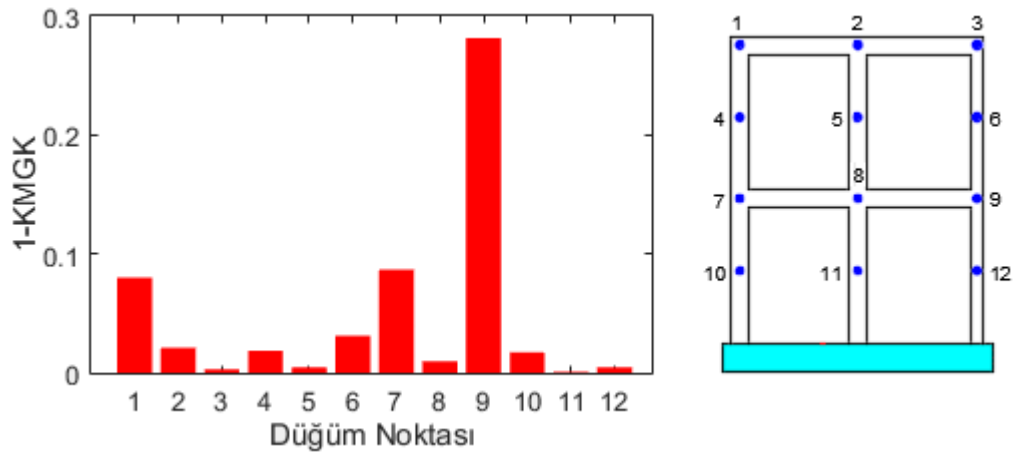
Bu bölüm kapsamında betonarme düzlem çerçeve sisteminin hasarlı ve hasarsız durumlarından elde edilen deneysel veriler kullanılarak Modal Güvence Kriteri, Koordinat Modal Güvence Kriteri ve Duyarlılığa bağlı Model Güncelleme yöntemleri ile hasarın tespit edilmesi amaçlanmıştır.

Betonarme düzlem çerçeve sisteminin hasarsız ve hasarlı durumlar için çevresel titreşim verileri kullanılarak elde edilen modal yerdeğiştirmelerden yararlanılarak oluşturulan MGK grafiği Şekil 2.83’de gösterilmektedir. Şekil 2.83 incelendiğinde, modelin hasarlı olması durumunda ilk iki modun belirgin bir şekilde etkilenmediği fakat üçüncü modlar arasındaki MGK değerinin %58,1 seviyelerinde olduğu görülmektedir. Bu değer, model üzerinde bir hasar durumunun oluştuğu anlamına gelmektedir.



Şekil 2.83. Betonarme düzlem çerçeve sistemi için, hasarsız ve hasarlı durumlar için deneysel olarak elde edilen MGK matrisi

Şekil 2.84, Koordinat Modal Güvence Kriteri yöntemi kullanılarak hasarlı ve hasarsız duruma ait deneysel olarak elde edilen (1-KMGK) değerlerini göstermektedir. Şekil 2.84 incelendiğinde önemli hasarların 1, 7 ve 9 nolu düğüm noktası civarında olabileceği görülmektedir.



Şekil 2.84. Betonarme düzlem çerçeve sisteminde hasarsız ve hasarlı durumlar için deneysel olarak elde edilen (1-KMGK) değerleri

Son olarak, betonarme düzlem çerçeve sistemi üzerinde hasarın yerini ve büyüklüğünü tespit etmek için, Duyarlığa Bağlı Model Güncelleme Yöntemi uygulanmıştır. Model güncelleme, Bütünsel Güncelleme ve Lokal Güncelleme olmak

üzere ikiye ayrılmaktadır. Bütünsel Güncellemede, yapıdaki tüm elemanların tek bir malzeme karakteristiklerinin aynı olduğu düşünülmektedir. Lokal Model Güncellemede ise, her bir elemanın farklı malzeme karakteristiklerine sahip olabileceği dikkate alınmaktadır. Bu kapsamda, model üzerinde önce Bütünsel Güncelleme yapıp elde edilen sonuçlar doğrultusunda Lokal Güncelleme yöntemi uygulanmıştır.

Duyarlılık Analizi yapılmadan önce muhtemel belirsiz parametreler ve bu parametrelere ait alt ve üst sınır değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Betonarme düzlem çerçeve sisteminde frekans ve mod şekillerini etkileyebilecek muhtemel belirsiz parametreler, Elastisite Modülü (E) ve birim hacim ağırlığı (BHA) olarak değerlendirilmiştir. Betonarme düzlem çerçeve sisteminin inşası dikkate alındığında, temel ve birinci katın yapımı aynı anda olmasına rağmen ikinci katın yapımı belirli bir süre sonra gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle Bütünsel Güncelleme sırasında birinci kat kolon ve kirişler ile temelin malzeme özellikleri bir grup, ikinci kat kolon ve kirişlerinin malzeme özellikleri ise başka bir grup olarak dikkate alınmıştır. Tablo 2.19, Bütünsel Güncelleme için seçilen muhtemel belirsiz parametrelerin başlangıç değerleri ile bu değerlere ait alt ve üst limitleri göstermektedir.

Tablo 2.19. Bütünsel Güncelleme için seçilen belirsiz parametreler ve sınır değerleri

Parametre	Eleman	Bütünsel Güncelleme			
		Tipi	Alt Limit (%)	Üst Limit (%)	Başlangıç Değer
1	Birinci Kat Kolon, Kiriş ve Temel	E	-48,1	11,1	$2,7 \times 10^{10} \text{ (N/m}^2\text{)}$
2	İkinci Kat Kolon ve Kiriş	E	-48,1	11,1	$2,7 \times 10^{10} \text{ (N/m}^2\text{)}$
3	Birinci Kat Kolon, Kiriş ve Temel	BHA	-8	2	2400 (kg/m ³)
4	İkinci Kat Kolon, Kiriş	BHA	-8	2	2400 (kg/m ³)

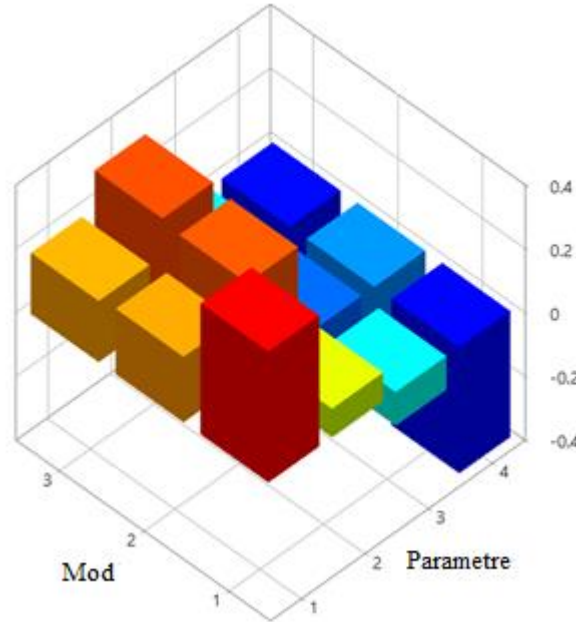
Başlangıç hasarsız model için FEMtools programıyla sayısal olarak elde edilen frekans değerleriyle, çevresel titreşim yöntemi kullanılarak elde edilen deneysel frekans değerlerinin karşılaştırılması Tablo 2.20’de sunulmaktadır. Tablo 2.20’de görüldüğü gibi, sayısal ve deneysel frekans değerleri arasındaki maksimum fark %38,38 seviyelerindedir.

Bu durum, hasarsız sonlu eleman modelinin güncellenmesi gerektiği anlamına gelmektedir.

Tablo 2.20. Betonarme düzlem çerçeve sistemi için hasarsız durum dikkate alınarak elde edilen sayısal ve deneysel frekansların karşılaştırılması

Mod Numarası	Frekans (Hz)			
	GFTAA	SEY	Fark (%)	MGK (%)
1	13,898	18,012	29,60	96,4
2	39,907	55,225	38,38	98,5
3	123,84	149,47	20,70	72,3

Şekil 2.85, hasarsız duruma ait Bütünsel Güncelleme için gerçekleştirilen Duyarlılık Analiz sonuçlarını göstermektedir. Şekil 2.85’den her parametrenin mod şekilleri üzerindeki etkilerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir. Bu nedenle, model güncelleme sırasında Tablo 2.19’da belirtilen bütün belirsiz parametreler dikkate alınmıştır.



Şekil 2.85. Hasarsız duruma ait Bütünsel Güncelleme için elde edilen Duyarlılık Analiz sonuçları

Betonarme düzlem çerçeve sistemi için muhtemel belirsiz parametreler belirlendikten sonra Bütünsel Güncelleme çalışması gerçekleştirilmiştir. Hasarsız duruma ait Bütünsel Güncelleme sonucunda elde edilen parametre değişim sonuçları Tablo 2.21’de verilmektedir. Tablo 2.21 detaylı olarak incelendiğinde, birinci kat kolon ve kirişleri ile temellerin elastisite modülü değerinin başlangıç değerinden %48,15 azalarak $1,4 \times 10^{10} \text{ (N/m}^2\text{)}$ olarak, ikinci kat kolon ve kirişlerin elastisite modülünün ise %36,67 azalarak $1,71 \times 10^{10} \text{ (N/m}^2\text{)}$ olarak, birinci kat kolon ve kirişleri ile temellerin birim hacim ağırlıklarının %2 artarak 2448 kg/m^3 ve ikinci kat kolon ve kirişlerin birim hacim ağırlıklarının ise %8 azalarak 2208 kg/m^3 değerlerinde olduğu görülmektedir.

Tablo 2.21. Betonarme düzlem çerçeve sistemi için hasarsız durum dikkate alınarak elde edilen parametrelerin değişim sonuçları

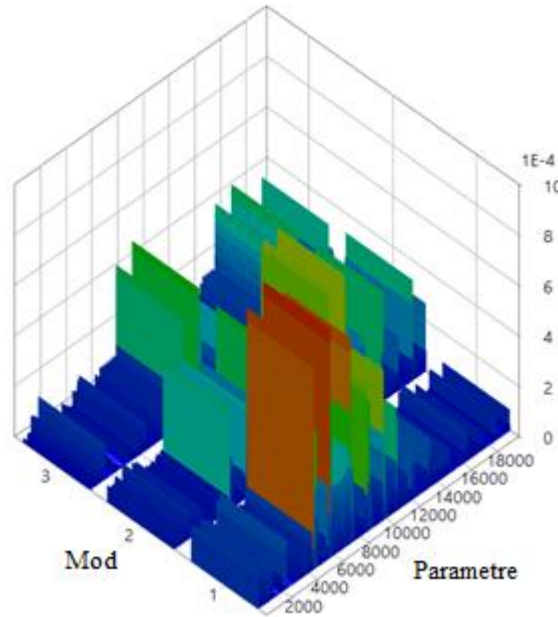
Parametre	Elemanlar	Bütünsel Güncelleme			
		Tipi	Başlangıç Değer	Fark (%)	Güncel Değer
1	Birinci Kat Kolon, Kiriş ve Temel	E	$2,7 \times 10^{10} \text{ (N/m}^2\text{)}$	-48,15	$1,4 \times 10^{10} \text{ (N/m}^2\text{)}$
2	İkinci Kat Kolon ve Kiriş	E	$2,7 \times 10^{10} \text{ (N/m}^2\text{)}$	-36,67	$1,71 \times 10^{10} \text{ (N/m}^2\text{)}$
3	Birinci Kat Kolon, Kiriş ve Temel	BHA	$2400 \text{ (kg/m}^3\text{)}$	2	$2448 \text{ (kg/m}^3\text{)}$
4	İkinci Kat Kolon ve Kiriş	BHA	$2400 \text{ (kg/m}^3\text{)}$	-8	$2208 \text{ (kg/m}^3\text{)}$

Betonarme düzlem çerçeve sistemi için hasarsız durum dikkate alınarak Bütünsel Güncelleme ile deneysel olarak edilen sayısal frekans değerleri arasındaki karşılaştırmalar Tablo 2.22’de gösterilmektedir. Tablo 2.22 detaylı olarak incelendiğinde bütünsel güncellenen betonarme düzlem çerçeve sistemiyle deneysel olarak elde edilen frekans değerleri arasındaki maksimum farkın %4.14 seviyelerinde olduğu görülmektedir.

Tablo 2.22. Betonarme düzlem çerçeve sistemi için hasarsız durum dikkate alınarak Bütünsel Güncelleme ile deneysel olarak elde edilen frekans değerleri arasındaki farklılıklar

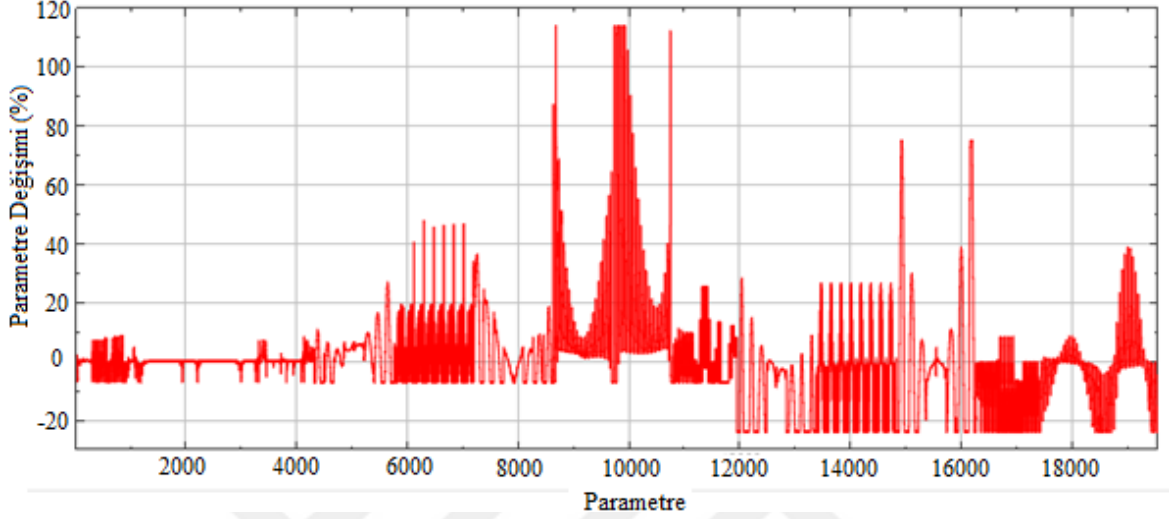
Mod Numarası	Frekans (Hz)			
	GFTAA	SEY	Fark (%)	MGK (%)
1	13,898	13,629	-1,94	95,6
2	39,907	41,631	+4,14	98,2
3	123,84	118,38	-4,40	64,7

Hasarsız duruma ait bütünsel güncelleme yapıldıktan sonra sonlu eleman modeli ve deneysel ölçümler arasındaki frekans ve mod şekillerini daha da yakınsatmak ve sonlu eleman modelinin gerçek modeli daha iyi temsil etmesini sağlamak amacıyla yerel güncellenen yapılmaya karar verilmiştir. Bunun için seçilen belirsiz parametrelerdeki birim hacim ağırlığı sabit tutularak elastisite modülünün değişimine izin verilmiştir. Elastisite modülündeki alt ve üst limitler, birinci kat kolon ve kirişler ile temel için sırasıyla -%7 ve %114 olarak, ikinci kat kolon ve kirişleri için ise sırasıyla -%24 ile %75 olarak belirlenmiş olup, bu parametrelere ait Duyarlılık Analizi sonuçları Şekil 2.86'de gösterilmektedir.



Şekil 2.86. Betonarme düzlem çerçeve sistemi için hasarsız durum dikkate alınarak Yerel Güncelleme ile elde edilen Duyarlılık Analizi sonuçları

Şekil 2.87, betonarme düzlem çerçeve sistemi için hasarsız duruma ait Yerel Güncelleme ile elde edilen parametrelerin değişim sonuçlarını göstermektedir. Şekil 2.87’de parametrelerdeki maksimum değişim %114 olarak elde edilmiştir.



Şekil 2.87. Betonarme düzlem çerçeve sistemine ait hasarsız durum dikkate alınarak Yerel Güncelleme ile elde edilen parametrelerin değişim sonuçları

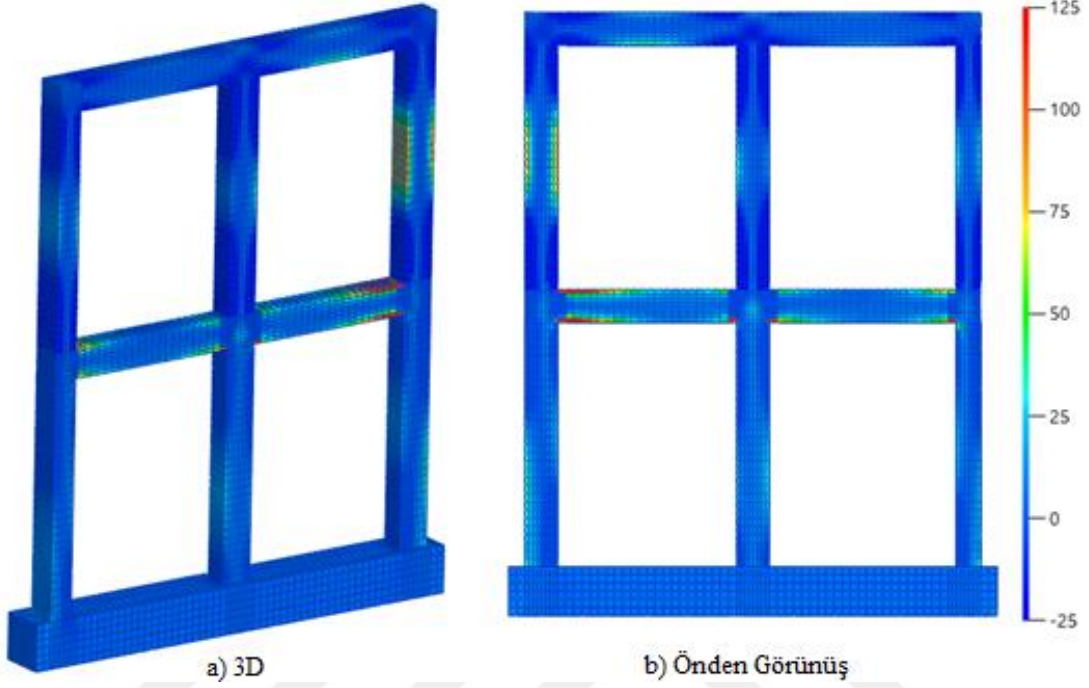
Tablo 2.23, betonarme düzlem çerçeve sistemi için hasarsız durum dikkate alınarak Yerel Güncelleme ve deneysel olarak elde edilen frekansların karşılaştırmasını göstermektedir. Tablo 2.23’de frekans değerleri arasındaki maksimum fark %0,21 olarak elde edilmiştir.

Tablo 2.23. Hasarsız duruma ait Yerel Güncelleme ve deneysel olarak elde edilen frekansların karşılaştırılması

Mod Numarası	Frekans (Hz)			
	GFTAA	SEY	Fark (%)	MGK (%)
1	13,898	13,906	0,05	96,2
2	39,907	39,991	0,21	98,3
3	123,84	123,87	0,02	64,2

Şekil 2.88, betonarme düzlem çerçeve sistemine ait hasarsız durum dikkate alınarak Yerel Güncelleme ile elde edilen parametrelerin değişim sonuçlarının sonlu eleman modeli

üzerindeki dağılımlarını göstermektedir. Şekil 2.88 incelendiğinde sonlu elemanlardaki malzemelerin ağırlıklı olarak homojen dağıldığı görülmektedir.



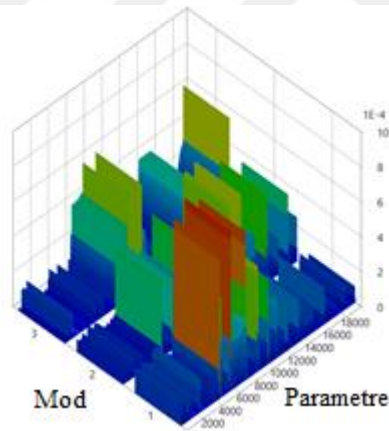
Şekil 2.88. Betonarme düzlem çerçeve sistemine ait hasarsız durum dikkate alınarak Yerel Güncelleme ile elde edilen parametrelerin değişim sonuçlarının sonlu eleman modeli üzerindeki dağılımları

Hasarsız duruma ait sonlu eleman modeli güncellenerek, sonlu eleman modelinin gerçek modeli temsil etmesi sağlanmıştır. Yapıya kolon kiriş bölgelerinden darbe yükü uygulanarak modele hasar verilmesi amaçlanmış ve hasarlı durum için deneysel ölçümler gerçekleştirilmiştir. Tablo 2.24 betonarme düzlem çerçeve sistemine ait hasarlı durum dikkate alınarak başlangıç sonlu eleman modeli ve deneysel olarak elde edilen frekans değerleri arasındaki fark göstermektedir. Tablo 2.24 incelendiğinde başlangıç sonlu eleman modeliyle deneysel olarak elde edilen frekans değerleri arasındaki maksimum farkın %91,30 olduğu görülmektedir.

Tablo 2.24. Başlangıç sonlu eleman modeli ile hasarlı duruma ait deneysel frekansların karşılaştırılması

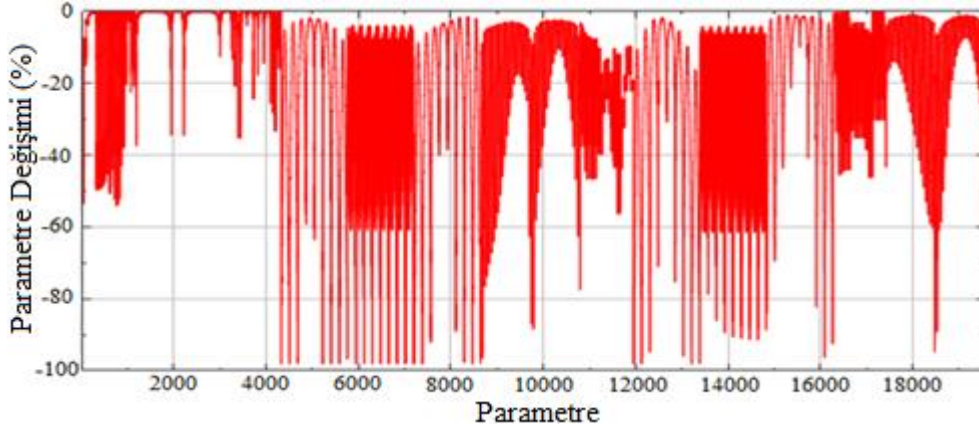
Mod Numarası	Frekans (Hz)			
	GFTAA	SEY	Fark (%)	MGK (%)
1	7,2691	13,906	91,30	98,6
2	23,263	39,991	71,91	94,6
3	69,293	123,87	78,76	61,5

Betonarme düzlem çerçeve sistemine ait hasarlı durum dikkate alınarak başlangıç sonlu eleman modeliyle deneysel olarak elde edilen frekans değerleri arasındaki farkların yüksek olmasından dolayı sonlu eleman modelinin güncellenmesi gerekmektedir. Muhtemel belirsiz parametre elastisite modülü olarak belirlenmiş olup bu parametrelere ait alt ve üst limitler sırasıyla -%98 ile %5'tir. Şekil 2.89, hasarlı duruma ait Yerel Güncelleme için elde edilen Duyarlılık Analizi sonuçlarını göstermektedir.



Şekil 2.89. Betonarme düzlem çerçeve sistemine ait hasarlı durum dikkate alınarak Yerel Güncelleme ile elde edilen Duyarlılık Analizi sonuçları

Şekil 2.90, hasarsız duruma ait Yerel Güncelleme ile elde edilen parametre değişimlerini göstermektedir. Şekil 2.90'dan görüleceği üzere parametrelerdeki maksimum değişim %98 olmuştur.



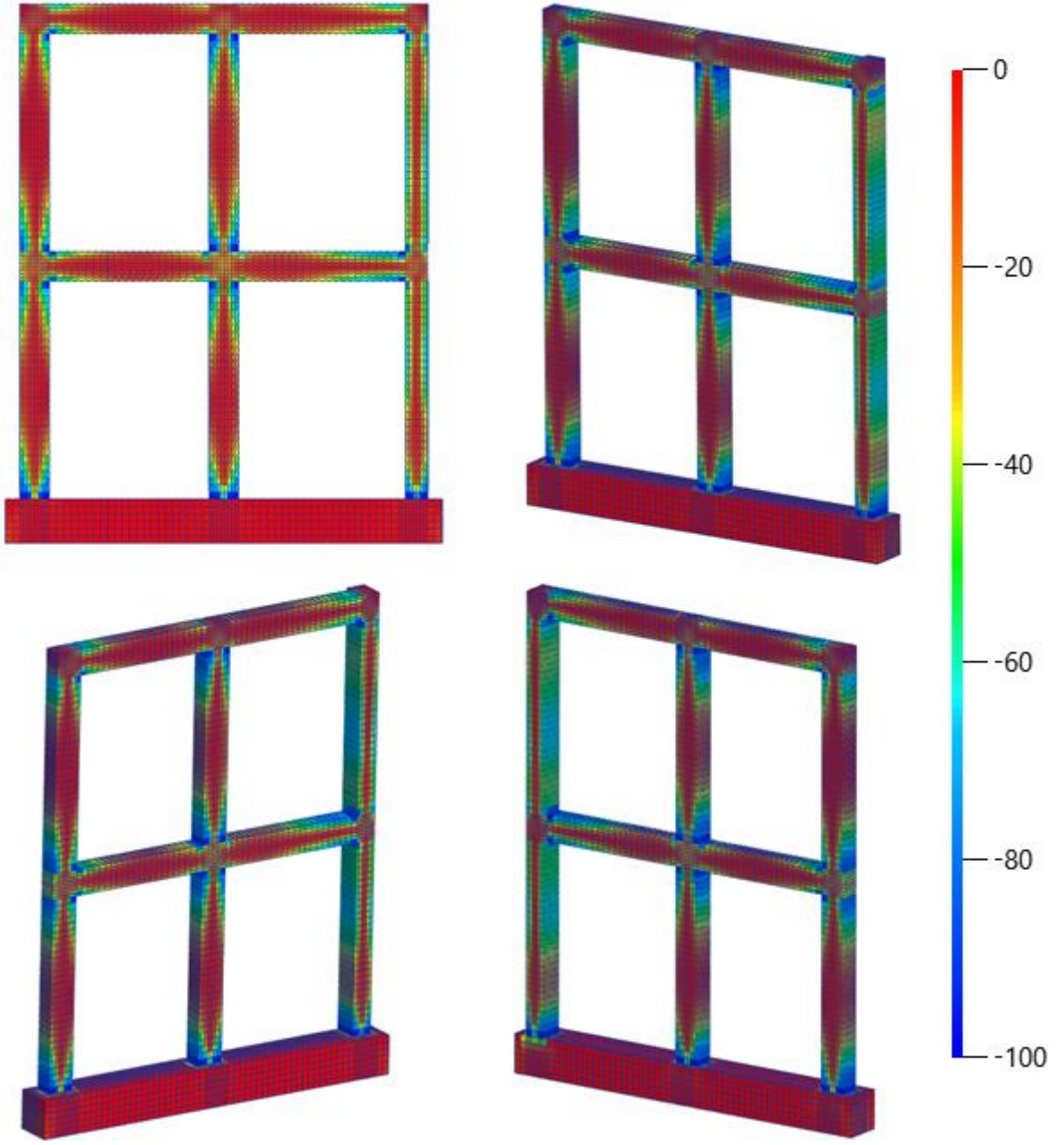
Şekil 2.90. Hasarlı duruma ait Yerel Güncelleme ile elde edilen parametre değişimleri

Betonarme düzlem çerçeve sistemine ait hasarlı durum dikkate alınarak Yerel Güncelleme ve deneysel olarak elde edilen frekansların karşılaştırılmasını Tablo 2.25’de verilmektedir. Tablo 2.25’de frekans değerleri arasındaki maksimum farkın %0,19 olduğu görülmektedir.

Tablo 2.25. Betonarme düzlem çerçeve sistemine ait hasarlı durum dikkate alınarak Yerel Güncelleme ve deneysel olarak elde edilen frekansların karşılaştırılması

Mod Numarası	Frekans (Hz)			
	GFTAA	SEY	Fark (%)	MGK (%)
1	7,2691	7,283	0,19	97,6
2	23,263	23,277	0,06	92,8
3	69,293	69,304	0,02	80,1

Şekil 2.91, betonarme düzlem çerçeve sistemine ait hasarlı durum dikkate alınarak Yerel Güncelleme ile elde edilen parametrelerin değişim sonuçlarının sonlu eleman modeli üzerindeki dağılımlarını göstermektedir. Şekil 2.91’de sonlu elemanlardaki maksimum değişen parametrelerin, kolon kiriş birleşim bölgelerinde olduğu ve bu bölgelerde hasarların olduğu anlamına gelmektedir. Sonlu eleman modeli üzerinde elde edilen hasarlar laboratuvar modeli üzerinde incelendiğinde, hasarların bazı bölgelerde uyumlu olduğu görülmüştür. Bu, güncellenen sonlu eleman modelinin deneysel modeli temsil edebileceği anlamına gelmektedir.



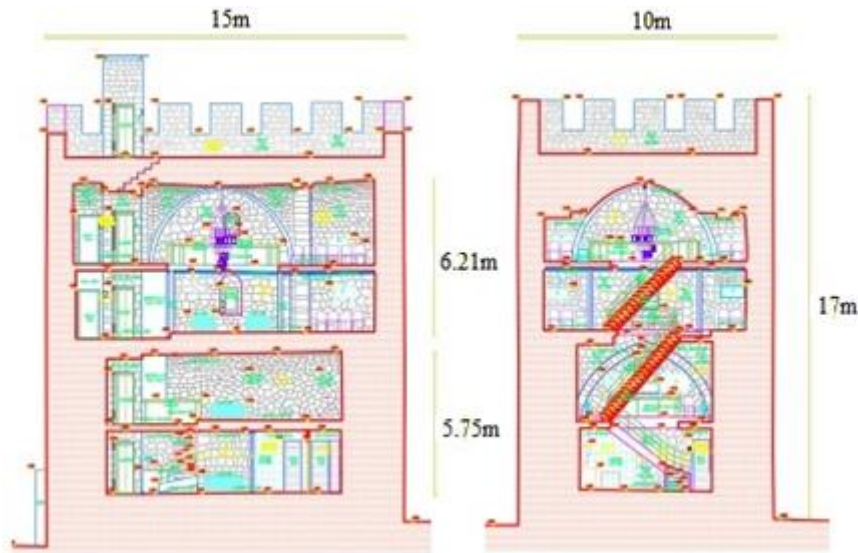
Şekil 2.91. Betonarme düzlem çerçeve sistemine ait hasarlı durum dikkate alınarak Yerel Güncelleme ile elde edilen parametre değişim sonuçlarının sonlu eleman modeli üzerindeki dağılımları

2.3. Arazi Çalışmaları

2.3.1. Trabzon Burcu

2.3.1.1. Trabzon Burcunun Yapısı ve Geometri Özellikleri

Trabzon Burcu, Trabzon ilinin Ortahisar ilçesinde bulunmakta olup, 6.yy'da Bizanslılar tarafından yapılmıştır. Bizanslılardan sonra Osmanlı İmparatorluğu 18.yy'a kadar burcun onarımı ve geliştirilmesine devam etmiştir. Şehrin merkezi ve hükümet binası Bizans ve Osmanlı dönemlerinde burcun etrafında yer almıştır. Son yüzyılda burç üzerinde betonarme döşeme ilavesi, bazı bölgelerin sıvayla güçlendirilmesi, asansör eklenmesi gibi müdahaleler yapılarak yapının orijinalliğinden uzaklaşmasına neden olmuştur. Trabzon Burcu'nun yapısal sistemi, taşıyıcı duvarlar, tonoz ve kemerlerden oluşmaktadır. Trabzon burcuna ait bazı röleve çizimleri Şekil 2.92'de gösterilmiştir. Şekil 2.92'den, burcun 17m yüksekliğinde, 15m genişliğinde ve 10m derinliğinde olduğu görülmektedir. Yapıdaki dış duvarların kalınlığı yaklaşık 1,25m'dir. Trabzon Burcu, iki kat betonarme ara döşeme ve iki kat yığma yapı olmak üzere toplam dört kattan oluşmaktadır. Trabzon Burcuna ait bazı fotoğraflar Şekil 2.93'da gösterilmektedir.



Şekil 2.92. Trabzon Burcuna ait bazı röleve çizimleri

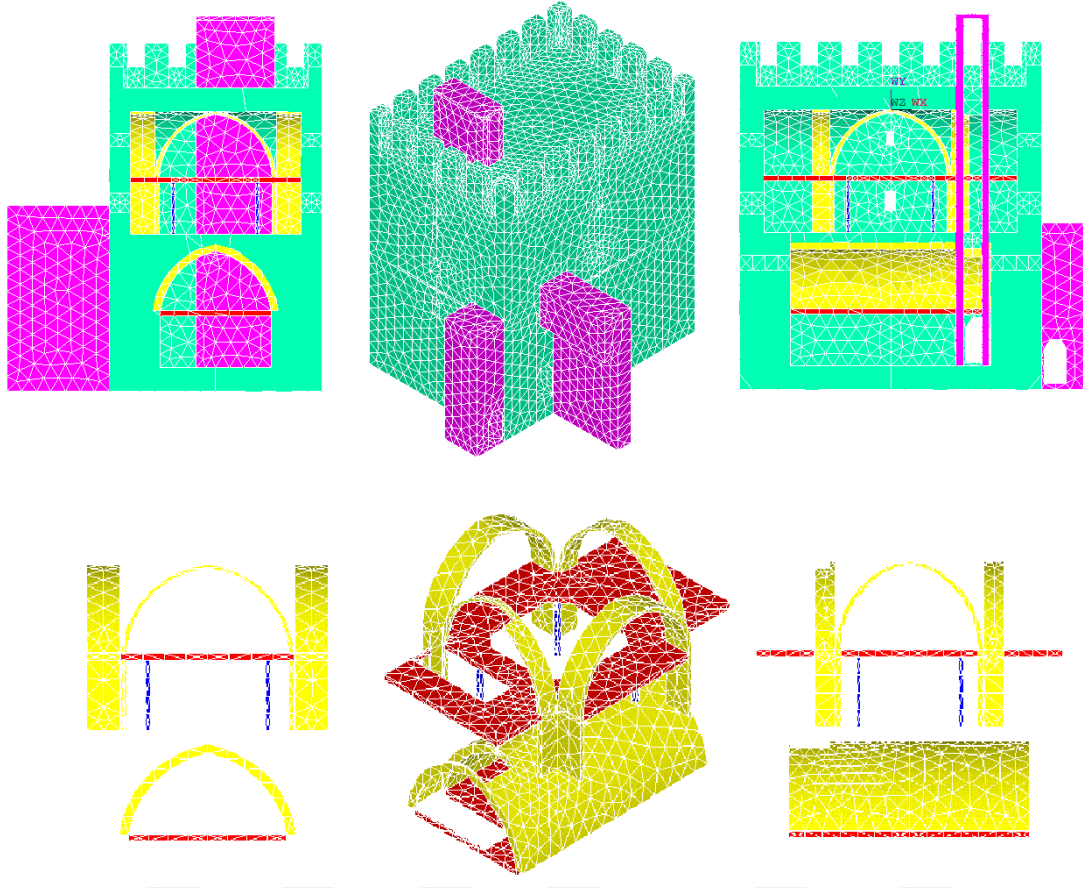


Şekil 2.93. Trabzon Burcuna ait elde edilen bazı görüşler

2.3.1.2. Başlangıç Sonlu Eleman Modelinin Elde Edilmesi

Trabzon Burcunun başlangıç sonlu eleman modeli, ANSYS programı yardımıyla oluşturulmuştur. Modelde, SOLID186 eleman tipi kullanılmıştır. Bu eleman tipi, 20 adet düğüm noktası ve her bir düğüm noktasında 3 tane serbestlik derecesine sahiptir. Oluşturulan sonlu eleman modelinde, 105848 düğüm noktası ve 67289 adet eleman bulunmaktadır. Sonlu eleman modeline ait bazı görüşler Şekil 2.94’de verilmektedir.

Sonlu eleman modeli, yığma duvar, yığma tonoz ve betonarme olmak üzere üç farklı yapısal eleman bileşenine sahiptir. Trabzon Burcuyla ilgili malzeme özelliklerinin belirlenmesi amacıyla herhangi bir deneysel çalışma gerçekleştirilmemiştir. Bu değerler için literatürden yararlanılmıştır (Betti ve Viagnoli, 2008; Betti ve Viagnoli, 2011; Salaustros vd., 2015). Literatürde, yığma yapılarla ilgili elastisite modülünün $1,5 \times 10^9 \text{ (N/m}^2\text{)}$ - $5,0 \times 10^9 \text{ (N/m}^2\text{)}$ arasında ve birim hacim ağırlığın ise 1600 kg/m^3 - 2200 kg/m^3 arasında değiştiği ifade edilmektedir. Trabzon Burcuyla ilgili başlangıç sonlu eleman modelinde dikkate alınan malzeme özellikleri Tablo 2.26’de özetlenmiştir.



Şekil 2.94. Trabzon Burchunun sonlu eleman modeline ait bazı görüşler

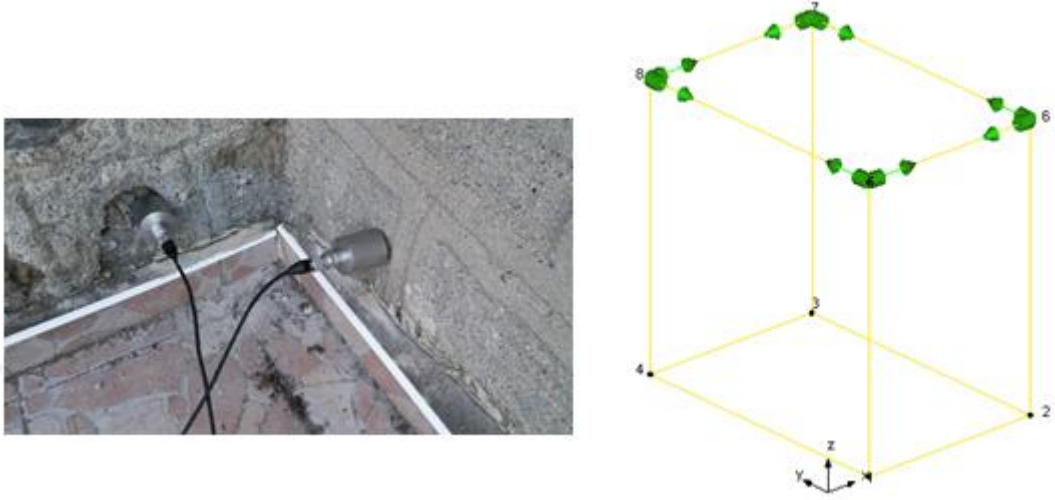
Tablo 2.26. Trabzon Burchuna ait başlangıç sonlu eleman modelinin malzeme özellikleri

Elemanlar	Malzeme Özellikleri		
	Elastisite Modülü (N/m ²)	Poisson Oranı (-)	Yoğunluk (kg/m ³)
Yığma Duvar	$2,4 \times 10^9$	0,2	2200
Yığma Tonoz	$4,0 \times 10^9$	0,2	2200
Betonarme Döşeme	$2,5 \times 10^{10}$	0,2	2500

2.3.1.3. Dinamik Karakteristiklerin Deneysel Modal Analiz Yöntemiyle Elde Edilmesi

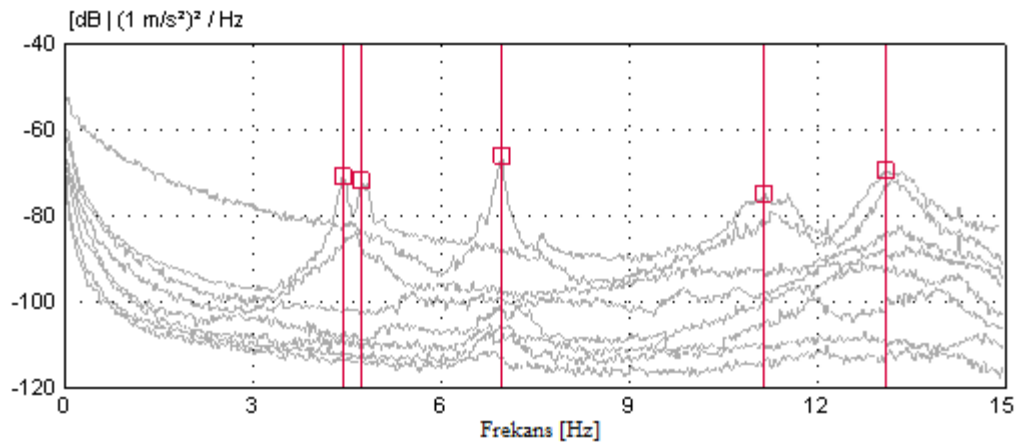
Trabzon Burchuna ait frekans, mod şekli ve sönüm oranı gibi dinamik karakteristikleri deneysel olarak belirlemek amacıyla Çevresel Titreşim Yöntemi kullanılmıştır. Çalışma

kapsamında, sekiz adet B&K 8340 tipi tek eksenli ivmeölçer kullanılmış olup, ivmeölçerlere ait bazı görünüşler Şekil 2.95’de verilmektedir.



Şekil 2.95. Trabzon Burcuna ait ivmeölçer yerleşim planı

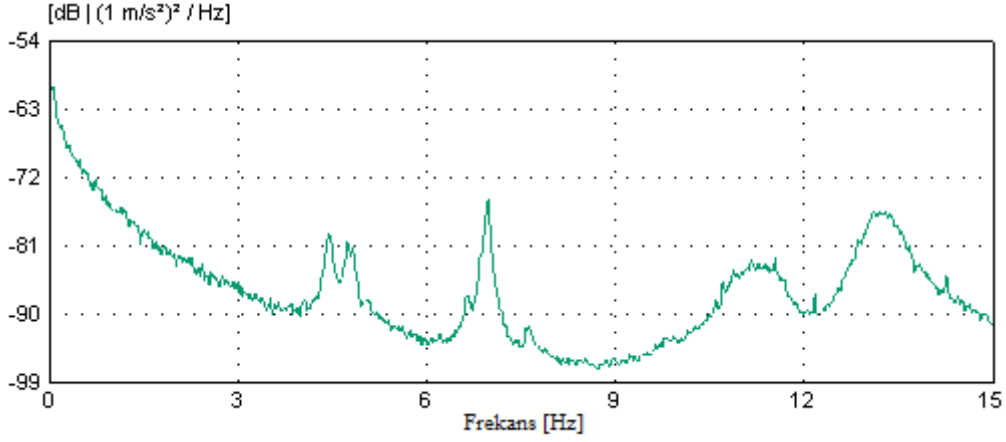
0-15Hz aralığında ve 45 dakika boyunca gerçekleştirilen deneysel ölçümler sonucunda toplanan sinyallerin işlenerek GFTAA yöntemine göre ayrıştırılması sonucu elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri ile bu matrislerin ortalamaları ve SAB Yöntemine göre ayrıştırılması sonucu elde edilen kararlılık diyagramları Şekil 2.96’da gösterilmektedir.



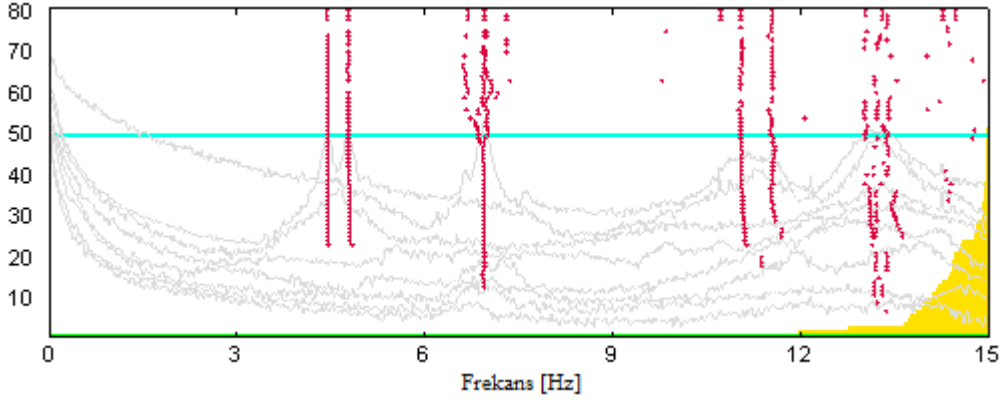
a) Spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri

Şekil 2.96. Trabzon Burcuna ait spektral yoğunluk matrisleri ve kararlılık diyagramları

Şekil 2.96'nin devamı

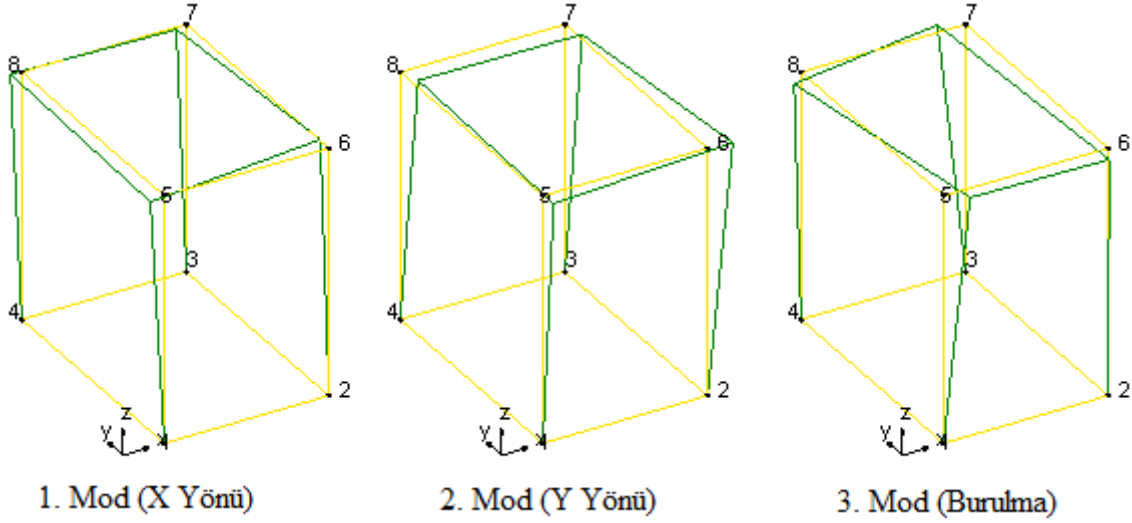


b) Spektral yoğunluk matrislerinin ortalaması



c) Kararlılık Diyagramı

Deneysel ölçümlerden elde edilen mod şekilleri Şekil 2.97'de gösterilmektedir. Şekil 2.97'den de görüleceği üzere, birinci mod X yönünde, ikinci mod Y yönünde ve üçüncü mod burulma olarak elde edilmiştir. GFTAA ve SAB yöntemlerine göre elde edilen frekans değerleri Tablo 2.27'de özetlenmektedir. Tablo 2.27'den de görüldüğü üzere, frekansların GFTAA yöntemi ile birlikte 4,455-6,967Hz arasında, SAB yöntemine göre ise 4,452-7,011Hz arasında elde edildiği görülmektedir. GFTAA ve SAB yöntemlerine göre elde edilen frekans değerleri arasında maksimum fark %0,77 olup, bu sonuçlar her iki yöntemle göre elde edilen doğal frekans değerleri arasında yeterli uyumun olduğu anlamına gelmektedir.



Şekil 2.97. Trabzon Burcuna ait elde edilen mod şekilleri

Tablo 2.27. Trabzon Burcuna ait deneysel olarak elde edilen frekans değerleri

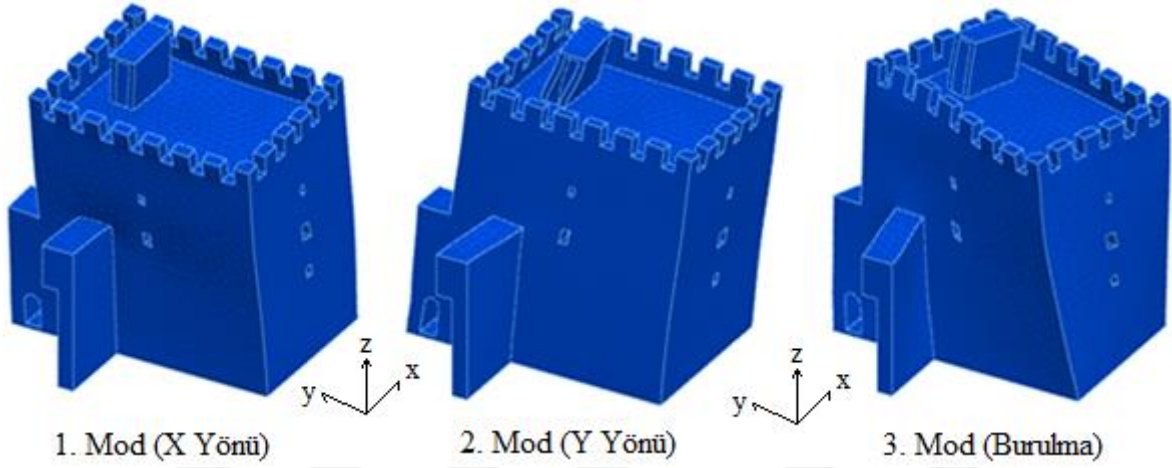
Mod Numarası	Frekans (Hz)		
	GFTAA	Fark (%)	SAB
1	4,455	0,07	4,452
2	4,750	0,77	4,787
3	6,967	0,63	7,011

2.3.1.4. Duyarlılığa Bağlı Model Güncellemesi

Trabzon Burcunun sonlu eleman modelinin yapının mevcut durumunu yansıtması esasına dayalı Duyarlılığa Bağlı Model Güncellemesi için ANSYS programı ile oluşturulan sonlu eleman modeli, FEMtools programına aktarılmıştır. GFTAA, SAB, FEMtools programıyla elde edilen frekans değerleri ve farklar Tablo 2.28’de verilmektedir. Tablo 2.28’den de görüldüğü gibi, sonlu eleman yöntemiyle sayısal olarak elde edilen frekans değerleri 5,941–9,191Hz arasında değişmekte olup, deneysel ve sayısal olarak elde edilen frekanslar arasındaki maksimum farkın %27 seviyelerinde olduğu görülmektedir. Sonlu eleman yöntemine göre elde edilen mod şekilleri Şekil 2.98’de gösterilmektedir.

Tablo 2.28. Trabzon Burcuna ait başlangıç sonlu eleman analizleri ile deneysel ölçümlerden elde edilen frekans değerlerinin karşılaştırılması

Mod Numarası	Frekans (Hz)				
	GFTAA	SAB	Fark. (%)	SEY	MGK (%)
1	4,455	4,452	25,06	5,941	84
2	4,750	4,787	27,00	6,507	97
3	6,967	7,011	24,20	9,191	97

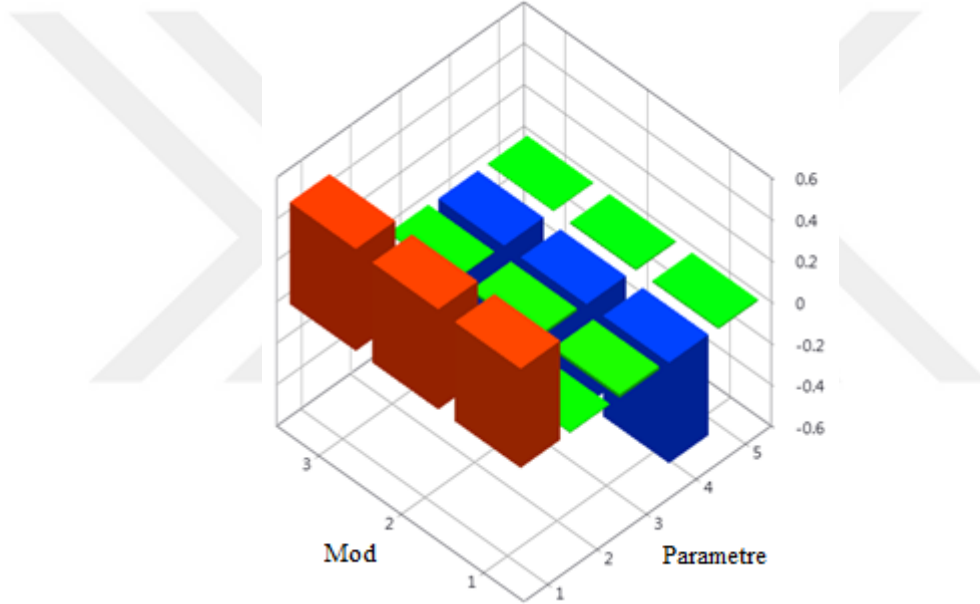


Şekil 2.98. Trabzon Burcunun sonlu eleman analizlerine dayalı sayısal olarak elde edilen ilk üç mod şekli

Duyarlılık analizi yapılmadan önce, Trabzon Burcuna ait muhtemel belirsiz parametrelerin üst ve alt sınır değerleri belirlenmiştir. Yapı, yığma duvar, taş kemer ve betonarme döşeme olmak üzere üç farklı yapısal bileşene sahiptir. Duyarlılık Analizi için seçilen muhtemel belirsiz parametreler yığma duvarlar ve taşıyıcı kemer sistemleri için elastisite modülü (E) ve birim hacim ağırlığı (BHA) ve betonarme döşeme için elastisite modülü olarak alınarak Duyarlılık Analizi gerçekleştirilmiştir. Tablo 2.29’da, Bütünsel Güncelleme için muhtemel belirsiz parametrelere ait bilgiler verilmektedir. Tablo 2.29’da görüldüğü gibi parametrelerin elastisite modüllerine ait alt ve üst sınırlar yığma duvarlar için sırasıyla -%83,3 ile %317, betonarme döşeme için -%20 ile %20, taş kemer için -%90 ile %150 arasında ve birim hacim ağırlıklarının alt ve üst limitleri sırasıyla yığma duvar için -%18,20 ile %0, betonarme döşeme için -%18,20 ile %0 arasında belirlenmiştir.

Tablo 2.29. Trabzon Burcuna ait Bütünsel Güncelleme için seçilen belirsiz parametreler ve sınır değerleri

Parametre	Elemanlar	Bütünsel Model Güncelleme			
		Tipi	Alt Sınır	Üst Sınır	Başlangıç Değeri
1	Yığma Duvar	E	-83,3 (%)	317 (%)	$2,4 \times 10^9$ (N/m ²)
2	Betonarme Döşeme	E	-20 (%)	20 (%)	$2,5 \times 10^{10}$ (N/m ²)
3	Taş Kemer	E	-90 (%)	150 (%)	$4,0 \times 10^9$ (N/m ²)
4	Yığma Duvar	BHA	-18,20 (%)	0 (%)	2200 (kg/m ³)
5	Betonarme Döşeme	BHA	-18,20 (%)	0 (%)	2200 (kg/m ³)



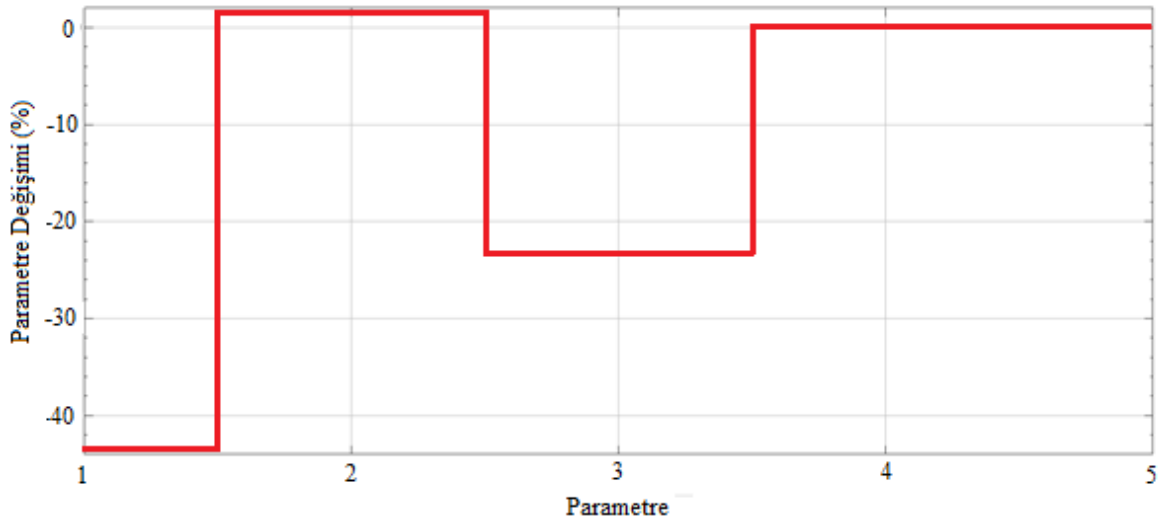
Şekil 2.99. Trabzon Burcuna ait Bütünsel Güncelleme ile elde edilen Duyarlılık Analizi sonuçları

Şekil 2.99 Trabzon Burcuna ait Bütünsel Güncelleme ile elde edilen Duyarlılık Analizi sonuçlarını göstermektedir. Şekil 2.99'da yığma duvarın elastisite modülü ve birim hacim ağırlığının (1. ve 4. Parametre) frekans değişimlerinde en etkin parametre olduğu ve betonarme döşeme ve yığma tonoz için E ve BHA değerlerinin frekans değişimlerinde daha az etkin olduğu görülmektedir. Düşük olan parametreler model güncellemede dikkate alınmayabilir fakat bu çalışmada model güncelleme için tüm parametreler dikkate alınmıştır. Parametreler seçildikten sonra bütünsel güncelleme yapılmış olup Bütünsel Güncelleme için elde edilen parametrelerin değişim sonuçları Tablo 2.30'da görülmektedir.

Tablo 2.30. Trabzon Burcuna ait Bütünsel Güncelleme ile elde edilen parametrelerin değişim oranları

Parametre	Elemanlar	Bütünsel Güncelleme			
		Tipi	Başlangıç Değer	Fark (%)	Güncel Değer
1	Yığma Duvar	E	$2,4 \times 10^9$ (N/m ²)	-43,33	$1,36 \times 10^9$ (N/m ²)
2	Betonarme Döşeme	E	$2,5 \times 10^{10}$ (N/m ²)	1,60	$2,54 \times 10^{10}$ (N/m ²)
3	Yığma Tonoz	E	$4,0 \times 10^9$ (N/m ²)	-23,5	$3,06 \times 10^9$ (N/m ²)
4	Yığma Duvar	BHA	2200 (kg/m ³)	0.0	2200 (kg/m ³)
5	Betonarme Döşeme	BHA	2200 (kg/m ³)	0.0	2200 (kg/m ³)

Tablo 2.30'de görüldüğü gibi, yığma duvar ve taş kemerin elastisite modülü sırasıyla %43,33 ve %23,50 azalarak $1,36 \times 10^9$ N/m² ve $3,06 \times 10^9$ N/m² ve betonarme döşemenin elastisite modülü %1,60 artarak $2,54 \times 10^{10}$ N/m² olarak belirlenmiştir. Bütünsel Güncelleme ile elde edilen parametrelerin yüzde olarak değişim oranı Şekil 2.100'de gösterilmiştir.



Şekil 2.100. Trabzon Burcuna ait Bütünsel Güncelleme ile elde edilen parametrelerin yüzdesel değişim grafiği

Bütünsel Güncelleme ile deneysel olarak elde edilen frekanslar ve mod şekillerinin uyumluluğunu gösteren MGK değerleri Tablo 2.31'de verilmektedir. Tablo 2.31'de görüldüğü gibi, model güncellemeden önceki frekanslar arasındaki maksimum fark %27 iken Bütünsel Güncellemeden sonra elde edilen maksimum fark %3.57 olarak elde

edilmiştir. Ayrıca güncellenen modelin MGK değerlerinin birbirleriyle uyumlu olduğu görülmektedir.

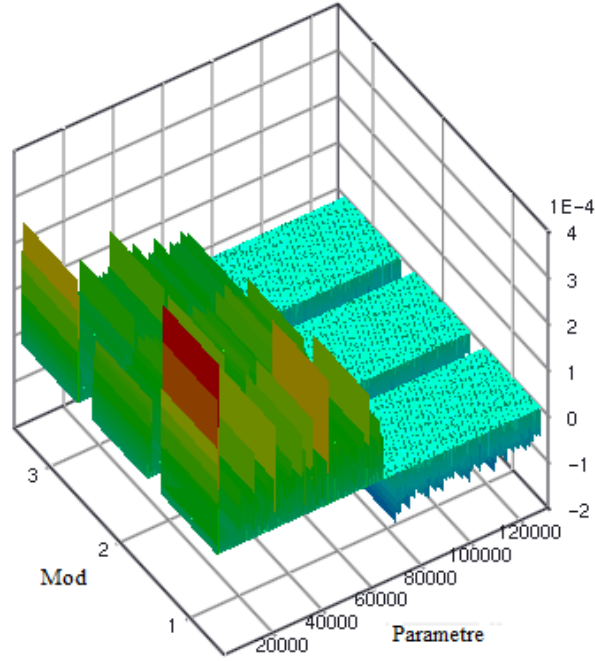
Tablo 2.31. Trabzon Burcuna ait Bütünsel Güncelleme ile deneysel olarak elde edilen frekansların karşılaştırılması

Mod Numarası	Frekans (Hz)				
	GFTAA	SAB	Bütünsel Güncelleme	Fark (%)	MGK
1	4,455	4,452	4,507	1,22	0,84
2	4,750	4,787	4,926	3,57	0,97
3	6,967	7,011	6,937	0,43	0,97

Bütünsel Güncelleme ile elde edilen değerler göz önüne alınarak Burcun Lokal Güncellemesi yapılmıştır. Lokal parametreler için dikkate alınan belirsiz parametre değerlere ait alt ve üst limitler Tablo 2.32’de verilmektedir. Tablo 2.32’de görüldüğü gibi belirsiz parametrelere ait elastisite modülündeki alt ve üst limitler yığma duvarlar için sırasıyla -%70,58 ile %267, betonarme döşeme için -%21,12 ile %18,25, taş kemer için -%89,67 ile %63,23 ve birim hacim ağırlıklarındaki alt ve üst limitleri yığma duvarlar için sırasıyla -%18,20 ile %0, betonarme döşeme için -%18,20 ile %0 arasında belirlenmiştir.

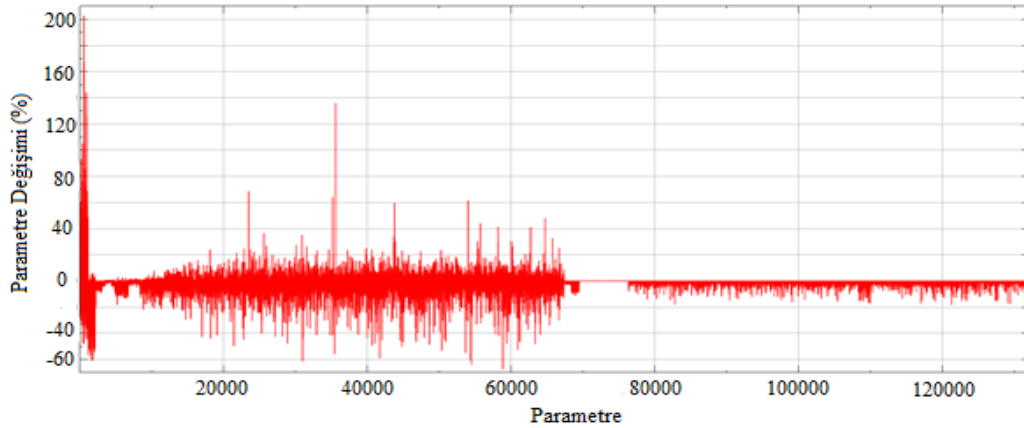
Tablo 2.32. Trabzon Burcuna ait Lokal Güncelleme için seçilen belirsiz parametrelere ait sınır değerleri

Parametre	Eleman	Lokal Güncelleme			
		Tipi	Alt Limit	Üst Limit	Başlangıç Değer
1	Yığma Duvar	E	-70,58 (%)	267 (%)	1.36E9 (N/m ²)
2	Betonarme Döşeme	E	-21,12 (%)	18,25 (%)	2.54E10 (N/m ²)
3	Taş Kemer	E	-86,94 (%)	63,23 (%)	3.06E9 (N/m ²)
4	Yığma Duvar	BHA	-18,20 (%)	0 (%)	2200 (kg/m ³)
5	Betonarme Döşeme	BHA	-18,20 (%)	0 (%)	2200 (kg/m ³)

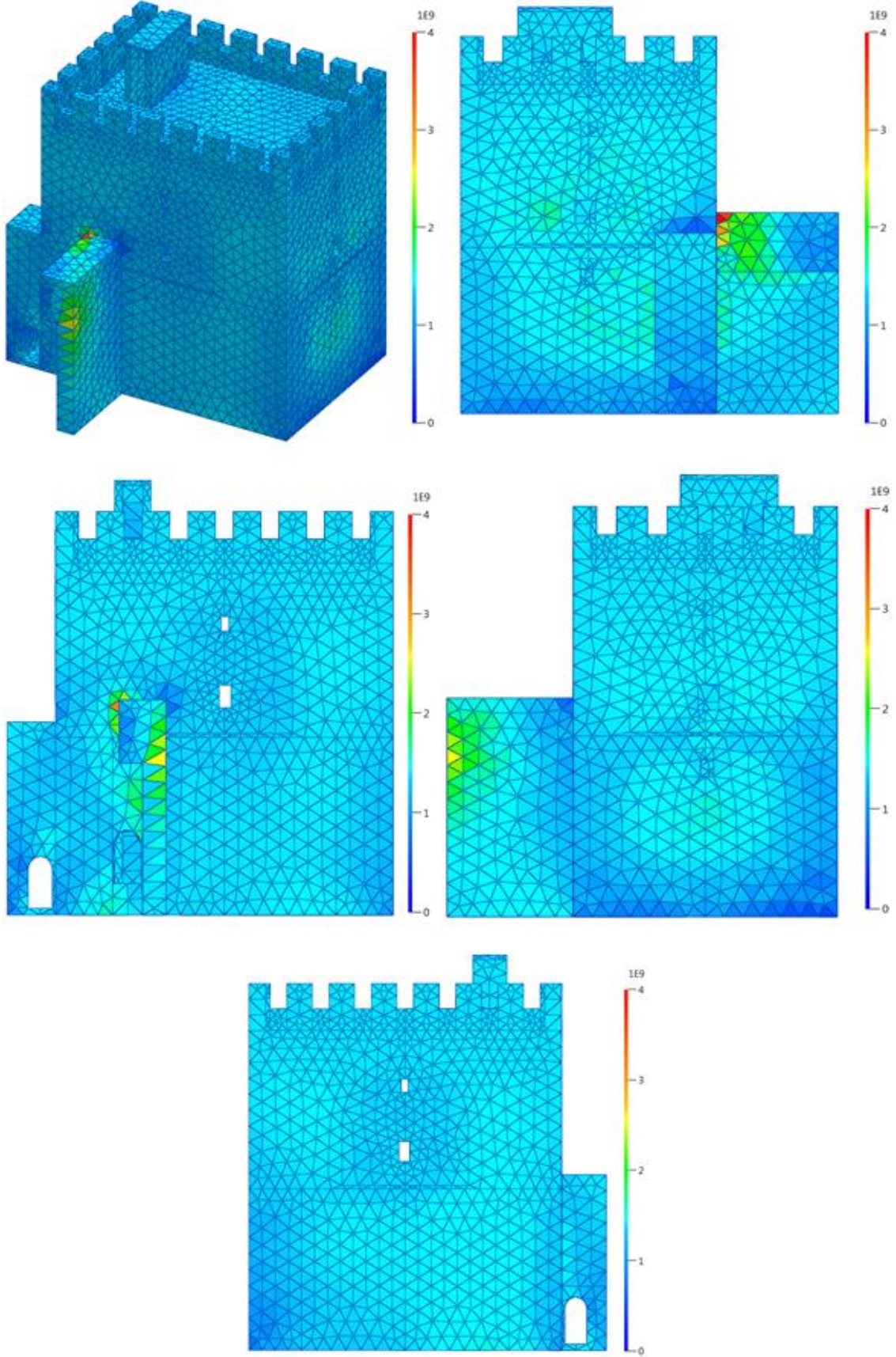


Şekil 2.101. Trabzon Burcuna ait Lokal Güncelleme ile elde edilen Duyarlılık Analizi sonuçları

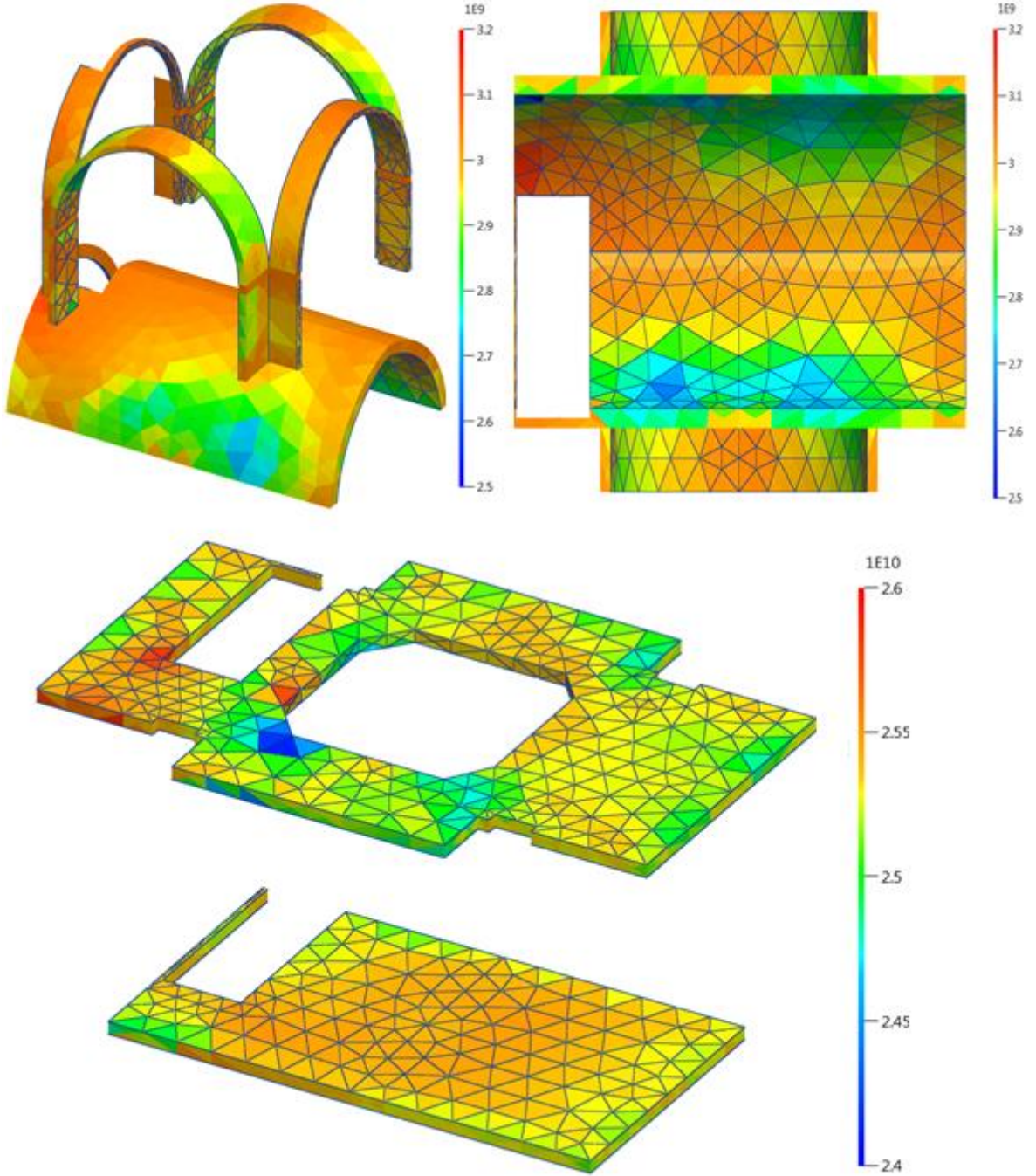
Trabzon Burcuna ait Lokal güncelleme için yapılan Duyarlılık Analizi sonucu etkin olan parametre değerleri Şekil 2.101’de gösterilmiştir. Duyarlık analizi yapıldıktan sonra Lokal Model Güncelleme yapılarak elde edilen parametre değişimleri Şekil 2.102’de gösterilmiştir. Şekil 2.102’de güncellen parametrelerde maksimum değişimin yaklaşık %200 olduğu görülmektedir.



Şekil 2.102. Trabzon Burcuna ait Lokal Güncelleme ile elde edilen parametrelerin değişim oranları



Şekil 2.103. Yığma duvarlarda Lokal Güncelleme ile elde edilen elastisite modülü değişimleri



Şekil 2.104. Taş kemer ve betonarme döşemelerde Lokal Güncelleme sonucunda elde edilen elastisite modülü değişimleri

Sonlu eleman modelinde yığma duvarlarda Lokal Güncelleme sonucunda elde edilen elastisite modülündeki değişimler Şekil 2.103'te gösterilmektedir. Şekil 2.103'te görüldüğü gibi, yığma duvarlar için elde edilen elastisite modülü değerleri $0,96 \times 10^9 \text{ (N/m}^2\text{)}$ ile $5,0 \times 10^9 \text{ (N/m}^2\text{)}$ arasında değişmektedir. Şekil 2.104, taş kemer ve betonarme döşemelerde Yerel Güncelleme sonucunda elde edilen elastisite modülü

değişimlerini göstermektedir. Şekil 2.104 incelendiğinde, taş kemerin elastisite modülü $2,5 \times 10^9$ (N/m²) ile $3,2 \times 10^9$ (N/m²) ve betonarme döşeme için ise $2,4 \times 10^9$ (N/m²) ile $2,6 \times 10^9$ (N/m²) arasında olduğu görülmektedir.

Tablo 2.33'te Lokal Güncelleme ve deneysel olarak elde edilen frekansların karşılaştırılması verilmiştir. Tablo 2.33 incelendiğinde, güncellenen model ile deneysel model arasındaki frekans farklılıklarının maksimum %0,02 olduğu ve MGK değerlerinden mod şekillerinin bir uyum içerisinde olduğu görülmektedir.

Tablo 2.33. Trabzon Burcuna ait Lokal Güncelleme ve deneysel olarak elde edilen frekansların karşılaştırılması

Mod Numarası	Frekans (Hz)				
	GFTAA	SAB	Lokal Güncelleme	Fark (%)	MGK (%)
1	4,455	4,452	4,454	0,02	81
2	4,750	4,787	4,751	0,02	98
3	6,967	7,011	6,967	0,00	97

3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, farklı taşıyıcı sistemlere sahip yapılarda analitik, sayısal ve deneysel yöntemlere dayalı hasar tespiti amaçlanmıştır. Tez kapsamında yapılan çalışmalar laboratuvar ve arazi çalışmaları olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Hasar tespiti amacıyla literatürde de yaygın olarak kullanılan Modal Güvence Kriteri, Koordinat Modal Güvence Kriteri, Mod Şekli Eğrilik Yöntemi, Modal Esneklik Yöntemi ve Duyarlılığa Bağlı Model Güncellemesi yöntemleri göz önüne alınmıştır. İlk kısımda, boru ve kutu kesite sahip çelik konsol kiriş modeller ile betonarme taşıyıcı sisteme sahip düzlem çerçeve sistem üzerinde farklı hasar durumları dikkate alınmış, her bir hasar durumunda dinamik karakteristiklerin değişimi ve hasar bölgelerinin tespiti analitik, sayısal ve deneysel yöntemlerle yapılmıştır. İkinci kısımda ise Trabzon İli, Ortahisar İlçesi'nde yer alan ve yığma taşıyıcı sisteme sahip tarihi Trabzon Burcu'nun yapısal durumunun değerlendirilmesi yapılmıştır. Bu tez kapsamında yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar maddeler halinde aşağıda sunulmaktadır.

➤ Boru ve kutu kesitli çelik konsol kiriş modelde altı farklı hasar durumu için analitik, sayısal ve deneysel olarak elde edilen dinamik karakteristiklerin birbirleriyle uyum içinde olduğu görülmüştür.

➤ Boru ve kutu kesitli çelik konsol kiriş modelinde Modal Güvence Kriteri kullanılarak, hasarsız ve her bir hasar durumu için elde edilen MGK değerlerinde, hasar şiddetinin artması durumunda belirgin bir azalmaların oluştuğu görülmüştür.

➤ Boru ve kutu kesitli çelik konsol kiriş modelinde Koordinat Modal Güvence Kriteri (KMGK) Yöntemi ile, analitik, sayısal ve deneysel sonuçlar kullanılarak elde edilen (1-KMGK) grafiklerinde hasarın bölgesinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Modellerde hasar şiddetinin artmasıyla ilgili düğüm noktalarındaki (1-KMGK) değerlerinin de arttığı görülmüştür. Böylece hasarların varlığı ve bölgesini KMGK ile tespit edilebildiği sonucuna varılmıştır.

➤ Boru ve kutu kesitli çelik konsol kiriş modelinde Mod Şekli Eğrilik Yöntemi kullanılarak hasarsız ve farklı hasar durumları için analitik ve deneysel olarak elde edilen grafikler değerlendirildiğinde, mod şekli eğrilik değişiminin yüksek olduğu bölgelerde üçüncü titreşim modunun daha etkin olduğu görülmüştür. Bu nedenle, analitik ve deneysel üçüncü mod şekli eğrilik değişimlerinde üçüncü modlar dikkate alınarak karşılaştırma

yapılmıştır. Boru kesitli çelik konsol kiriş modeli için Hasar 3, Hasar 4 ve Hasar 5 durumlarında, üçüncü hasar noktasında hasar bölgesi analitik olarak elde edilebilirken, deneysel olarak hesaplanan üçüncü hasar noktasındaki hasarın varlığı ise tam olarak belirlenememiştir. Bu durum, hasarın düşük şiddetli ve mesnetten uzak olması, deneysel olarak ölçümlerden kaynaklanabilecek hatalar, sinyal gürültüleri gibi nedenlerden dolayı ortaya çıkabilmektedir. Kutu kesitli çelik konsol kiriş modelinde ise Hasar 1, Hasar 2 durumunda analitik ve deneysel olarak elde edilen mod şekli eğrilik değişimlerinde hasar bölgesini tespit edebildiği, hasar 3 durumunda ise her iki yöntemin 3.hasar noktasını tespit edemediği, hasar 4 ve hasar 5 durumunda ağır hasarların bölgesini tespit edildiği ve hasar 6 durumunda ise 3. ve 4. hasar durumlarını tespit edilemediği görülmüştür. Genel olarak, Mod Şekli Eğrilik Yöntemi kullanılarak, analitik ve deneysel grafiklerin bir uyum içinde olduğu görülmüştür. Böylece, boru ve kutu kesitli çelik konsol kiriş modelinde analitik ve deneysel olarak elde edilen verilerle, Mod Şekli Eğrilik Yöntemi kullanılarak, şiddetli hasarlara ait hasar bölgelerini daha belirgin olarak tespit edilebileceği sonucuna varılmıştır.

➤ Boru ve kutu kesitli çelik konsol kiriş modelinde Modal Esneklik Yöntemi kullanılarak, hasarsız ve farklı hasar durumları için analitik ve deneysel olarak elde edilen grafikler doğrultusunda, boru kesitli konsol modelde Hasar 1 durumunda, deneysel olarak elde edilen 2. hasar noktası civarındaki grafiğin eğiminden gürültü sinyalleri, ölçüm hataları gibi nedenlerden dolayı çok az bir sapma meydana geldiği görülmüştür. Hasar 2 durumunda, her iki yöntemle hasarların bölgeleri tespit edilmiştir. Hasar 3 durumunda, analitik ve deneysel grafiklerin 3.hasar noktasının yerini tam olarak tespit edilemediği görülmüştür. Hasar 4 durumunda, hasar şiddeti arttığı zaman analitik olarak küçük hasarın tespit edilemediği fakat deneysel olarak tespit edildiği görülmüştür. Hasar 5 durumunda, analitik ve deneysel olarak hasarın ağır hasarların tespit edildiği fakat küçük hasarların tespit edilemediği görülmüştür. Hasar 6 durumunda ise, mesnetten 85cm uzaklıkta ağır hasar verilmesine rağmen analitik ve deneysel olarak hasarın yerini belirlenemediği görülmüştür. Kutu kesitli çelik konsol kiriş modelinde ise Hasar 1 durumunda, analitik ve deneysel olarak 1. hasar noktasının yeri tespit edilirken, deneyselde mesnet noktasındaki değişiminden dolayı mesnet bölgesinde bir sıkıntı olduğunu işaret etmektedir. Hasar 2 durumunda her iki yöntemle hasar bölgelerinin yeri tespit edilebilmektedir. Hasar 3 durumunda, 1. ve 2. Hasar noktaları belirlenebilirken 3. hasar noktasındaki yer tam olarak saptanamamıştır. Hasar 4 durumunda, hasarın şiddeti arttığı zaman analitik olarak bölgeler tespit edilebilirken, deneysel olarak tam tespit edilememiştir. Hasar 5 ve hasar 6

durumlarında, ankastre bölgesine doğru hasarın şiddeti arttığı zaman mesnete yakın bölgelerde hasarı tespit edebildiği fakat mesnetten uzak olan 3. ve 4. Hasar durumunu tam olarak belirlenemediği görülmüştür. Buradan, boru ve kutu kesitli çelik konsol kiriş modelinde Modal Esneklik Yöntemi kullanılarak, hasarların varlığı ve bölgeleri belirlenebilirken, mesnetten uzaktaki hasarların yerinin tespit edilmesinin zor olduğu sonucuna varılmıştır.

➤ Boru ve kutu kesitli çelik konsol kiriş modelinde Duyarlılığa Bağlı Model Güncelleme kullanılarak konsol kirişin dinamik karakteristiklerini değiştirebilecek muhtemel belirsiz parametreler belirlenmiş, bu parametrelerin etkinliğini belirlemek için ise Duyarlılık Analizi yapılmıştır. Konsol kirişe ait belirsiz parametreler, mesnet kısımlarında yay ve eleman üzerinde atalet momenti olarak dikkate alınmıştır. Boru ve kutu kesitli çelik konsol kiriş modelde Model Güncellemesi yapılarak hasarın bölgesi ve şiddetinin etkili olarak belirlendiği görülmüştür.

➤ Betonarme çerçeve modelinde hasarsız durum için Sonlu Eleman Yöntemiyle ve deneysel olarak GFTAA Yöntemiyle belirlenen doğal frekanslar birbirleriyle uyumlu oldu görülmüştür.

➤ Betonarme çerçeve sisteminde Modal Güvence Kriteri kullanılarak, modelin hasarlı olması durumunda ilk iki modun belirgin bir şekilde etkilenmediği fakat üçüncü modlar arasındaki MGK değerinin %58,1 seviyelerinde olduğu görülmüştür. Bu değer, model üzerinde herhangi bir hasarın varlığına işaret etmektedir.

➤ Betonarme çerçeve modelinde Koordinat Modal Güvence Kriterine bakıldığında, modelin hasarlı ve hasarsız durumlara ait deneysel (1-KMGK) değerlerini elde edilmiş olup. önemli hasarların kolon kiriş birleşim bölgelerinde olan 1, 7 ve 9 nolu düğüm noktası civarında bir sorun olabileceği sonucuna varılmıştır.

➤ Betonarme çerçeve modelinde Duyarlılığa Bağlı Model Güncelleme ile elde edilen sonuçlarda elastisite modülündeki değişimlerin kolon-kiriş bölgelerinde meydana geldiği görülmüştür. Hasar yerleri, laboratuvar modeliyle karşılaştırıldığında gözle görülür hasarların da kolon-kiriş bölgelerinde meydana geldiği görülmüş ve buradan sonlu eleman modelinin gerçek modeli yeterince temsil edebileceği sonucuna varılmıştır.

➤ Trabzon Burcunda Sonlu Eleman Yöntemi ve Deneysel Modal Analiz Yöntemi kullanılarak elde edilen doğal frekansların uyumlu olduğu görülmüştür.

➤ Trabzon Burcunda Bütünsel Güncellemeden elde edilen değerler Yerel Güncellemede başlangıç model olarak kullanılmıştır. Yerel Güncelleme ile elde edilen

frekans değişimleri %3,57'den %0,02'ye düştüğü ve Yerel Güncelleme ile elde edilen mod şekillerinin birbirleriyle uyumlu olduğu görülmüştür.

Özetle, Çevresel Titreşimlere Dayalı Hasar Tespit Yöntemleri hasarın bölgesi ve şiddetini belirlemede oldukça başarılı olduğu görülmüştür. Hasarın tespit edilmesinde tek bir yöntemle bağlı kalınmayacağı başka yöntemlerle de teyit edilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar ışığında gelecekte yapılabilecek çalışmalarla ilgili bazı öneriler aşağıda sunulmuştur.

- Yeni hasar tespit algoritmaları geliştirilerek bunların çeşitli hasar durumları için etkinliği araştırılabilir.
- Bazı deneysel ölçümlerde gürültü sinyallerinden dolayı modal yerdeğiştirmelerin iyi sonuç vermediği görülmüştür. Deneysel ölçümlerden elde edilen sonuçların daha sağlıklı olması açısından için sinyal filtrelemesi üzerinde çalışılabilir.
- Başlangıç sonlu eleman modeli ile yerel güncellemeden sonra elde edilen modellerin statik ve/veya dinamik yükler altındaki davranışları karşılaştırılmalı olarak incelenebilir.
- Yapının farklı hasar durumları ve seviyeleri dikkate alınarak kalan ömrünü anında belirleyebilen bir yazılım geliştirilebilir.
- Özellikle büyük ölçekli modellerdeki hasarların daha gerçekçi olması bakımından ilgili hasar durumları sarsma masası deneyleri ile elde edilebilir.
- Otomatik Model Güncellemeye dayalı bir yazılım geliştirilebilir.

4. KAYNAKLAR

- Adams, R.D., Walton, D., Flitcroft, J.E. ve Short, D., 1975. Vibration Testing as a Non-Destructive Test Tool for Composite Materials, Composite Reliability, ASTM STP 580, 159-175.
- Altunışık, A.C., 2010. Karayolu Köprülerinin Yapısal Davranışlarının Analitik ve Deneysel Yöntemlerle Belirlenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Türkiye.
- ANSYS, 2008. Swanson Analysis System, USA.
- Aua, S., Zhanga, F. ve Nia, Y., 2013. Bayesian Operational Modal Analysis: Theory, Computation, Practice, Computers and Structures, 126, 3-14.
- Bendat, J., ve Piersol, A., 1986. Random Data: Analysis and Measurement Procedures, 2nd Edition, John Wiley and Sons, USA.
- Betti, M., ve Vignoli, A. 2008. Modelling and Analysis of a Romanesque Church Under Earthquake Loading: Assessment of Seismic Resistance, Engineering Structures, 30, 2, 352-367.
- Betti, M. ve Vignoli, A., 2011. Numerical Assessment of the Static and Seismic Behaviour of the Basilica of Santa Maria All'Impruneta (Italy), Construction and Building Materials, 25, 12, 4308-4324.
- Boulkaïbet, I., Mthembu, L., Marwala, T., Friswell, M.I. ve Adhikari, S., 2015. Finite Element Model Updating Using the Shadow Hybrid Monte Carlo Technique, Mechanical Systems and Signal Processing, 52, 53, 115-132.
- Brincker, R., Zhang, L. ve Andersen, P., 2000. Modal Identification from Ambient Responses using Frequency Domain Decomposition, 18th International Modal Analysis Conference, San Antonio, USA, 4062, 2, 625-630.
- Brownjohn, J.M.W., Magalhaes, F., Caetano, E. ve Cunha, A., 2010. Ambient Vibration Re-Testing and Operational Modal Analysis of the Humber Bridge, Engineering Structures, 32, 2003-2018.
- Cawley, P. ve Adams, R.D., 1979. The Location of Defects in Structures from Measurements of Natural Frequencies, Journal of Strain Analysis, 14, 2, 49-57.
- Chang, K., Shen, Z. ve Lee, G., 1995. Modal Analysis Technique for Bridge Damage Detection, Nondestructive Testing Methods for Civil Infrastructure, 1-16.
- Chen, X., Omenzetter, P. ve Beskhyroun, S., 2014. Calibration of the Finite Element Model of a Twelve-Span Prestressed Concrete Bridge Using Ambient Vibration

Data, 7th European Workshop on Structural Health Monitoring, July 8-11, 2014. La Cité, Nantes, France.

- Deng, L. ve Cai, C.S., 2010. Bridge Model Updating Using Response Surface Method and Genetic Algorithm, Journal of Bridge Engineering, ASCE, 553-564.
- Doebling, S. W., Farrar C. R. ve Prime, M.B., 1998. A Summary Review of Vibration-Based Damage Identification Methods, 30, Thousands Oaks, Ca, Etats-Unis: Sage.
- Dutta, A. ve Talukdar, S., 2004. Damage Detection in Bridges Using Accurate Modal Parameters, Finite Elements in Analysis and Design, 40, 287-304.
- Femtools, 2003. Femtools Software, Version 3.3, Dynamic Design Solutions, Leuven, Belgium.
- Fotia, D., Diaferio, M., Giannoccaro, N. ve Mongelli, M., 2012. Ambient Vibration Testing, Dynamic Identification and Model Updating of a Historic Tower, NDT&E International, 47, 88-95.
- Fox, C.H.J., 1992. The Location of Defects in Structures: a Comparison of the Use of Natural Frequency and Mode Shape Data, Proceedings of the 10. Analysis Conference, International Modal Analysis Conference, San Diego, California, 522-528, USA.
- Gökdağ, H., 2010. Wavelet-Based Damage Detection Method for Beam-Like Structures, Gazi University Journal of Science, 23, 339-349.
- Hamey, C.S., Lestari, W., Qiao, P. ve Song, G., 2004. Experimental Damage Identification of Carbon/Epoxy Composite Beams Using Curvature Mode Shapes, Structural Health Monitoring, 3, 4, 333-353.
- Heylen W., Lammens S. ve Sas, P., 2007. Modal Analysis Theory and Testing, Leuven Katholieke Universtiy, Department of Mechanical Engineering, Leuven, Belgium.
- Huang, Q., Xu, Y.L., Li, J.C., Su, Z.Q. ve Liu, H.J., 2012. Structural Damage Detection of Controlled Building Structures Using Frequency Response Functions, Journal of Sound and Vibration, 331, 3476-3492.
- Huth, O., Feltrin, G., Maeck, J., Kılıç, N. ve Motavalli, M., 2005. Damage Identification using Modal Data: Experiences on a Prestressed Concrete Bridge, Journal of Structural Engineering, ASCE, 131, 12, 1898-1910.
- Imregun, M. ve Visser, W.J., 1991. A Review of Model Updating Techniques, Shock and Vibration Digest, 23, 1, 9-20.
- Jacobsen, N.J., Andersen, P. ve Brincker, R., 2006. Using Enhanced Frequency Domain Decomposition as a Robust Technique to Harmonic Excitation in Operational Modal Analysis, Proceedings of ISMA2006, International Conference on Noise and Vibration Engineering, Leuven, Belgium.

- Jaishi, B. ve Ren, W., 2005. Structural Finite Element Model Updating Using Ambient Vibration Test Results, Journal of Structure Engineering, ASCE, 131, 4, 617-628.
- Jin, S., Cho, S. ve Jung H., 2015. Adaptive Reference Updating for Vibration-Based Structural Health Monitoring under Varying Environmental Conditions, Computers and Structures, 158, 211-224.
- Kao, C.Y. ve Hung, S.L., 2003. Detection of Structural Damage Via Free Vibration Responses Generated by Approximating Artificial Neural Networks, Computers and Structures, 81, 2631-2644.
- Kim, J.T. ve Stubbs, N., 1995. Model Uncertainty Impact and Damage-Detection Accuracy in Plate Girder, Journal of Structural Engineering, ASCE, 121, 10, 1409-1417.
- Lee, Y.S. ve Chung, M.J., 2000. A Study on Crack Detection using Eigen frequency Test Data, Computers and Structures, 77, 327-342.
- Li, Z., Xia, S., Wang, J., ve Su, X., 2006. Damage Detection of Cracked Beams Based on Wavelet Transform, International Journal of Impact Engineering, 32, 1190-1200.
- Lin, C.S., 1990. Location of Modeling Errors using Modal Test Data, American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal, 28, 1650-1654.
- Loutridis, S., Douka, E. ve Trochidis, A., 2004. Crack Identification in Double Cracked Beams using Wavelet Analysis, Journal of Sound and Vibration, 277, 1025-1039.
- Overschee, P.V. ve Moor, B.D., 1996. Subspace Identification for Linear Systems: Theory, Implementation and Applications, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands.
- Pandey, A.K., Biswas, M. ve Samman, M.M., 1991. Damage Detection from Changes in Curvature Mode Shapes, Journal of Sound and Vibration, 145, 2, 321-332.
- Pandey, A.K. ve Biswas, M. 1994. Damage Detection in Structures using Changes in Flexibility, Journal of Sound Vibration, 169, 1, 3-17.
- Peeters, B., 2000. System Identification and Damage Detection in Civil Engineering, Doktora Tezi, K.U, Leuven, Belgium.
- Peter, F. ve Karsten, B., 2001. Application of Model-Based Damage Identification to a Seismically Loaded Structure, Smart Materials and Structures, 10, 1, 150-155.
- Ramos, J.L.F.S., 2007. Damage Identification on Masonry Structures Based on Vibration Signatures, Doktora Tezi, University of Minho, Portugal.
- Ren, W.X. ve Deroeck, G., 2002a. Structural Damage Identification using Modal Data. I: Simulation Verification, Journal of Structural Engineering, ASCE, 128, 87-95.

- Ren, W.X. ve Deroeck, G., 2002b. Structural Damage Identification using Modal Data. II: Test Verification, Journal of Structural Engineering, ASCE, 128, 96-104.
- Rytter, A., 1993. Vibration-Based Inspection of Civil Engineering Structures, Doktora Tezi, Department of Building Technology and Structural Engineering, University of Aalborg, Aalborg, Denmark.
- Salawu, O.S. ve Williams, C., 1995. Bridge Assessment using Forced-Vibration Testing, Journal of Structural Engineering, ASCE, 121, 2, 161-173.
- Sanayei, M., Khaloo, A., Gül, M. ve Çatbaş, N., 2015. Automated Finite Element Model Updating of a Scale Bridge Model using Measured Static and Modal Test Data, Engineering Structures, 102, 66-79.
- Sanayei, M. ve Rohela, P., 2014. Automated Finite Element Model Updating of Full-Scale Structures with PARAmeter Identification System (PARIS), Advances in Engineering Software, 67, 99-110.
- Schwarz, B.J. ve Richardson, M.H., 1999. Experimental Modal Analysis, CSI Reliability Week, Orlando, USA.
- Sevim, B., 2010. Kemer Barajların Dinamik Davranışlarının Sonlu Eleman ve Deneysel Modal Analiz Yöntemleriyle Belirlenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Türkiye.
- More, S.T. ve Bindu, R.S., 2015. Effect of Mesh Size on Finite Element Analysis of Plate Structure, International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT).
- Nasser, H., Mevel, L. ve Chapelle, D. 2005. Damage detection under environmental perturbation. Proceedings of the 23. International Modal Analysis Conference, Orlando, Florida, Paper No. 114, 286.
- Saloustros, S., Pelà, L., Roca, P. ve Portal, J., 2015. Numerical Analysis of Structural Damage in the Church of the Poblet Monastery, Engineering Failure Analysis, 48, 41-61.
- Srinivasan, M.G. ve Kot, C.A., 1992. Effects of Damage on the Modal Parameters of Cylindrical Shell, 10. International Modal Analysis Conference, San Diego, US, 529-535.
- Sun, H. ve Büyüköztürk, O., 2016. Probabilistic Updating of Building Models using Incomplete Modal Data, Mechanical Systems and Signal Processing, 75, 27-40.
- Timoshenko, S., Young, D.H. ve Weaver, W., 1974. Vibration Problems in Engineering, Wiley, New York.
- Toksoy, T. ve Aktan, A.E., 1994. Bridge-Condition Assessment by Modal Flexibility, Experimental Mechanics, 34, 3, 271-278.

- Vanhonacker, P., 1980. The Use of Modal Parameters of Mechanical Structures in Sensitivity Analysis, System Synthesis and System Identification Methods, Doktora Tezi, University of Leuven, Belgium.
- Wu, J.R. ve Li, Q.S., 2004. Finite Element Model Updating for a High-Rise Structure Based on Ambient Vibration Measurements, Engineering Structures, 26, 979-990.
- Yu, DJ. ve Ren, W.X., 2005. EMD-Based Stochastic Subspace Identification of Structures from Operational Vibration Measurements, Engineering Structures, 27, 1741-1751.
- Zeischka, H., Storrer, O., Leuridan, J. ve Vandeurzen, U., 1988. Calculation of Modal Parameter Sensitivities Based on a Finite Element Proportionality Assumption, 6th International Modal Analysis Conference (IMAC), Bethel, CT, 2, 1082-1087.
- Zheng, D.Y. ve Fan, S.C., 2003. Vibration and Stability of Cracked Hollow-Sectional Beams, Journal of Sound and Vibration, 267, 933-954.
- Zienkiewicz, O.C., 2000. The Finite Element Method, McGraw Hill Book Company.
- Zordan, T., Briseghella, B. ve Liu T., 2014. Finite Element Model Updating of a Tied-Arch Bridge using Douglas-Reid Method and Rosenbrock Optimization Algorithm, Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 1, 4, 280-292.

ÖZGEÇMİŞ

Fatih Yesevi OKUR, 1993 yılında Trabzon ilinin Çaykara ilçesinde doğdu. İlkokulu 1999-2007 yılları arasında Trabzon Dumlupınar İlköğretim Okulu'nda, orta öğrenimini ise 2007-2011 yılları arasında Trabzon Lisesi'nde tamamladı. 2011 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde "Lisans" eğitimine başladı. 2015 yılında Boğaziçi Üniversitesi tarafından düzenlenen "Uluslararası Çelik Köprü Yarışması 2015 (Design&Construct 2015)" yarışmasında "TEMREN" ekibi ile ikincilik ödülünü kazandı ve İnşaat Mühendisliği bölümünü "Yüksek Onur Öğrencisi" ve bölüm ikincisi olarak tamamladı. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda "Yüksek Lisans" eğitimine başladı. 2016 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi tarafından düzenlenen "Design Together with Building Information Modeling 2016" yarışmasında "KTU Together" ekibi ile birincilik ödülünü kazandı. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi 61. kuruluş yıldönümünde "Yılın Başarılı Öğrencisi" ödülüne layık görüldü. İngilizce bilen OKUR'un bugüne kadar yapmış olduğu akademik çalışmalara ait yayın listesi aşağıda sunulmaktadır.

- Altunışık, A.C., Adanur, S., Genç, A.F., Günaydın M. ve **Okur F.Y.**, 2016. Non-Destructive Testing of an Ancient Masonry Bastion, Journal of Cultural Heritage, vol.14, pp.26-40.
- Altunışık, A.C., Adanur, S., Genç, A.F., Günaydın, M. ve **Okur F.Y.**, 2016. An Investigation of the Seismic Behaviour of an Ancient Masonry Bastion using Non-Destructive and Numerical Methods, Experimental Mechanics, Basımda.
- Altunışık, A.C., **Okur F.Y.**, Genç, A.F., Günaydın M. ve Adanur, S., 2016. Automated Model Updating of Historical Masonry Structures based on Ambient Vibration Measurements, Journal of Performance of Constructed Facilities, İncelemede.
- Altunışık, A.C., **Okur F.Y.** ve Kahya, V., 2016. Vibrations of a Box-Sectional Cantilever Timoshenko Beam with Multiple Cracks, Journal of Engineering Mechanics, İncelemede.
- Altunışık, A.C., **Okur F.Y.** ve Kahya, V., 2016. Modal Parameter Identification and Vibration based Damage Detection of a Multiple Cracked Cantilever Beam, Engineering Structures, İncelemede.