

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ÇEVRESEL TİTREŞİM VERİLERİ KULLANILARAK YAPILARIN  
HASAR DURUMLARININ TESPİTİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ**

**İnş. Yük. Müh. Temel TÜRKER**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde  
"DOKTOR (İNŞAAT MÜHENDİSİ)"  
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 17.05.2011  
Tezin Savunma Tarihi : 16.06.2011**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Alemdar BAYRAKTAR**

**Trabzon 2011**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**

**İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında**

**Temel TÜRKER Tarafından Hazırlanan**

**ÇEVRESEL TİTREŞİM VERİLERİ KULLANILARAK YAPILARIN HASAR DURUMLARININ TESPİTİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 17/05/2011 gün ve 1405 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 16/06/2011 tarihinde yapılan sınavda**

**DOKTORA TEZİ**

**olarak kabul edilmiştir.**

**Jüri Üyeleri**

**Başkan : Prof. Dr. Mehmet Emin TUNA**



**Üye : Prof. Dr. Alemdar BAYRAKTAR**



**Üye : Prof. Dr. Halil KARADENİZ**



**Üye : Doç. Dr. Levent GÜMÜŞEL**



**Üye : Yrd. Doç. Dr. Şevket ATEŞ**



**Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ**

**Enstitü Müdürü**

## ÖNSÖZ

“Çevresel Titreşim Verileri Kullanılarak Yapıların Hasar Durumlarının Tespiti ve Değerlendirilmesi” adlı bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Doktora Tezi olarak hazırlanmıştır.

Bu denli güncel ve önemli bir konuda çalışmamı sağlayan, yoğun çalışma temposu içerisinde tez çalışmamın her aşamasında ilgisini eksik etmeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden daima yararlandığım hocam Prof. Dr. Alemdar BAYRAKTAR’a minnet ve şükranlarımı sunmayı her zaman bir borç bilirim.

Çalışmalarım sırasında bilgi ve yardımlarını esirgemeyen Doç. Dr. Levent GÜMÜŞEL’e ve Yrd. Doç. Dr. Şevket ATEŞ’e teşekkür ederim. Ayrıca, tez jürimde yer alarak tezimi inceleme zahmetine katlanan ve tavsiyelerini benimle paylaşan Prof. Dr. Mehmet Emin TUNA’ya ve Prof. Dr. Halil KARADENİZ’e teşekkürü bir borç bilirim. Akademik hayatım süresince değişik aşamalarda beni yönlendiren tüm hocalarıma minnettarlığımı belirtirim. Tez çalışmam süresince değerli bilgilerine başvurduğum Yrd. Doç. Dr. Mehmet AKKÖSE’ye ve Yrd. Doç. Dr. Süleyman ADANUR’a teşekkürlerimi belirtmek isterim. Doktora tezim süresince desteklerini eksik etmeyen başta değerli oda arkadaşım Yrd. Doç. Dr. Hasan Basri BAŞAĞA olmak üzere Dr. D. Mehmet ÖZCAN’a, Yrd. Doç. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK’a ve Yrd. Doç. Dr. Barış SEVİM’e teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca uygulama aşamalarındaki ölçümlerde yardımcı olan yüksek lisans ve lisans aşamalarındaki öğrenci kardeşlerime teşekkür ederim.

Çalışmalarım süresince maddi desteklerinden ve fiziksel imkanlarından yararlandığım Karadeniz Teknik Üniversitesi’ne ve TÜBİTAK’a, ayrıca Yurtiçi Doktora Burs Programı’ndan sağladığı bursiyerlikten dolayı TÜBİTAK-BİDEB’e teşekkür ederim.

Bu günlere gelmemde ellerinden gelen tüm imkanları sağlayan, özellikle hayatımın bu önemli aşamasında maddi ve manevi desteklerini eksik etmeyen, haklarını hiçbir zaman ödeyemeyeceğim değerli aileme minnet ve şükranlarımı sunmayı hayatımın sonuna kadar bir borç bilirim. Bu çalışmanın, Ülkemizin bilimsel alanda ilerlemesine ve yeni yapılacak olan çalışmalara katkıda bulunmasını temenni ederim.

Temel TÜRKER  
Trabzon 2011

## TEZ BEYANNAMESİ

*Doktora Tezi* olarak sunduğum “*Çevresel Titreşim Verileri Kullanılarak Yapıların Hasar Durumlarının Tespiti ve Değerlendirilmesi*” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım *Prof. Dr. Alemdar BAYRAKTAR*’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. 20/06/2011

*Temel TÜRKER*

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET .....	X
SUMMARY .....	XI
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	XII
TABLolar DİZİNİ.....	XX
SEMBOLLER DİZİNİ .....	XXV
1. GENEL BİLGİLER .....	1
1.1. Giriş .....	1
1.2. Hasar Tespiti Üzerine Yapılmış Çalışmalar .....	3
1.3. Tezin Amacı ve Kapsamı.....	16
1.4. Analitik Model Güncellenme Yöntemi .....	17
1.4.1. Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi.....	19
1.4.1.1. Dinamik Karakteristiklerin Analitik Olarak Belirlenmesi.....	19
1.4.1.1.1. Analitik Modellerin Oluşturulması.....	19
1.4.1.1.2. Malzeme Özellikleri ve Sınır Şartlarının Belirlenmesi .....	20
1.4.1.1.3. Sonlu Eleman Yöntemiyle Modal Analiz.....	20
1.4.1.2. Dinamik Karakteristiklerin Deneysel Olarak Belirlemesi .....	22
1.4.1.2.1. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi .....	22
1.4.1.2.2. Operasyonel Modal Analiz Yönteminin Uygulama Alanları .....	23
1.4.1.2.3. Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle Ölçümler .....	24
1.4.1.2.4. Modal Parametrelerin Elde Edilmesi.....	30
1.4.1.2.4.1. Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma Yöntemi .....	31
1.4.1.2.4.2. Stokastik Altalan Belirleme Yöntemi .....	34
1.4.2. Dinamik Karakteristiklerin Karşılaştırılması.....	37
1.4.2.1. Doğal Frekansların Karşılaştırılması .....	37
1.4.2.2. Mod Şekillerinin Karşılaştırılması.....	37

1.4.3.	Amaç Fonksiyonlarının Tanımlanması.....	39
1.4.4.	Değişkenlerin Seçilmesi ve Değişim Oranlarının Tayin Edilmesi .....	39
1.4.5.	Duyarlılık Analizlerinin Gerçekleştirilmesi .....	40
1.4.6.	Yakınsama Kriterinin Tanımlanması.....	42
1.4.7.	Adım Adım Çözümleme.....	44
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	45
2.1.	Önerilen Hasar Tespit Yaklaşımı.....	45
2.2.	Çelik Konsol Kiriş Model Uygulaması .....	48
2.2.1.	Modelin Özellikleri ve İnşası.....	48
2.2.2.	Başlangıç Analitik Modelin Oluşturulması .....	48
2.2.3.	Hasarsız Duruma ait Ölçümün Gerçekleştirilmesi .....	50
2.2.4.	Analitik Modelin Kalibre Edilmesi .....	53
2.2.5.	Hasarlı Durum Ölçümünün Gerçekleştirilmesi .....	55
2.3.	İki Boyutlu Çelik Çerçeve Model Uygulaması .....	57
2.3.1.	Modelin Özellikleri ve İnşası.....	57
2.3.2.	Başlangıç Analitik Modelin Oluşturulması .....	58
2.3.3.	Hasarsız Durum Ölçümünün Gerçekleştirilmesi .....	61
2.3.4.	Analitik Modelin Kalibre Edilmesi .....	63
2.3.5.	Hasarlı Durum Ölçümlerinin Gerçekleştirilmesi.....	65
2.3.5.1.	Kiriş Ortası Hasarı .....	65
2.3.5.2.	Kolon-Kiriş Birleşim Bölgesi Hasarı.....	68
2.4.	Tek Katlı Betonarme Bina Modeli Uygulaması .....	71
2.4.1.	Modelin Özellikleri ve İnşası.....	71
2.4.2.	Başlangıç Analitik Modelin Oluşturulması .....	73
2.4.3.	Hasarsız Durum Ölçümünün Gerçekleştirilmesi .....	75
2.4.4.	Analitik Modelin Kalibre Edilmesi .....	77
2.4.5.	Hasarlı Durum Ölçümlerinin Gerçekleştirilmesi.....	79
2.4.5.1.	Kolon Üst Uçları Kabuk Betonu Hasarı .....	79
2.4.5.2.	Kolon Alt Uçları Kabuk Betonu Hasarı.....	82
2.4.5.3.	A-1 Kolonu Üst Ucu Göbek Betonu Hasarı .....	85
2.5.	Üç Katlı Betonarme Bina Modeli Uygulaması.....	87
2.5.1.	Modelin Özellikleri ve İnşası.....	87
2.5.2.	Başlangıç Analitik Modellerin Oluşturulması .....	89

2.5.3.	Hasarsız Durum Ölçümünün Gerçekleştirilmesi .....	94
2.5.4.	Analitik Modelin Kalibre Edilmesi .....	103
2.5.5.	Hasarlı Durum Ölçümlerinin Gerçekleştirilmesi.....	108
2.5.5.1.	Hasar 1: 1 Aksı Üzerindeki Duvarda Çatlaklar Oluşması .....	108
2.5.5.2.	Hasar 2: 1 Aksı Üzerindeki Duvarın Tamamen Göçmesi .....	111
2.5.5.3.	Hasar 3: A Aksı Üzerinde 2 ve 3 Aksları Arasındaki Duvarın Tamamen Göçmesi.....	113
2.5.5.4.	Hasar 4: 1. Kattaki Bütün Duvarların Göçmesi.....	115
2.5.5.5.	Hasar 5: A-1 Kolonu Üst Ucunda Kabuk Beton Hasarı .....	117
2.5.5.6.	Hasar 6: B-1 Kolonu Üst Ucunda Kabuk Beton Hasarı .....	119
2.5.5.7.	Hasar 7: A-1 Kolonu Üst Ucu Göbek Beton Hasarı.....	121
2.6.	Köprü Model Uygulaması .....	123
2.6.1.	Modelin Özellikleri ve İnşası.....	123
2.6.2.	Başlangıç Analitik Modelin Oluşturulması .....	123
2.6.3.	Hasarsız Durum Ölçümünün Gerçekleştirilmesi .....	125
2.6.4.	Analitik Modelin Kalibre Edilmesi .....	128
2.6.5.	Hasarlı Durum Ölçümlerinin Gerçekleştirilmesi.....	130
2.6.5.1.	Kolon Üst Ucu Hasarı.....	131
2.6.5.2.	Tabliye Hasarı.....	133
2.7.	Baraj Model Uygulaması .....	135
2.7.1.	Modelin Özellikleri ve İnşası.....	135
2.7.2.	Başlangıç Analitik Modelin Oluşturulması .....	136
2.7.3.	Hasarsız Durum Ölçümünün Gerçekleştirilmesi .....	138
2.7.4.	Analitik Modelin Kalibre Edilmesi .....	141
2.7.5.	Hasarlı Durum Ölçümünün Gerçekleştirilmesi .....	143
3.	BULGULAR VE İRDELEMELER .....	146
3.1.	Konsol Kiriş Modelin Hasar Durumunun Değerlendirilmesi.....	146
3.1.1.	Hasar Varlığının Belirlenmesi .....	146
3.1.2.	Hasar Yerinin Belirlenmesi .....	157
3.1.3.	Hasarın Konsol Kiriş Davranışına Etkisinin Belirlenmesi .....	150
3.2.	İki Boyutlu Çelik Çerçeve Modelin Hasar Durumunun Değerlendirilmesi	151
3.2.1.	Kiriş Ortası Hasarı .....	151
3.2.1.1.	Hasar Varlığının Belirlenmesi .....	151

3.2.1.2.	Hasar Yerinin Belirlenmesi .....	151
3.2.1.3.	Hasarın Çelik Çerçeve Davranışına Etkisinin Belirlenmesi .....	155
3.2.2.	Kolon-Kiriş Birleşim Bölgesi Hasarı.....	156
3.2.2.1.	Hasar Varlığının Belirlenmesi .....	156
3.2.2.2.	Hasar Yerinin Belirlenmesi .....	157
3.2.2.3.	Hasarın Çelik Çerçeve Davranışına Etkisinin Belirlenmesi .....	161
3.3.	Tek Katlı Betonarme Bina Modelin Hasar Durumlarının Değerlendirilmesi .....	161
3.3.1.	Kolon Üst Uçlarında Kabuk Betonu Hasarı .....	161
3.3.1.1.	Hasar Varlığının Belirlenmesi .....	161
3.3.1.2.	Hasar Yerinin Belirlenmesi .....	162
3.3.1.3.	Hasarın Betonarme Bina Davranışına Etkisinin Belirlenmesi.....	165
3.3.2.	Kolon Alt Uçlarında Kabuk Betonu Hasarı.....	166
3.3.2.1.	Hasar Varlığının Belirlenmesi .....	166
3.3.2.2.	Hasar Yerinin Belirlenmesi .....	166
3.3.2.3.	Hasarın Betonarme Bina Davranışına Etkisinin Belirlenmesi.....	168
3.3.3.	A-1 Kolon Üst Ucu Çekirdek Betonu Hasarı .....	169
3.3.3.1.	Hasar Varlığının Belirlenmesi .....	169
3.3.3.2.	Hasar Yerinin Belirlenmesi .....	169
3.3.3.3.	Hasarın Betonarme Bina Davranışına Etkisinin Belirlenmesi.....	171
3.4.	Üç Katlı Betonarme Bina Modelin Hasar Durumlarının Değerlendirilmesi .....	172
3.4.1.	Hasar 1: 1 Aksı Üzerindeki Duvarda Çatlaklar Oluşması .....	172
3.4.1.1.	Hasar Varlığının Belirlenmesi .....	172
3.4.1.2.	Hasar Yerinin Belirlenmesi .....	172
3.4.1.3.	Hasarın Betonarme Bina Davranışına Etkisinin Belirlenmesi.....	175
3.4.2.	Hasar 2: 1 Aksı Üzerindeki Duvarın Tamamen Göçmesi .....	176
3.4.2.1.	Hasar Varlığının Belirlenmesi .....	176
3.4.2.2.	Hasar Yerinin Belirlenmesi .....	177
3.4.2.3.	Hasarın Betonarme Bina Davranışına Etkisinin Belirlenmesi.....	179
3.4.3.	Hasar 3: 2 ve 3 Aksları Arasındaki Duvarın Tamamen Göçmesi .....	179
3.4.3.1.	Hasar Varlığının Belirlenmesi .....	179
3.4.3.2.	Hasar Yerinin Belirlenmesi .....	180
3.4.3.3.	Hasarın Betonarme Bina Davranışına Etkisinin Belirlenmesi.....	182



3.4.4.	Hasar 4: 1. Kattaki Bütün Duvarların Tamamen Göçmesi.....	182
3.4.4.1.	Hasar Varlığının Belirlenmesi .....	182
3.4.4.2.	Hasar Yerinin Belirlenmesi .....	183
3.4.4.3.	Hasarın Betonarme Bina Davranışına Etkisinin Belirlenmesi.....	185
3.4.5.	Hasar 5: A-1 Kolonu Üst Ucunda Kabuk Beton Hasarı .....	185
3.4.5.1.	Hasar Varlığının Belirlenmesi .....	185
3.4.5.2.	Hasar Yerinin Belirlenmesi .....	186
3.4.5.3.	Hasarın Betonarme Bina Davranışına Etkisinin Belirlenmesi.....	188
3.4.6.	Hasar 6: B-1 Kolonu Üst Ucunda Kabuk Beton Hasarı .....	188
3.4.6.1.	Hasar Varlığının Belirlenmesi .....	188
3.4.6.2.	Hasar Yerinin Belirlenmesi .....	189
3.4.6.3.	Hasarın Betonarme Bina Davranışına Etkisinin Belirlenmesi.....	191
3.4.7.	Hasar 7: A-1 Kolonu Üst Ucu Çekirdek Beton Hasarı.....	191
3.4.7.1.	Hasar Varlığının Belirlenmesi .....	191
3.4.7.2.	Hasar Yerinin Belirlenmesi .....	192
3.4.7.3.	Hasarın Betonarme Bina Davranışına Etkisinin Belirlenmesi.....	193
3.5.	Köprü Modelin Hasar Durumunun Değerlendirilmesi.....	194
3.5.1.	Kolon Üst Ucu Kesit Azalması Hasarı .....	194
3.5.1.1.	Hasar Varlığının Belirlenmesi .....	194
3.5.1.2.	Hasar Yerinin Belirlenmesi .....	195
3.5.1.3.	Hasarın Köprü Davranışına Etkisinin Belirlenmesi .....	197
3.5.2.	Tabliye Hasarı.....	198
3.5.2.1.	Hasar Varlığının Belirlenmesi .....	198
3.5.2.2.	Hasar Yerinin Belirlenmesi .....	199
3.5.2.3.	Hasarın Köprü Davranışına Etkisinin Belirlenmesi .....	201
3.6.	Baraj Modelin Hasar Durumunun Değerlendirilmesi.....	201
3.6.1.	Hasar Varlığının Belirlenmesi .....	201
3.6.2.	Hasar Yerinin Belirlenmesi .....	202
3.6.3.	Hasarın Baraj Davranışına Etkisinin Belirlenmesi .....	203
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	204
5.	KAYNAKLAR .....	210

ÖZGEÇMİŞ

Doktora Tezi

ÖZET

ÇEVRESEL TİTREŞİM VERİLERİ KULLANILARAK YAPILARIN  
HASAR DURUMLARININ TESPİTİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Temel TÜRKER

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Alemdar BAYRAKTAR  
2011, 218 Sayfa

Bu çalışmada, çevresel titreşim altında deneysel olarak ölçülen dinamik karakteristikler dikkate alınarak yapıların hasar durumlarının tespiti ve değerlendirilmesine imkan sağlayan bir yaklaşım ortaya konulmaya çalışılmıştır. Önerilen yaklaşımın uygulanabilirliği, laboratuvar ortamında oluşturulan yapı modelleri üzerinde gerçekleştirilen incelemelerle gösterilmiştir. Sunulan tez çalışması, başlıca dört bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, hasar tespiti konusunda yapılan çalışmalar ile kullanılan analitik ve deneysel yöntemlere ait formülasyonlar verilmektedir. İkinci bölümde, yapıların hasar durumlarının değerlendirilebilmesi amacıyla önerilen yaklaşım verilmekte; çelik konsol kiriş ve iki boyutlu çerçeve modeller ile betonarme tek katlı bina, üç katlı bina, köprü ve baraj modelleri üzerinde farklı hasar durumları için gerçekleştirilen uygulamalar sunulmaktadır. Üçüncü bölümde, hasarlı duruma ait ölçümlerden elde edilen veriler kullanılarak önerilen yaklaşım yardımıyla her bir model için hasarın varlığı, yeri ve yapı davranışına etkisi ortaya konulmaktadır. Dördüncü bölümde ise, yapılan çalışmalardan çıkarılan sonuçlar ve gelecek çalışmalara ışık tutacağı ümit edilen öneriler sunulmaktadır. Çalışma sonucunda, temel mühendislik yapılarını temsil eden laboratuvar modelleri üzerinde gerçekleştirilen incelemelerden, kullanılan yaklaşımın yapıların hasar durumlarının tespiti ve değerlendirilmesinde oldukça etkili olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Analitik Model Güncelleme, Çevresel Titreşim Testi, Dinamik Karakteristikler, Hasar Tespiti, Operasyonel Modal Analiz, Sonlu Eleman Yöntemi

PhD. Thesis

SUMMARY

STRUCTURAL DAMAGE DETECTION AND EVALUATION BY USING AMBIENT  
VIBRATION DATA

Temel TÜRKER

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Civil Engineering Graduate Program  
Supervisor: Prof. Dr. Alemdar BAYRAKTAR  
2011, 218 Pages

In this thesis, an approach that enables to detect and evaluate the damage situation of structures by taking into account experimentally measured dynamic characteristics of structures under ambient vibrations is introduced. The applicability of the proposed approach is indicated by performing investigations on structural laboratory models. The presented thesis consists of mainly four chapters. In the first chapter, the studies performed on damage assessment and the formulations of the used analytical and experimental methods are given. In the second chapter, the approach proposed for the assessments of damage state of structures and the applications carried out for different damage cases on the steel cantilever beam, two dimensional frame models, one-storey reinforced concrete building, three-storey reinforced concrete building, bridge and dam models are presented. In the third chapter, the presence, location and effect on the structural behavior of damages are introduced for each model by using the data from measurements of the damage case with the proposed approach. In the fourth chapter, the results obtained from the performed studies and recommendations shed lights on the future studies are presented. At the end of this study, it is observed from the investigations on the laboratory models of fundamental engineering structures that the used approach is very powerful on the damage detection and assessment of structures.

**Key Words:** Analytical Model Calibration, Ambient Vibration Test, Dynamic Characteristics, Damage Assessment, Operational Modal Analysis, Finite Element Method

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Sonlu Eleman yönteminde kullanılan elemanlar.....	20
Şekil 1.2. Tipik bir Operasyonel Modal Analiz yöntemi ölçüm düzeneği.....	23
Şekil 1.3. B&K8210 tipi darbe çekici .....	25
Şekil 1.4. İvmeölçerlerin genel yapısı .....	26
Şekil 1.5. B&K4507 ve B&K8340 tipi tek eksenli ivmeölçerler .....	27
Şekil 1.6. B&K3560 tipi on yedi kanallı veri toplama ünitesi .....	28
Şekil 1.7. Modal sönüm oranının elde edilmesi .....	34
Şekil 2.1. Analitik model güncelleme yöntemi için uygulanan hesap adımları .....	47
Şekil 2.2. Konsol kiriş modele ait üç boyutlu görünüm ve boyutlar .....	48
Şekil 2.3. Laboratuarda oluşturulan konsol kiriş model.....	48
Şekil 2.4. Konsol kirişe ait başlangıç analitik model .....	49
Şekil 2.5. Konsol kirişe ait başlangıç analitik modelden elde edilen mod şekilleri ....	50
Şekil 2.6. Konsol kiriş için oluşturulan ölçüm düzeni ve ivmeölçer yerleşimi .....	51
Şekil 2.7. Konsol kirişe ait temsili model ve ölçüm düzeni .....	51
Şekil 2.8. Konsol kiriş modelin hasarsız durum için spektral yoğunluk fonksiyonları.....	52
Şekil 2.9. Konsol kiriş modelin hasarsız durum için ilk altı mod şekli.....	53
Şekil 2.10. Konsol kiriş modelde oluşturulan hasar durumu.....	55
Şekil 2.11. Konsol kiriş modelin hasarlı durumu için spektral yoğunluk fonksiyonları.....	56
Şekil 2.12. Konsol kiriş modelin hasarlı durum için mod şekilleri .....	57
Şekil 2.13. İki boyutlu çelik çerçeve modelin görünümü ve boyutları .....	58
Şekil 2.14. Laboratuarda oluşturulan iki boyutlu çerçeve model ve mesnet birleşimleri .....	58
Şekil 2.15. İki boyutlu çerçeveye ait başlangıç analitik modeli .....	59
Şekil 2.16. İki boyutlu çerçeveye ait başlangıç analitik modelden elde edilen mod şekilleri.....	60
Şekil 2.17. İki boyutlu çerçeve modeldeki deneysel ölçüm düzeni ve ivmeölçer yerleşimi .....	61

Şekil 2.18.	İki boyutlu çerçeve modelin ölçümünde kullanılan deneysel ölçüm düzeni .....	61
Şekil 2.19.	İki boyutlu çerçeve modelin hasarsız durum için spektral yoğunluk fonksiyonları.....	62
Şekil 2.20.	İki boyutlu çerçeve modelin hasarsız durum için mod şekilleri.....	63
Şekil 2.21.	İki boyutlu çerçeve modelde oluşturulan kiriş ortası hasarı.....	66
Şekil 2.22.	İki boyutlu çerçeve modelin kiriş ortası hasarı için spektral yoğunluk fonksiyonları.....	66
Şekil 2.23.	İki boyutlu çerçevenin kiriş ortası hasarı için mod şekilleri .....	67
Şekil 2.24.	İki boyutlu çerçeve modelde kolon-kiriş birleşim bölgesi hasarı .....	68
Şekil 2.25.	İki boyutlu çerçeve modelin kolon-kiriş birleşim bölgesi hasarı için spektral yoğunluk fonksiyonları.....	69
Şekil 2.26.	İki boyutlu çerçevenin kolon-kiriş birleşim bölgesi hasarı için mod şekilleri .....	70
Şekil 2.27.	Tek katlı betonarme bina modeli.....	71
Şekil 2.28.	Tek katlı betonarme modelin inşa aşamalarına ait görüntüler .....	71
Şekil 2.29.	Betondan numuneler alınması.....	72
Şekil 2.30.	Beton numunelerde yapılan beton dayanımı ve elastisite tayini deneyleri .	72
Şekil 2.31.	Beton numuneler üzerinde aksenal yükleme deneyinden elde edilen tipik bir gerilme-şekildeğiştirme grafiği .....	73
Şekil 2.32.	Tek katlı betonarme binaya ait analitik modelden görünüşler .....	74
Şekil 2.33.	Tek katlı betonarme bina modelin başlangıç analitik modelinden elde edilen mod şekilleri .....	74
Şekil 2.34.	Tek katlı betonarme bina modelin hasarsız durum ölçümlerine ait görüntüler .....	75
Şekil 2.35.	Tek katlı betonarme bina modelinde kullanılan deneysel ölçüm düzeni ve ivmeölçer yerleşimi.....	75
Şekil 2.36.	Tek katlı betonarme modele ait kararlılık ve spektral yoğunluk fonksiyonları.....	76
Şekil 2.37.	Tek katlı betonarme modelin hasarsız durum için deneysel mod şekilleri .	77
Şekil 2.38.	Tek katlı betonarme modelde kolon üst uçlarında hasar olması durumu....	79
Şekil 2.39.	Tek katlı betonarme modelde kolon üst uçları kabuk betonu hasarı.....	80
Şekil 2.40.	Tek katlı betonarme bina modelde kolon üst ucu hasarları için kararlılık ve spektral yoğunluk fonksiyonları .....	80
Şekil 2.41.	Tek katlı betonarme bina modelde kolon üst uçlarındaki kabuk betonu hasarı için deneysel mod şekilleri .....	82

Şekil 2.42.	Tek katlı betonarme modelde kolon alt uçlarında kabuk betonu hasar durumu .....	83
Şekil 2.43.	Tek katlı betonarme bina modelde kolon alt uçlarında kabuk betonu hasarı için kararlılık ve spektral yoğunluk fonksiyonları.....	83
Şekil 2.44.	Tek katlı betonarme modelin kolon alt uçları hasarlı durum için deneysel mod şekilleri.....	84
Şekil 2.45.	Tek katlı betonarme modelde A-1 kolonu üst ucu göbek betonu hasarı.....	85
Şekil 2.46.	Tek katlı betonarme modelde A-1 kolonu üst ucu göbek betonu hasarı için kararlılık ve spektral yoğunluk fonksiyonları .....	85
Şekil 2.47.	Tek katlı betonarme modelin A-1 kolonu üst ucu göbek betonu hasarı için deneysel mod şekilleri.....	87
Şekil 2.48.	Üç katlı betonarme bina modeli ve boyutları .....	88
Şekil 2.49.	Üç katlı betonarme binanın karkas durumuna ait inşa aşamaları.....	88
Şekil 2.50.	Üç katlı betonarme bina modelinin tuğlalı ve sıvalı durumu .....	89
Şekil 2.51.	Üç katlı betonarme binaya ait başlangıç analitik modellerden görünüşler .	90
Şekil 2.52.	Üç katlı betonarme bina modelin bir katlı karkas durum için mod şekilleri	91
Şekil 2.53.	Üç katlı betonarme bina modelin iki katlı karkas durum için mod şekilleri	91
Şekil 2.54.	Üç katlı betonarme bina modelin üç katlı karkas durum için mod şekilleri	92
Şekil 2.55.	Üç katlı betonarme bina modelin tuğlalı durum için mod şekilleri.....	93
Şekil 2.56.	Üç katlı betonarme bina modelin sıvalı durum için mod şekilleri .....	93
Şekil 2.57.	Üç katlı betonarme bina modelde ivmeölçer yerleşimi.....	95
Şekil 2.58.	Üç katlı betonarme bina modelin inşa aşamalarında yapılan deneysel ölçümlere ait görüntüler .....	95
Şekil 2.59.	Üç katlı betonarme bina modeli üzerinde oluşturulan deneysel ölçüm düzenleri ve ivmeölçer yönleri.....	96
Şekil 2.60.	Üç katlı betonarme modelin bir katlı karkas durumuna ait spektral yoğunluk fonksiyonu.....	97
Şekil 2.61.	Üç katlı betonarme modelin iki katlı karkas durumuna ait spektral yoğunluk fonksiyonu.....	97
Şekil 2.62.	Üç katlı betonarme modelin üç katlı karkas durumuna ait spektral yoğunluk fonksiyonu.....	98
Şekil 2.63.	Üç katlı betonarme modelin tuğlalı durumuna ait spektral yoğunluk fonksiyonu .....	98
Şekil 2.64.	Üç katlı betonarme modelin sıvalı durumuna ait spektral yoğunluk fonksiyonu .....	99
Şekil 2.65.	Üç katlı betonarme bina modelin bir katlı karkas durumuna ait hasarsız deneysel mod şekilleri.....	100

Şekil 2.66.	Üç katlı betonarme bina modelin iki katlı karkas durumuna ait hasarsız deneysel mod şekilleri .....	100
Şekil 2.67.	Üç katlı betonarme bina modelin üç katlı karkas durumuna ait hasarsız deneysel mod şekilleri .....	101
Şekil 2.68.	Üç katlı betonarme bina modelin tuğlalı durumuna ait hasarsız deneysel mod şekilleri .....	102
Şekil 2.69.	Üç katlı betonarme bina modelin sıvalı durumuna ait hasarsız deneysel mod şekilleri .....	103
Şekil 2.70.	Üç katlı betonarme bina modelde Hasar 1 durumu .....	109
Şekil 2.71.	Üç katlı betonarme bina modelde Hasar 1 duruma ait spektral yoğunluk fonksiyonu .....	109
Şekil 2.72.	Üç katlı betonarme bina modelde Hasar 1 durumuna ait deneysel mod şekilleri .....	110
Şekil 2.73.	Üç katlı betonarme bina modelde Hasar 2 durumu .....	111
Şekil 2.74.	Üç katlı betonarme bina modelde Hasar 2 durumu için spektral yoğunluk fonksiyonu .....	111
Şekil 2.75.	Üç katlı betonarme bina modelde Hasar 2 durumuna ait deneysel mod şekilleri .....	112
Şekil 2.76.	Üç katlı betonarme bina modelde Hasar 3 durumu .....	113
Şekil 2.77.	Üç katlı betonarme bina modelde Hasar 3 durumuna ait spektral yoğunluk fonksiyonu .....	113
Şekil 2.78.	Üç katlı betonarme bina modelde Hasar 3 durumuna ait deneysel mod şekilleri .....	114
Şekil 2.79.	Üç katlı betonarme bina modelde Hasar 4 durumu .....	115
Şekil 2.80.	Üç katlı betonarme bina modelde Hasar 4 durumuna ait spektral yoğunluk fonksiyonu .....	115
Şekil 2.81.	Üç katlı betonarme bina modelde Hasar 4 durumuna ait deneysel mod şekilleri .....	116
Şekil 2.82.	Üç katlı betonarme bina modelde Hasar 5 durumu .....	117
Şekil 2.83.	Üç katlı betonarme bina modelde Hasar 5 durumuna ait spektral yoğunluk fonksiyonu .....	117
Şekil 2.84.	Üç katlı betonarme bina modelde Hasar 5 durumuna ait deneysel mod şekilleri .....	118
Şekil 2.85.	Üç katlı betonarme bina modelin Hasar 6 durumu .....	119
Şekil 2.86.	Üç katlı betonarme bina modelin Hasar 6 durumuna ait spektral yoğunluk fonksiyonu .....	119
Şekil 2.87.	Üç katlı betonarme bina modelde Hasar 6 durumuna ait deneysel mod şekilleri .....	120

Şekil 2.88.	Üç katlı betonarme bina modelde Hasar 7 durumu.....	121
Şekil 2.89.	Üç katlı betonarme bina modelin Hasar 7 durumuna ait spektral yoğunluk fonksiyonu.....	121
Şekil 2.90.	Üç katlı betonarme bina modelde Hasar 7 durumuna ait deneysel mod şekilleri.....	122
Şekil 2.91.	Köprü modelinin üç boyutlu görünümü ve kesit özellikleri .....	123
Şekil 2.92.	Köprüye ait başlangıç analitik model.....	124
Şekil 2.93.	Köprünün başlangıç analitik modelinde elde edilen mod şekilleri .....	125
Şekil 2.94.	Köprü model üzerinde ivmeölçer yerleşimi ve ölçüm düzeni.....	126
Şekil 2.95.	Köprü modeli üzerindeki ölçümlerde deneysel ölçüm düzeni ve ivmeölçer yönleri.....	126
Şekil 2.96.	Köprü modelin hasarsız durum için kararlılık diyagramı ve spektral yoğunluk fonksiyonu.....	127
Şekil 2.97.	Köprü modelin hasarsız duruma ait deneysel mod şekilleri .....	128
Şekil 2.98.	Köprü modelde kolon üst ucu hasarı.....	131
Şekil 2.99.	Köprü modelde kolon üst ucu hasarı için kararlılık diyagramı ve spektral yoğunluk fonksiyonları.....	131
Şekil 2.100.	Köprü modelin kolon üst ucu hasarı durumu için mod şekilleri .....	132
Şekil 2.101.	Köprü modelde tabliye hasarı durumu .....	133
Şekil 2.102.	Köprü modelin tabliye hasarlı durumuna ait kararlılık diyagramı ve spektral yoğunluk fonksiyonları.....	134
Şekil 2.103.	Köprü modelde tabliye hasarı için mod şekilleri .....	135
Şekil 2.104.	Baraj modelinin üstten ve önden görünüşleri ile boyutları .....	136
Şekil 2.105.	Laboratuarda oluşturulan baraj modelinin üstten ve önden görünüşleri .....	136
Şekil 2.106.	Barajın başlangıç analitik modeli.....	137
Şekil 2.107.	Barajın başlangıç analitik modeline ait mod şekilleri .....	138
Şekil 2.108.	Baraj modeli üzerinde deneysel ölçüm düzeni ve ivmeölçer yerleşimi .....	139
Şekil 2.109.	Baraj model ölçümünde kullanılan deneysel ölçüm düzeni.....	139
Şekil 2.110.	Baraj modelin hasarsız durumu için kararlılık diyagramı ve spektral yoğunluk fonksiyonları .....	140
Şekil 2.111.	Barajın hasarsız durum ölçümlerinden elde edilen mod şekilleri .....	141
Şekil 2.112.	Baraj modelinde analitik model kalibrasyonundan sonra elastisite değerinin değişimi .....	143
Şekil 2.113.	Baraj modelde hasar dağılımı.....	143
Şekil 2.114.	Baraj modelin hasarlı durum için kararlılık diyagramı ve spektral yoğunluk fonksiyonları .....	144



Şekil 2.115.	Barajın hasarlı durum ölçümlerinden elde edilen mod şekilleri .....	145
Şekil 3.1.	Konsol kiriş modelde kesit ataletinin her bir mod üzerindeki etkisi.....	147
Şekil 3.2.	Konsol kiriş modelde kesit ataletinin toplam modal davranış üzerindeki etkisi .....	148
Şekil 3.3.	Konsol kiriş modelde hasarlı durum için kesit atalet değerlerindeki değişimler .....	148
Şekil 3.4.	Konsol kiriş modelin hasarlı durum için deneysel ve analitik mod şekilleri .....	149
Şekil 3.5.	Konsol kiriş model üzerinde statik yükleme durumu.....	150
Şekil 3.6.	İki boyutlu çelik çerçeve modelde kesit ataletinin her bir mod üzerindeki etkisi .....	152
Şekil 3.7.	İki boyutlu çelik çerçeve modelde kesit ataletinin toplam modal davranış üzerindeki etkisi.....	153
Şekil 3.8.	İki boyutlu çelik çerçeve modelde kiriş ortası hasar durumu için kesit atalet değerindeki değişimler .....	153
Şekil 3.9.	İki boyutlu çelik çerçeve modelde kiriş ortası hasar durumuna ait deneysel ve analitik mod şekilleri .....	155
Şekil 3.10.	İki boyutlu çerçeve model üzerinde statik yükleme durumu .....	156
Şekil 3.11.	İki boyutlu çelik çerçeve modelde kolon-kiriş birleşim bölgesi hasar durumu için kesit atalet değerindeki değişimler .....	158
Şekil 3.12.	İki boyutlu çelik çerçeve modelde kiriş ortası ve kolon-kiriş birleşim bölgesi hasarları için kesit atalet değerindeki değişimler.....	159
Şekil 3.13.	İki boyutlu çelik çerçeve modelde kiriş ortası ve kolon-kiriş birleşim bölgesi hasarları için deneysel ve analitik mod şekilleri.....	160
Şekil 3.14.	Tek katlı betonarme bina modelde kesit ataletinin her bir mod üzerindeki etkisi .....	162
Şekil 3.15.	Tek katlı betonarme bina modelde kesit ataletinin toplam modal davranış üzerindeki etkisi.....	163
Şekil 3.16.	Tek katlı betonarme bina modelde kolon üst uçlarındaki hasar durumu için atalet değerindeki değişimler .....	164
Şekil 3.17.	Tek katlı betonarme bina modelde kolon üst uçlarının hasarlı olması durumu için deneysel ve analitik mod şekilleri.....	165
Şekil 3.18.	Tek katlı betonarme bina modelde statik yükleme durumu .....	165
Şekil 3.19.	Tek katlı betonarme modelde kolon alt uçları kabuk betonu hasar durumu için kesit atalet değerindeki değişimler .....	167
Şekil 3.20.	Tek katlı betonarme modelde kolon alt uçlarındaki hasarlar için deneysel ve analitik mod şekilleri .....	168
Şekil 3.21.	Tek katlı betonarme bina modelde köşe kolon üst ucu hasar durumu için kesit ataletindeki değişimler.....	170

Şekil 3.22.	Tek katlı betonarme bina modelde köşe kolon üst ucu hasar durumu için deneysel ve analitik mod şekilleri .....	171
Şekil 3.23.	Üç katlı betonarme bina modelde duvar kalınlıklarının her bir mod üzerine etkisi .....	173
Şekil 3.24.	Üç katlı betonarme bina modelde duvar kalınlıklarının toplam modal davranış üzerindeki etkisi.....	173
Şekil 3.25.	Üç katlı betonarme bina modelde 1 aksındaki duvarın çatlaması hasar durumu için duvar kalınlıklarındaki değişimler .....	174
Şekil 3.26.	Üç katlı betonarme bina modelde 1 aksındaki duvarın çatlaması hasar durumu için deneysel ve analitik mod şekilleri.....	175
Şekil 3.27.	Üç katlı betonarme bina modeli üzerinde statik yükleme durumu.....	176
Şekil 3.28.	Üç katlı betonarme bina modelde 1 aksındaki duvarın tamamen yıkılması hasar durumu için duvar kalınlıklarındaki değişimler.....	178
Şekil 3.29.	Üç katlı betonarme bina modelde 1 aksındaki duvarın yıkılması hasar durumu için deneysel ve analitik mod şekilleri.....	179
Şekil 3.30.	Üç katlı betonarme bina modelde 2 ve 3 aksları arasındaki duvarın tamamen göçmesi hasarı için duvar kalınlıklarının değişimi.....	181
Şekil 3.31.	Üç katlı betonarme bina modelde 2 ve 3 aksları arasındaki duvarın göçmesi hasarı için deneysel ve analitik mod şekilleri .....	182
Şekil 3.32.	Üç katlı betonarme bina modelde 1. kattaki dolgu duvarların tamamen göçmesi hasarı için duvar kalınlıklarının değişimi .....	184
Şekil 3.33.	Üç katlı betonarme bina modelde 1. kattaki bütün duvarların göçmesi hasarı için deneysel ve analitik mod şekilleri.....	185
Şekil 3.34.	Üç katlı betonarme bina modelde A-1 kolun üst ucu kabuk betonu hasar durumu için atalet değerindeki değişimler .....	187
Şekil 3.35.	Üç katlı betonarme bina modelde kolon üst ucu kabuk betonu hasarı için deneysel ve analitik mod şekilleri .....	188
Şekil 3.36.	Üç katlı betonarme bina modelde B-1 kolonu üst ucu kabuk betonu hasar durumu için atalet değerindeki değişimler.....	189
Şekil 3.37.	Üç katlı betonarme bina modelde B-1 kolonu üst ucu kabuk betonu hasarı için deneysel ve analitik mod şekilleri.....	190
Şekil 3.38.	Üç katlı betonarme bina modelde B-1 kolon üst ucunda çekirdek betonu hasar durumu için atalet değerindeki değişimler.....	192
Şekil 3.39.	Üç katlı betonarme bina modelde A-1 kolonu üst ucu çekirdek betonu hasarı için deneysel ve analitik mod şekilleri.....	193
Şekil 3.40.	Köprü modelde kesit ataletinin her bir mod üzerindeki etkisi .....	195
Şekil 3.41.	Köprü modelde kesit ataletinin toplam modal davranış üzerindeki etkisi ..	195
Şekil 3.42.	Köprü modelde sol taraftaki kolonun üst ucu hasar durumu için atalet değerindeki değişimler .....	196

Şekil 3.43.	Köprü modelde kolon üst ucu hasar durumu için deneysel ve analitik mod şekilleri.....	197
Şekil 3.44.	Köprü model üzerinde statik yükleme durumu .....	198
Şekil 3.45.	Köprü modelin hasarlı durumu için atalet değerindeki değişimler .....	199
Şekil 3.46.	Köprü modelde tabliye hasar durumu için deneysel ve analitik mod şekilleri .....	200
Şekil 3.47.	Baraj modelde hasarlı durum için her bir elemanda beton kalınlığının değişimi .....	202
Şekil 3.48.	Baraj modelde statik yükleme durumu.....	203

## TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. B&K8210 tipi darbe çekicine ait bazı özellikler .....	25
Tablo 1.2. B&K4507 ve B&K8340 tipi tek eksenli ivmeölçerlere ait bazı özellikler.	27
Tablo 2.1. Konsol giriş modele ait malzeme ve kesit özellikleri.....	49
Tablo 2.2. Konsol girişe ait başlangıç analitik modelden elde edilen doğal frekanslar	50
Tablo 2.3. Konsol giriş modelin hasarsız durum için ölçülen doğal frekansları ve modal sönüm oranları .....	52
Tablo 2.4. Konsol giriş modelin hasarsız durum için deneysel ve başlangıç analitik frekansları ve MGK değerleri.....	54
Tablo 2.5. Konsol giriş modelin kalibre edilmiş duruma ait deneysel ve analitik frekans değerleri ile MGK değerleri .....	54
Tablo 2.6. Konsol giriş modelin hasarlı durum için ölçülen doğal frekansları ve modal sönüm oranları .....	56
Tablo 2.7. İki boyutlu çerçeve modelin malzeme ve kesit özellikleri .....	59
Tablo 2.8. İki boyutlu çerçeveye ait başlangıç analitik modelden elde edilen ilk altı doğal frekans değeri .....	60
Tablo 2.9. İki boyutlu çerçeve modelin hasarsız durum için ölçülen doğal frekansları ve modal sönüm oranları .....	62
Tablo 2.10. İki boyutlu çerçevenin hasarsız durum için deneysel ve başlangıç analitik frekansları ile MGK değerleri .....	64
Tablo 2.11. İki boyutlu çerçevenin kalibre edilmiş durum için deneysel ve analitik frekansları ile MGK değerleri .....	65
Tablo 2.12. İki boyutlu çerçevenin giriş ortası hasarı için ölçülen doğal frekansları ve modal sönüm oranları .....	67
Tablo 2.13. İki boyutlu çerçevenin kolon-giriş birleşim bölgesi hasar durumu için ölçülen doğal frekansları ve modal sönüm oranları .....	69
Tablo 2.14. Tek katlı betonarme binanın başlangıç analitik modelden elde edilen ilk üç doğal frekansı .....	74
Tablo 2.15. Tek katlı betonarme binanın hasarsız durum için ölçülen doğal frekansları ve modal sönüm oranları .....	77
Tablo 2.16. Tek katlı betonarme bina modelde hasarsız durum için deneysel ve başlangıç analitik frekanslar ile MGK değerleri.....	78

Tablo 2.17.	Tek katlı betonarme bina modelde kalibre edilmiş durum için deneysel ve analitik frekanslar ile MGK değerleri.....	78
Tablo 2.18.	Tek katlı betonarme binanın kolon üst ucu kabuk betonu hasarı için ölçülen doğal frekansları ve modal sönüm oranları .....	81
Tablo 2.19.	Tek katlı betonarme binanın kolon alt ucu kabuk betonu hasarları için ölçülen doğal frekansları ve modal sönüm oranları .....	84
Tablo 2.20.	Tek katlı betonarme binanın kolon üst ucu göbek betonu hasarı için ölçülen doğal frekansları ve modal sönüm oranları .....	86
Tablo 2.21.	Üç katlı betonarme modelin inşasında kullanılan malzemelerin özellikleri.....	90
Tablo 2.22.	Üç katlı betonarme modelin inşa aşamalarına bağlı başlangıç analitik modellerden elde edilen doğal frekansları.....	91
Tablo 2.23.	Üç katlı betonarme modelin inşa aşamalarına bağlı deneysel doğal frekansları .....	99
Tablo 2.24.	Üç katlı betonarme bina modelin bir katlı karkas durumu için hasarsız deneysel ve başlangıç analitik frekansları ile MGK değerleri.....	104
Tablo 2.25.	Üç katlı betonarme bina modelin iki katlı karkas durumu için hasarsız deneysel ve başlangıç analitik frekansları ile MGK değerleri.....	104
Tablo 2.26.	Üç katlı betonarme bina modelin üç katlı karkas durumu için hasarsız deneysel ve başlangıç analitik frekansları ile MGK değerleri .....	104
Tablo 2.27.	Üç katlı betonarme bina modelin tuğlalı durumu için hasarsız deneysel ve başlangıç analitik frekansları ile MGK değerleri .....	105
Tablo 2.28.	Üç katlı betonarme bina modelin sıvalı durumu için hasarsız deneysel ve başlangıç analitik frekansları ile MGK değerleri .....	105
Tablo 2.29.	Üç katlı betonarme bina modelin bir katlı karkas durum için hasarsız deneysel ve kalibre analitik frekansları ile MGK değerleri .....	106
Tablo 2.30.	Üç katlı betonarme bina modelin iki katlı karkas durum için hasarsız deneysel ve kalibre analitik frekansları ile MGK değerleri .....	106
Tablo 2.31.	Üç katlı betonarme bina modelin üç katlı karkas durumu için hasarsız deneysel ve kalibre analitik frekansları ile MGK değerleri .....	107
Tablo 2.32.	Üç katlı betonarme bina modelin tuğlalı durumu için hasarsız deneysel ve kalibre analitik frekansları ile MGK değerleri .....	107
Tablo 2.33.	Üç katlı betonarme bina modelin sıvalı durumu için hasarsız deneysel ve başlangıç analitik frekansları ile MGK değerleri .....	108
Tablo 2.34.	Üç katlı betonarme bina modelin Hasar 1 durumu için ölçülen doğal frekansları ve modal sönüm oranları .....	110
Tablo 2.35.	Üç katlı betonarme bina modelin Hasar 2 durumu için ölçülen doğal frekansları ve modal sönüm oranları .....	112

Tablo 2.36.	Üç katlı betonarme bina modelin Hasar 3 durumu için ölçülen doğal frekansları ve modal sönüm oranları .....	114
Tablo 2.37.	Üç katlı betonarme bina modelin Hasar 4 durumu için ölçülen doğal frekansları ve modal sönüm oranları .....	116
Tablo 2.38.	Üç katlı betonarme bina modelin Hasar 5 durumu için ölçülen doğal frekansları ve modal sönüm oranları .....	118
Tablo 2.39.	Üç katlı betonarme bina modelin Hasar 6 durumu için ölçülen doğal frekansları ve modal sönüm oranları .....	120
Tablo 2.40.	Üç katlı betonarme bina modelin Hasar 7 durumu için ölçülen doğal frekansları ve modal sönüm oranları .....	122
Tablo 2.41.	Köprünün başlangıç analitik modeli için yay sabitleri.....	124
Tablo 2.42.	Köprü modelin malzeme ve kesit özellikleri.....	124
Tablo 2.43.	Köprünün başlangıç analitik modelinden elde edilen doğal frekanslar .....	125
Tablo 2.44.	Köprü modelin hasarsız durum için ölçülen doğal frekansları ve modal sönüm oranları .....	128
Tablo 2.45.	Köprü modelin hasarsız durum için deneysel ve başlangıç analitik frekansları ile MGK değerleri .....	129
Tablo 2.46.	Köprü modelin deneysel ve kalibre edilmiş durum için analitik frekansları ile MGK değerleri .....	130
Tablo 2.47.	Köprü modelin kalibre edilmiş durum için mesnetlerdeki yay sabitleri ....	130
Tablo 2.48.	Köprü modelin kolon üst ucu hasarı için ölçülen doğal frekansları ve modal sönüm oranları .....	132
Tablo 2.49.	Köprü modelde tabliye hasarı için doğal frekanslar ve modal sönüm oranları .....	134
Tablo 2.50.	Barajın başlangıç analitik modelde kullanılan malzeme özellikleri.....	137
Tablo 2.51.	Barajın başlangıç analitik modelinden elde edilen doğal frekansları.....	137
Tablo 2.52.	Barajın hasarsız durum için ölçülen doğal frekansları ve modal sönüm oranları .....	140
Tablo 2.53.	Baraj modelin hasarsız durumu için deneysel ve başlangıç analitik frekansları ile MGK değerleri .....	141
Tablo 2.54.	Baraj modelin kalibre edilmiş durumu için doğal frekansları.....	142
Tablo 2.55.	Baraj modelde hasarlı durum için ölçülen doğal frekanslar ve modal sönüm oranları .....	145
Tablo 3.1.	Konsol giriş model için hasarlı duruma ait deneysel ve kalibre edilmiş analitik frekanslar ile MGK değerleri .....	146
Tablo 3.2.	Konsol giriş modelin hasarlı durumu için deneysel ve analitik frekanslar	149
Tablo 3.3.	İki boyutlu çelik çerçeve modelde giriş ortası hasar durumu için deneysel ve kalibre edilmiş analitik frekanslar ile MGK değerleri.....	151

Tablo 3.4.	İki boyutlu çelik çerçeve modelde kiriş ortası hasar durumu için deneysel ve analitik frekanslar ile MGK değerleri.....	154
Tablo 3.5.	İki boyutlu çelik çerçeve modelde kolon-kiriş birleşim bölgesi hasar durumuna ait deneysel ve hasar öncesi analitik frekanslar ile MGK değerleri .....	157
Tablo 3.6.	İki boyutlu çelik çerçeve modelde kiriş ortası ve kolon-kiriş birleşim bölgesi hasar durumları için deneysel ve analitik frekanslar ile MGK değerleri .....	159
Tablo 3.7.	Tek katlı betonarme bina modelde kolon üst uçlarında kabuk betonu hasar durumu için deneysel ve kalibre edilmiş analitik frekanslar ile MGK değerleri .....	161
Tablo 3.8.	Tek katlı betonarme bina modelde kolon üst uçları hasarlı durum ait deneysel ve analitik frekanslar ile MGK değerleri.....	164
Tablo 3.9.	Tek katlı betonarme bina modelde kolonların alt uçlarındaki hasar durumu için deneysel ve hasar öncesi analitik frekanslar ile MGK değerleri .....	166
Tablo 3.10.	Tek katlı betonarme bina modelde kolon alt uçları hasar durum için deneysel ve analitik frekanslar ile MGK değerleri.....	167
Tablo 3.11.	Tek katlı betonarme modelde köşe kolon üst ucu hasar durumu için deneysel ve hasar öncesi analitik frekanslar ile MGK değerleri.....	169
Tablo 3.12.	Tek katlı betonarme bina modelde köşe kolon üst ucu hasar durumu için deneysel ve analitik frekanslar ile MGK değerleri.....	170
Tablo 3.13.	Üç katlı betonarme bina modelde 1 aksındaki duvarın çatlaması hasarı için deneysel ve kalibre edilmiş analitik frekanslar ile MGK değerleri.....	172
Tablo 3.14.	Üç katlı betonarme bina modelde 1 aksındaki duvarın çatlaması hasarı için deneysel ve analitik frekanslar ile MGK değerleri.....	175
Tablo 3.15.	Üç katlı betonarme bina modelde 1 aksındaki duvarın yıkılması hasar durumu için deneysel ve hasar öncesi analitik frekanslar ile MGK değerleri .....	177
Tablo 3.16.	Üç katlı betonarme bina modelde duvarın göçmesi hasarı için deneysel ve analitik frekanslar ile MGK değerleri.....	178
Tablo 3.17.	Üç katlı betonarme bina modelde tuğla duvar yıkılması hasarı için deneysel ve hasar öncesi analitik frekanslar ile MGK değerleri.....	180
Tablo 3.18.	Üç katlı betonarme bina modelde 2 ve 3 aksları arasındaki duvarın göçmesi hasarı için deneysel ve analitik frekanslar ile MGK değerleri.....	181
Tablo 3.19.	Üç katlı betonarme bina modelde 1. kattaki bütün duvar yıkılması hasar durumu için deneysel ve hasar öncesi analitik frekanslar ile MGK değerleri .....	183
Tablo 3.20.	Üç katlı betonarme bina modelde 1. kattaki bütün duvarların göçmesi hasarı için deneysel ve analitik frekanslar ile MGK değerleri .....	184

Tablo 3.21.	Üç katlı betonarme bina modelde A-1 kolonu üst ucu kabuk betonu hasarı için deneysel ve hasar öncesi analitik frekanslar ile MGK değerleri .....	186
Tablo 3.22.	Üç katlı betonarme bina modelde A-1 kolonu üst ucu kabuk betonu hasarı için deneysel ve analitik frekanslar ile MGK değerleri .....	187
Tablo 3.23.	Üç katlı betonarme bina modelde B-1 kolonu üst ucu kabuk betonu hasarı için deneysel ve hasar öncesi analitik frekanslar ile MGK değerleri .....	189
Tablo 3.24.	Üç katlı betonarme bina modelde B-1 kolonu üst ucu kabuk betonu hasarı için deneysel ve analitik frekanslar ile MGK değerleri .....	190
Tablo 3.25.	Üç katlı betonarme bina modelde A-1 kolon üst ucu çekirdek betonu hasarı için deneysel ve hasar öncesi analitik frekanslar ile MGK değerleri .....	191
Tablo 3.26.	Üç katlı betonarme bina modelde A-1 kolonu üst ucu çekirdek betonu hasarı için deneysel ve analitik frekanslar ile MGK değerleri .....	193
Tablo 3.27.	Köprü modelde kolon üst ucu hasar durum için deneysel ve kalibre edilmiş analitik frekanslar ile MGK değerleri.....	194
Tablo 3.28.	Köprü modelde kolon üst ucu hasar durum için deneysel ve analitik frekanslar ile MGK değerleri .....	196
Tablo 3.29.	Köprü modelde tabliye hasarlı durum için deneysel ve hasar öncesi analitik frekanslar ile MGK değerleri .....	199
Tablo 3.30.	Köprü modelde tabliye hasarlı durum için deneysel ve analitik frekanslar ile MGK değerleri .....	200
Tablo 3.31.	Baraj modelde hasarlı durum için deneysel ve kalibre edilmiş analitik frekanslar ile MGK değerleri .....	201
Tablo 3.32.	Baraj modelde hasarlı duruma ait deneysel ve analitik frekanslar ile MGK değerleri .....	203



## SEMBOLLER DİZİNİ

$a_0, a_n$	Fourier dönüşümü katsayı fonksiyonları
$A_*$	Durum matrisi
$A_k$	Tepki sinyalinin güç spektral yoğunluk fonksiyonuna ait k. artık değer matrisi
ASCE	Amerika İnşaat Mühendisleri Topluluğu
$B_k$	Tepki sinyalinin güç spektral yoğunluk fonksiyonuna ait k. artık değer matrisi
$b_n$	Fourier dönüşümü katsayı fonksiyonları
$B_*$	Veri matrisi
$C_*$	Sistem davranış matrisi
[C]	Sönüm matrisi
$D_*$	Doğrudan iletim matrisi
f	Frekans
$f^a$	Analitik frekans
$f^d$	Deneysel frekans
{f(t)}	Zaman bağımlı kuvvet vektörü
$G_{xx}(j\omega)$	Etki sinyalinin güç spektral yoğunluk fonksiyonu
$G_{yy}(j\omega)$	Tepki sinyalinin güç spektral yoğunluk fonksiyonu
H	Hata oranı
$\bar{H}$	Kompleks eşlenik ve transpoze
$H(j\omega)$	Frekans davranış fonksiyonu
IASC	Uluslararası Yapısal Kontrol Birliği
k	Rijitlik
[K]	Rijitlik matrisi
m	Kütle
$m_r$	Genelleştirilmiş kütle matrisi
[M]	Kütle matrisi
N	Ayrık değer sayısı
P	Parametre
$P_0$	Değişkenlerin başlangıç değerleri
$P_u$	Değişkenlerin güncellenmiş değerleri

$R$	Sisteme etkiyen ve zamanla değişen dış yük vektörü
$R_a$	Başlangıç analitik sonuçları
$R$	Tepki değerleri
$R_k$	Artık değer fonksiyonu
$R_d$	Deneysel lm sonuçları
$s_{ij}$	Skaler tekil değerler
$S_i$	Skaler tekil değerleri içeren diyagonal matris
$[S]$	Duyarlılık matrisi
$t$	Zaman
$T$	Periyot
$u_{ij}$	Tekil vektör
$U$	Zamana bağlı yerdeğiştirme vektörü
$\dot{U}$	Zamana bağlı hız vektörü
$\ddot{U}$	Zamana bağlı ivme vektörü
$U_i$	Tekil vektörleri içeren bütün matris
YK	Yakınsama kriteri
$X$	Yerdeğiştirme genliği
$x_t$	Durum vektörü
$u_t$	Zamana bağımlı yerdeğiştirme
$\{U(t)\}$	Zaman bağımlı yerdeğiştirme vektörü
$\{\dot{U}(t)\}$	Zaman bağımlı hız vektörü
$\{\ddot{U}(t)\}$	Zaman bağımlı ivme vektörü
$[U]$	Genlik
$v_t$	İvmeölçer kusurları
$\omega$	Sönümsüz doğal açısal frekans
$\omega_d$	Sönümlü doğal açısal frekans
$w_k$	Modeldeki belirsizlikler
$[\psi]$	Modal matris
$[\phi]$	Normalleştirilmiş mod Şekilleri
$\lambda_k$	Kutup fonksiyonu
$\delta$	Frekanslardaki değişim oranı
*	Kompleks eşlenik
$\delta_{pq}$	Kronecker delta

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Günümüzde binalar, köprüler, barajlar gibi birçok mühendislik yapısı insan hayatında önemli bir yere sahiptir. Binalar barınma ihtiyacımızı karşılarken; köprüler ulaşım, barajlar ise enerji ve su ihtiyaçlarımızı karşılamaktadır. Bu mühendislik yapılarının ihtiyaçlarımızı karşılamada devamlılığının sağlanabilmesi ancak gerekli bakım ve onarımlarının gerçekleştirilmesiyle mümkündür. Deprem, sel, patlama, çarpma gibi birçok nedenden dolayı bu yapılarda hasar oluşması ve oluşan hasarlara karşı yeterince önlem alınmaması sonucunda yapıların kullanım dışı kalması durumları meydana gelebilir. Bu gibi durumlar ise hem can kayıplarına hem de büyük maddi kayıplara neden olabilmektedir.

Geçmişte, Ülkemizde bazı binaların aniden yıkıldığına şahit olunmuş ve oluşan maddi ve manevi kayıplar birçok insanımızı etkilemiştir. Depremlerden sonra birçok binada hasar meydana gelmiş ve çok büyük can kayıpları oluşmuştur. Depremlerden sonra binalarının hasar düzeylerini bilemedikleri için çoğu kişi evine girememiş, sokaklarda yaşamak zorunda kalmış ve birçok mağduriyetle karşılaşmıştır. Benzer şekilde, olası bir afetten dolayı Asya ile Avrupa arasındaki bağlantıyı sağlayan boğaz köprülerinin kullanım dışı kalmasının, Ülkemiz açısından doğuracağı ekonomik kaybı ve rezervuarında biriktirilen su hacmi düşünüldüğünde Güneydoğu Anadolu bölgemizdeki bir barajın hasar görmesi sonucu ortaya çıkabilecek felaketin boyutlarını tahmin etmek oldukça zor olacaktır. Bu açıdan bakıldığında önemli mühendislik yapılarının takip edilmesi ve yapısal davranışlarındaki olası değişikliklerin ve sebeplerin ortaya konulması oldukça önem arz etmektedir.

Gelişen bilgi, teknoloji ve elektronik cihazlar yapıların davranışlarının gözlemlenmesine imkan sağlamaktadır. Bu bağlamda, geliştirilen sismik düzeydeki titreşimleri ölçme yeteneğine sahip ivmeölçerlerle yapıların tepkileri istenilen noktalarda ölçülebilmektedir. Farklı durumlar için ölçülen ivme sinyallerinin analiz edilmesi ve elde edilen sonuçların karşılaştırılmasıyla, yapı davranışında değişiklik olup olmadığı belirlenebilmektedir. Bu amaçla yaygın olarak kullanılan yöntem Deneysel Modal Analiz yöntemidir. Günümüzde birçok mühendislik alanında kendine uygulama alanı bulan

deneysel modal analiz çalışmalarının temelleri, 1940'lı yıllarda demiryolu raylarındaki hasarların belirlenmesi amacıyla balyozlarla raylara vurularak oluşturulan titreşimlerin gözlemlenmesiyle atılmıştır. Burada kullanılan yöntemin esası, yapıya bir titreşim verilmesi ve yapıda bu titreşime karşı oluşan tepkilerin ölçülmesine dayanmaktadır. Yapıyı titreştirmek amacıyla uygulanan etkinin bilinip bilinmemesine bağlı olarak deneysel modal analiz uygulamaları, Geleneksel Deneysel Modal Analiz ve Operasyonel Modal Analiz olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Geleneksel Deneysel Modal Analiz yönteminde yapıya uygulanan etkinin ve yapının bu etkiye gösterdiği tepkinin bilinmesi gerekmektedir; yapı dinamik davranışı tepki değerlerine ait spektral fonksiyonların etki değerine ait spektral fonksiyona oranlanmasıyla elde edilmektedir. Bu yöntem, etki değerinin bilinmesini de gerektirdiğinden Zorlanmış Titreşim Testi olarak da adlandırılmaktadır. Operasyonel Modal Analiz yönteminde ise yapıya uygulanan etkinin bilinmesine gerek yoktur. Bu yöntemde, yapının rüzgar, taşıt yükü, insan hareketi gibi rastgele etkiler altında titreştirildiği varsayılmakta ve yapı dinamik karakteristikleri tepki sinyallerinin spektral yoğunluk fonksiyonlarının gerek zaman gerekse frekans tanım alanında değerlendirilmesiyle belirlenebilmektedir. Bu yöntemde de yapıyı titreştirmek amacıyla rastgele çevresel titreşimlerden yararlanıldığı için Çevresel Titreşim Testi olarak da adlandırılmaktadır. Deneysel modal analiz yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilen ölçümlerden, yapıya ait dinamik karakteristikler olarak adlandırılan doğal frekanslar, mod şekilleri ve modal sönüm oranları elde edilmektedir. Bu dinamik karakteristikler yapı dinamik davranışının belirlenmesinde kullanılan başlıca parametreler olduğundan, bu karakteristiklerin yapının mevcut davranışını yansıtacak şekilde gerçekçi olarak belirlenmesi oldukça önemlidir.

Yapıların projelendirilme aşamasında, öncelikle yapıları temsil edecek analitik modeller oluşturulmakta ve bu modeller üzerinde farklı yükleme durumları için statik ve dinamik analizler gerçekleştirilmektedir. Fakat çoğu durumda oluşturulan analitik modeller gerçek yapı davranışını tam olarak temsil edememektedir. Yapı davranışındaki farklılıkların belirlenmesinde ve giderilmesinde, dinamik karakteristiklerin karşılaştırılması pratik bir çözüm olarak ortaya çıkmaktadır. Yapının gerçek durumuna ait deneysel modal analiz yöntemleriyle elde edilmiş dinamik karakteristiklerin mevcut olması durumunda, deneysel sonuçları sağlayacak şekilde analitik model üzerinde değişiklikler yapılarak analitik modelin kalibre edilmesi oldukça etkili olmaktadır. Böylece yapıların gerçek durumlarını temsil eden analitik modeller elde edilebilmektedir.

Deprem, sel, patlama, çarpma gibi beklenmeyen etkiler ile inşa aşamasında yeterli özenin gösterilmemesi, kalitesiz malzeme kullanılması gibi birçok nedenden dolayı yapılarda yerel ya da tüm sistemde yayılı hasarlar oluşabilmektedir. Bu hasarlar da yapının dinamik karakteristiklerinde değişimlere sebep olmaktadır. Bu değişimler, deneysel modal analiz yöntemleriyle ölçümler yapılarak elde edilen verilerin hasarsız durumla karşılaştırılmasıyla ortaya konulabilmektedir. Her bir hasar durumunun yapı dinamik karakteristiklerinde farklı bir etkiye sahip olması, analitik model üzerinde hasarlı elemanlar oluşturup analizler yaparak ve analiz sonuçlarını deneysel sonuçlarla karşılaştırarak hasar tespiti ve değerlendirmesi yapabilmeyi mümkün kılmaktadır.

Geçmişte inşa edilmiş birçok yapıda gerek tasarım ve imalat aşamalarındaki hatalardan gerekse doğal afetlerden ve aşırı yük taleplerinden dolayı birçok hasarlar meydana geldiği bilinmektedir. Özellikle Ülkemizin aktif bir deprem kuşağı üzerinde olması, 70 milyonu aşan nüfusumuz, coğrafi konumumuz itibariyle kıtaları birbirine bağlayan köprülerimiz ve çok büyük su kütlelerini arkalarında tutan barajlarımız dikkate alındığında; hasar tespiti ve değerlendirilmesi konusunun Ülkemiz açısından önemi açıkça anlaşılmaktadır.

## **1.2. Hasar Tespiti Üzerine Yapılmış Çalışmalar**

Yapısal hasarların belirlenmesinde kullanılan temel yaklaşım, yapının rijitliğinde meydana gelen bir azalmanın veya hasarın yapının dinamik davranışında meydana getireceği değişimdir. Bu değişim doğal frekans, mod şekli ve sönüm oranı olarak bilinen dinamik karakteristiklerde ortaya çıkmaktadır. Hasar tespiti konusunda yaygın olarak kabul gören sınıflandırma Rytter (1993) tarafından yapılmıştır. Bu sınıflandırmaya göre,

1. *Seviye:* Yapıda hasar olup olmadığının tespit edilmesi
2. *Seviye:* Hasar mevcut ise hasar yerinin belirlenmesi
3. *Seviye:* Yeri belirlenen hasarın büyüklüğünün belirlenmesi
4. *Seviye:* Hasarın yapı davranışına etkisinin belirlenmesi

şeklinde dört hasar değerlendirme seviyesi ortaya konulmuştur.

Hasar tespiti üzerine gerçekleştirilen çalışmaları başlıca teorik ve deneysel çalışmalar olmak üzere iki gruba ayırmak mümkündür. Teorik çalışmalarda, hasarlı durumlar için deneysel ölçümlerden elde edilen dinamik karakteristikler kullanılarak analitik modeller oluşturulmuş; analitik ve deneysel sonuçlar geliştirilen birçok yöntem kullanılarak

karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmalarda ise hasarsız ve hasarlı durumlar için deneysel ölçümlerden elde edilen veriler birbiriyle karşılaştırılmıştır. Sadece deneysel veriler tam bir hasar değerlendirme yapmak için yeterli olmadığından, çoğu durumda analitik sonuçlarla karşılaştırmalı olarak değerlendirme yapılmıştır. Hasar değerlendirmeyle ilgili yapılan ilk çalışmalarda doğal frekanslar, sonraki çalışmalarda ise mod şekilleri ve modal sönüm oranları dikkate alınmıştır. Son yıllarda ise özellikle analitik modellerin güncellenmesine dayalı hasar tespit uygulamaları daha fazla tercih edilir hale gelmiştir. Son 20 yıl içerisinde hasar tespiti konusunda birçok çalışma yapılmıştır. Bu kısımda, tezin amacına uygun olarak gerçekleştirilen başlıca çalışmalar kronolojik sıraya göre aşağıda verilmektedir.

Birçok araştırmacı, modeller ve gerçek yapılar üzerinde gerçekleştirdikleri ölçümlerde rezonans frekanslarının mesnet kusurlarından, çatlak gelişiminden, kayma çatlaklarından ve aşırı yüklemeye dayalı içsel çatlaklardan dolayı değiştiğini ortaya koymuştur (Mazurek ve Dewolf, 1990; Salane ve Baldwin, 1990; Agardh, 1991; Haroun vd., 1993; Kroggel, 1993; Rytter ve Kirkegaard, 1994).

Moradalizadeh (1990), çerçeve sistemlerde nispeten daha yüksek gerilmelerin olduğu bölgelerdeki hasarların, rezonans frekanslarında %15'lere varan önemli azalmalar oluşturduğunu belirlemiştir.

Gerilmelerin yüksek değerlere ulaştığı bölgelerde hasar meydana geldiği yaklaşımına dayalı olarak geliştirilen hasar tespit yöntemi Ju ve Mimovich (1986) ile Gomes ve Silva (1990) tarafından sunulmuştur. Bu çalışmalardan, hasarın gerilmenin düşük değerlere sahip olduğu bölgelere yakın olması durumunda rezonans frekanslarına dayalı hasar tespiti yönteminin güvenilir olmadığı sonucuna varılmıştır. Bu nedenle, eğer hasar önemli bir taşıyıcı elemanda oluşmamışsa, sadece frekanslardaki değişimlerin dikkate alınmasının yapının bütünlüğünü değerlendirmek için yeterli olmadığı belirtilmiştir.

Stubbs ve Osegueda (1990a, 1990b), frekanslardaki değişimin duyarlılığına bağlı hasar tespit yöntemi geliştirmişlerdir. Bu yöntemde deneysel olarak belirlenen frekanslar ile sayısal olarak türetilen duyarlılık matrisi kullanılarak hasarın yeri ve şiddeti belirlenebilmiştir. Geliştirilen yöntemin uygulanabilirliği, laboratuvar ortamında konsol kiriş model üzerinde yapılan ölçümlerle gösterilmiştir.

Mirza vd. (1990), her bir titreşim modunun yapı eksenini kestiği noktaları gösteren ve modal nokta olarak tanımlanan noktalarda gerilmelerin bazı özel titreşim modları için en düşük değerleri aldığını belirlemiştir. Bu durumun, bu frekansta meydana gelen küçük değişimlerin ilgili modal düğüm noktasına yakın bir bölgedeki kusurdan olduğu

ifade edilmiştir. Diğer frekanslardaki değişimler ise hasarın şiddetini belirlemekte kullanılmıştır. 1/7 ölçekli basit mesnetli bir ve iki gözlü köprü kirişleri üzerinde gerçekleştirilen titreşim testlerinden, gelişen hasara bağlı olarak doğal frekanslarda azalma olduğu ortaya konulmuştur. Bu çalışma sonucunda, nihai yüklemeye kadar, doğal frekansların tek gözlü köprüler için %40 ve çift gözlü köprüler için %75 oranında lineer olarak azaldığı belirlenmiştir.

Rizos vd. (1990) tarafından önerilen yöntemde, bir frekans değerine ait genlik farklı iki noktadan zorlanmış titreşim testi kullanılarak ölçülmüş ve analitik model üzerinde aynı frekansta benzer genlik elde edilecek şekilde hasarın yeri belirlenmiştir. Enine yüzey çatlakları dikkate alınarak hasarlı ve hasarsız yapıya ait mod şekilleri Modal Güvence Kriterine (MGK) göre karşılaştırılmıştır.

Hasarlı sistemlerde modal yerdeğişirmelerdeki değişimin hasarsız duruma göre belirlenmesi oldukça zor olduğundan, modal eğrilikler kullanılarak daha hassas hasar tespiti yapılabilmektedir. Pandey vd. (1991), mod şekillerinin eğrilğine dayalı hasar tespit yöntemi geliştirmişlerdir. Bu yöntemde, eğrilik değeri merkezi farklar yöntemi kullanılarak modal yerdeğişirmelerden hesaplanmıştır. Örnek olarak, basit mesnetli bir kiriş üzerinde kiriş açıklığının üçte biri mesafedeki elemanın elastisite değeri %50 azaltılarak sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Sonuç olarak, eğrilik değerlerinin MGK'ya göre daha hassas sonuçlar verdiği ortaya konulmuştur.

Stubbs vd. (1992), çubuk elemanlar için iki serbestlik derecesi arasındaki modal şekildeğişirme enerjisindeki azalıma dayanan Hasar İndeks yöntemini önermiştir. Bu indeks i. noktada j. modun eğrilğindeki değişim dikkate alınarak hesaplanmıştır. Bu yöntemde göre, indeksin 2'den büyük olduğu yerlerde hasar olmasının muhtemel olduğu ifade edilmiştir. Yöntem hasarlı bir çelik köprüye uygulanmış ve üç mod şekli kullanılarak hasarın yeri belirlenmiştir.

Raghavendracher ve Aktan (1992) tarafından, yüksek frekanslı modların yerel hasarları belirlemede daha etkili olduğu, fakat bu modların deneysel olarak elde edilmesinin zor olduğu belirtilmiştir.

Uzgider vd. (1993), doğal frekanslardaki değişim kullanılarak rijitlik özelliklerinin belirlenmesine dayalı bir hasar tespit yöntemi geliştirmişlerdir. Bu yöntemde, öncelikle en etkili rijitlik parametreleri ve titreşim modları belirlenmiştir. Daha sonra, seçilen modlara ait doğal frekanslardan rijitlikle ilgili parametreler tekrar elde edilerek, bu değerler ile ilk rijitlik değerleri arasındaki oran, hasarın varlığının göstergesi olarak sunulmuştur. Bu

yöntemin etkinliğinin rijitlikle ilgili parametrelerin doğru seçilmesine ve başlangıç değerinin doğru olarak tanımlanmasına bağlı olduğu belirtilmiştir.

Morgan ve Oesterle (1994), yapının rijitliğindeki değişimin frekanslara olan etkisini inceleyerek; ölçülen frekansların beklenen değerden küçük olması durumunda yapının rijitliğinde bir azalma olduğunu, büyük olması durumunda ise yapının mesnetlerdeki rijitliğinin fazla olduğunu ortaya koymuşlardır.

Bolton (1994), frekanslardaki değişimleri dikkate alınarak hasar tespiti yapabilmek için istenilen frekans aralığında yapının bütün titreşim frekanslarının belirlenebileceği noktalarda ölçüm yapılmış olması gerekliliğini belirtmiştir. Bunun için, deneysel ölçümlerden önce teorik analizlerin yapılarak mod şekillerinin elde edilmesi gerektiği ifade edilmiştir. Çalışmada, en iyi ölçüm noktalarının mod şekil vektörlerinin genliklerinin toplamı dikkate alındığında maksimum değerlerin olduğu bölgeler olduğu ortaya konulmuş ve bu amaçla kullanılacak bazı basit yaklaşımlar sunulmuştur.

Aktan vd. (1994), yapısal hasarların frekanslardaki değişim dikkate alınarak belirlenebilmesi için frekanslardaki değişimin %5'ten daha fazla olması gerektiğini belirtmişlerdir. Bununla birlikte, çevresel nedenler, sıcaklık değişimi, anlık yüklemeler sonucunda frekanslarda %5'ten daha fazla değişim oluşturan etkilerin hasar olarak değerlendirilmemesi gerektiği de ifade edilmiştir.

Pandey ve Biswas (1994), ölçüm verilerinden elde edilen esneklik matrisindeki değişime dayalı hasarın varlığını ve yerini tespit edebilmeyi sağlayan bir yöntem geliştirilmişlerdir. Bu yöntem, analitik ve deneysel olarak çelik kirişler üzerinde gerçekleştirilen ölçümlerle test edilmiştir.

Casas ve Aparcio (1994), hasarlı betonarme kirişlerde hasarın yerini belirleyebilmek amacıyla analitik modellerde kiriş elemanlar için eşdeğer atalet momentini lineer olmayan en küçük kareler yöntemini kullanarak elde etmişlerdir. Bu yöntemin, ölçülen ve hesaplanan doğal frekanslar ile modal genlikler arasındaki hatayı minimize etmeye dayandığı ve kirişlerin gerçek sınır şartlarının değerlendirilmesine imkan sağladığı belirtilmiştir.

Choy vd. (1995), yapılardaki hasar bölgesinin ve miktarının frekanslardaki değişimini gösteren eğriler geliştirmişlerdir. Hasarın yeri ve büyüklüğü, deneysel olarak ölçülen hasarlı duruma ait frekanslar kullanılarak oluşturulan eğriler yardımıyla belirlenmiştir. Çalışmada, bu yöntemin simetrik sistemlerde anlamlı sonuçlar vermediği belirtilmiştir.



Brincker vd. (1995), frekanslardaki değişimi istatistiksel olarak değerlendirerek bir yöntem ortaya koymuşlardır. Çalışmada, hasarlı ve hasarsız durumlar dikkate alınarak frekanslar için indeks değerler tanımlanmıştır.

Salawu ve Williams (1995), bir betonarme köprü üzerinde onarım öncesinde ve sonrasında incelemeler yapmış, ancak sönümün değişimine dair net bir yaklaşım ortaya koyamamışlardır.

Doebbling vd. (1996), ileri yöntemle birinci seviye hasar tespiti yapılabilirken, ters yöntemle ikinci ve üçüncü seviye hasar tespitlerinin yapılabileceğini belirtmişlerdir. Cawley ve Adams (1979) tarafından kompozit malzemeler üzerinde gerçekleştirilen çalışmanın, ileri yöntemle yapılan çalışmalarda öncü olduğu kabul edilmektedir. Bu çalışmada, iki moda ait frekanslardaki değişim oranı baz alınarak hasar tespiti gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, yapıdaki hasar durumunu temsil eden bir ağ oluşturulmuş ve deneysel ile teorik frekanslar arasında hata oranı ifadesi tanımlanmıştır. En düşük hata oranının elde edildiği bölge, hasar bölgesi olarak belirlenmiştir. Yapıda çoklu hasar olması durumunda bu yöntemin güvenilir olmadığı belirtilmiştir.

Friswell ve Mottershead (1995) ile Maia vd., (1997), yapısal hasarların belirlenmesinde yapının rijitlik, kütle ve sönüm gibi mekanik özelliklerinin değiştirilerek istenilen statik veya dinamik davranışın elde edilmesine dayalı çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Bu yaklaşım, literatürde analitik model güncelleme yöntemi olarak isimlendirilmiştir. Analitik model güncelleme yönteminde, belirlenen amaç fonksiyonunun malzeme özellikleri, sınır şartları ve geometrik özellikler dikkate alınarak minimize edilmesine çalışılmıştır.

Salawu (1997a), yapısal bütünlükteki değişimleri belirlemek amacıyla Global Bütünlük İndeksi'ni tanımlamıştır. Bu indeks, hasarlı yapının frekanslarının hasarsız yapının frekansları ile lineer olarak birleştirilmesinden elde edilmiş ve yapının rijitliğindeki artmayı ya da azalmayı belirlemekte kullanılmıştır. Bu yöntem, bir köprü üzerinde uygulanmış ve yöntemin geçerliliği gösterilmiştir.

Salawu (1997b), doğal frekanslardaki değişim kullanılarak gerçekleştirilen hasar tespit uygulamalarını içeren literatür çalışması yapmıştır. Doğal frekanslardaki değişimin kullanılmasının hem verilerin hızlı elde edilmesi hem de maliyet açısından fazla olmaması nedeniyle tercih edildiği belirtilmiştir. Buna rağmen, verilerin elde edilmesinin ve değerlendirilmesinin oldukça fazla hassasiyet gerektirdiği ifade edilmiştir. Bu yöntemlerin en önemli dezavantajı, simetrik sistemlerde hasarın simetri ekseninde olması durumunda

hasarın belirlenememesi olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca, ölçülen doğal frekansların sayısı gerekli modal parametre sayısından az olması durumlarında da farklı hasar bölgelerinin ortaya çıktığı ve güvenilir sonuçlar elde edilemediği ifade edilmiştir.

Ruotolo ve Surace (1997), seçilen amaç fonksiyonunu minimize ederek analitik modeli güncellemiştir. Bu amaç fonksiyonu, doğal frekans farkları, modal eğrilik farkları, normleştirilmiş mod şekil farkları gibi hasarla ilgili birçok parametreyi içerecek şekilde oluşturulmuştur. Geliştirilen yöntem, öncelikle analitik modellerden elde edilen verilere uygulanmıştır.

Farrar ve Doebling (1997), büyük mühendislik yapıları üzerinde hasar tespit amaçlı gerçekleştirdikleri ölçümler sonucunda elde ettikleri deneyimlerini sunmuşlardır. Çalışmada, Amerika'nın Albuquerque şehrindeki Rio Grande köprüsünde gerçekleştirilen deneysel modal analiz ölçümleri ve elde edilen sonuçlar ayrıntılı olarak verilmiştir.

Messina vd. (1998), herhangi bir hasar etkisinden dolayı deneysel olarak ölçülen ve frekanslardaki değişimi gösteren bir vektör ile teorik olarak hesaplanan vektörü karşılaştırarak hasar etkisi belirlemeyi amaçlamışlardır. Bu amaçla, Çoklu Hasar Bölgesi Doğrulama Kriteri tanımlanmış ve önerilen yöntemin uygulanabilirliği mafsallı birleşimli sistemler üzerinde gösterilmiştir.

Doebling vd. (1998a), bir yapıda hasarın ya da kusurun varlığının yapının doğal frekanslarında değişikliklere yol açtığını, yapıların frekansları oldukça hızlı ve güvenilir bir şekilde elde edilebildiğinden dolayı hasar durumunun belirlenmesinde en yaygın kullanılan yöntemlerin rezonans frekanslarındaki değişikliklere dayalı yöntemler olduğunu belirtmişlerdir. Doğal frekanslardaki değişime dayalı hasar tespitine yönelik olarak birçok çalışmada, bu yöntemlerin kullanılabilmesi için ya çok hassas ölçüm yapılması gerektiği ya da yapıdaki hasarın fazla olması gerektiği belirtilmiştir. Ayrıca, doğal frekanslardaki istatistiksel değişimin diğer dinamik karakteristiklere oranla daha az olduğu vurgulanmış ve doğal frekanslardaki değişim kullanılarak ikinci ve üçüncü seviye hasar durumlarının belirlenmesinin zor olduğu ifade edilmiştir.

Doebling vd. (1998b), titreşim testlerinin sayısal simülasyonu, modal verilerin analizi, sonlu eleman model korelasyonu ile lineer ve lineer olmayan hasar tespiti tekniklerinin karşılaştırılmasını sağlayacak bir grafiksel arayüz programı sunmuşlardır. Çalışmada, bu programın en önemli özelliği olarak, titreşim analizine bağlı olarak birkaç farklı hasar tespiti algoritması içermesi gösterilmiştir. DIAMOND olarak adlandırılan bu

programın uygunluk fonksiyonu ve istatistiksel belirsizlik analizi için Monte Carlo analizini de yapabildiği vurgulanmıştır.

Farrar ve Jauregui (1998a, 1998b), köprülerin hasar durumlarının belirlenmesinde kullanılan algoritmaları karşılaştırmışlardır. Çalışmada, hasar tespitinin yapıların sınır şartlarındaki, rijitliklerindeki, kütle ve sönüm gibi fiziksel özelliklerindeki değişimlerin, yapılardaki frekans, mod şekli ve modal sönüm gibi dinamik karakteristiklerinde yaptığı değişimler kullanılarak gerçekleştirilmesi gerektiği belirtilmiştir. Çalışmada, deneysel ve sayısal olarak iki ayrı bölüm bulunmakta, hasarlı ve hasarsız köprülerden elde edilen ölçüm sonuçları birbiriyle karşılaştırılmaktadır. Çalışma sonunda, çok ciddi hasarlı durumlarda çoğu deneysel yöntemin doğru sonuç verdiği, fakat hafif hasarlarda farklı sonuçlara ulaşıldığı belirtilmiştir.

Thyagarajan vd. (1998), hasar tespit parametresi olarak frekans davranış fonksiyonlarının optimizasyonunu incelemişlerdir. Çalışmada, hasarsız sistemin analitik olarak elde edilmiş frekans davranış fonksiyonu ile deneysel olarak ölçülen arasında ilişki kurulması amaçlanmıştır. Hasarsız modelin kütle, rijitlik ve sönüm matrisleri ile hasarlı mod şekilleri kullanılarak hasar vektörü hesaplanmıştır. Sonuç olarak, hasar vektörünün hasarın oluştuğu serbestlik derecesinin bir göstergesi olduğu vurgulanmıştır. Önerilen yöntem, oluşturulan bir modelden elde edilen hasarlı frekans davranış fonksiyonu kullanılarak test edilmiştir.

Sampaio vd. (1999), yapılarda hasar olup olmadığını ve eğer varsa hasarın yerini ve miktarını belirlemeyi amaçlamışlardır. Yapıda hasar etkisi olarak çatlağın dikkate alınması durumunda, dinamik karakteristiklerden rijitliğin önemli derecede değiştiği, kütlelerin değişmediği ve sönümdeki değişimin ihmal edilebilecek kadar az olduğu kabul edilmiştir. Amerika'nın Albuquerque şehrindeki Rio Grande köprüsü üzerinde gerçekleştirilen ölçümlerde yöntemin doğru sonuçlar verdiği gösterilmiştir.

Modena vd. (1999), sönüm oranının hasar tespitinde kullanımına yönelik iki yöntem önerilmişlerdir. İlk yöntem, eşdeğer modal sönüm oranındaki değişime; ikinci yöntem ise sönümde viskoz ve sürtünme bileşenlerinin katkılarının değişimine dayandırılmıştır. Bu yöntemler, çatlamış silindirik panele uygulanmış ve ikinci metodun daha güvenilir sonuçlar verdiği belirlenmiştir.

Vestroni ve Capecchi (2000), titreşen kiriş elemanlarda frekans ölçümlerine dayalı hasar tespiti üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Hasar seviyesi rijitlikteki azalmaya bağlı olarak derecelendirilmiştir. Çalışmada özel bir hasar tespit yaklaşımı dikkate alınmış,

hasarın sadece az bir bölgede toplandığı kabul edilerek, belirlenmesi gereken parametrelerin kısıtlanması sağlanmıştır. Dikkate alınan problemin ana temasını, hasarın varlığının ve yerinin belirlenmesi için gerekli olan frekans sayısının belirlenmesi oluşturmaktadır. Hasar tespitinde Modal Denklik Hatası ve Tepki Denklik Hatası diye iki farklı yöntem uygulanmış; yöntemlerin etkinliği deneysel ve teorik frekans verileri kullanılarak değişik problemler üzerinde gösterilmiştir.

Dyke ve Jonhson (2000), hasar bölgesini belirlemek amacıyla dört katlı mevcut bir yapı üzerinde ölçümler gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, yapının tepkilerine ait çapraz spektral yoğunluk fonksiyonları hesaplanmış ve çapraz korelasyon fonksiyonu elde edilmiştir. Elde edilen modal parametreler, optimum rijitlik çarpanının belirlenmesi amacıyla kullanılmıştır. Rijitlik çarpanındaki değişmeye bakılarak hasar bölgesi tespit edilmiştir.

Luş vd. (2000), geliştirdikleri yöntemle lineer yapıların hasar durumlarını belirlemeye çalışmışlardır. Sunulan yöntem iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada, Gözlemci Kalman Belirleme algoritması kullanılarak birinci seviye model oluşturulmuştur. İkinci aşamada ise, Özsistem Uygulama algoritması kullanılarak kütle, sönüm ve rijitlik matrislerinin elde edileceği ikinci seviye model oluşturulmuştur. Hasarsız duruma ait rijitlik matrisiyle hasarlı duruma ait rijitlik matrisi karşılaştırılarak hasar bölgesi ve miktarı belirlenmiştir.

Xia ve Hao (2000), hasar tespiti konusunda yapılan çalışmalardan hasar tespiti amacıyla kullanılan modal verilerin hasarın belirlenmesinde büyük öneme sahip olduğunu ifade etmişler ve hasar tespiti ölçümlerinde alt ölçüm noktaları kullanarak yeni bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Bu yöntemde hasar, kalıntı vektör hassasiyeti ve ölçümlerdeki gürültü hassasiyeti olarak tanımlanan iki faktöre bağlı olarak belirlenmiştir.

Katafygiotis ve Lam (2000), IASC ve ASCE yapısal kontrol gruplarının temel ölçüt olarak ortaya koyduğu hasar tespit problemi üzerinde istatistiksel bir yaklaşım ortaya koymuşlardır. Çalışmada, ölçüm sırasındaki gürültü ve modelleme hataları dikkate alınmış; önerilen istatistiksel yaklaşımın zorlukları, sınırlamaları ve uygulanabilirliği tartışılmıştır. Bu yaklaşımın uygulanması durumunda hasar bölgesinin rahatlıkla belirlenebildiği, buna karşın hasar miktarı konusunda tam bir bilginin elde edilemediği görülmüştür.

Peeters vd. (2001), yapıların dinamik karakteristiklerindeki değişimin sadece yapıda oluşan hasarlardan dolayı değil, ölçümlerde kullanılan titreşim türünden ve ölçüm sırasında ortamın sıcaklığından da kaynaklanabileceğini göstermişlerdir. Bu amaçla, öncelikle farklı

titreşim türleri kullanılarak ölçümler yapılmıştır. Daha sonra, ortam sıcaklığının doğal frekanslar üzerindeki etkisi ortaya konulmuş ve bu etkinin hasar etkisinden ayırt edilmesini sağlayacak yöntemler geliştirilmiştir. Önerilen yöntem hasar oluşturulan bir köprü üzerinde uygulanmış ve yöntemin geçerliliği gösterilmiştir.

Görl ve Link (2001) iki katlı çelik çerçeve bir sistemde hasarın yerini ve büyüklüğünü belirlemek amacıyla yaptıkları çalışmada, öncelikle hasarsız yapı üzerinde titreşim testleri yaparak analitik modeli kalibre etmişler ve referans model olarak dikkate almışlardır. Çalışmada, hasar etkisini belirleyebilmek için rijitlik parametreleri, deneysel ile analitik sonuçlar arasında doğal frekanslar ve mod şekilleri bakımından en iyi uyum elde edilecek şekilde değiştirilmiştir.

Morassi (2001), basit kirişe ait hareket denkleminde hasarın yerini ve boyutunu belirlenmeye çalışmışlardır.

Chinchalkars (2001), hasarlı bir kirişin ilk üç doğal frekansının bilinmesi durumunda hasarın yerinin belirlenebileceği bir yöntem önermiştir. Kirişteki hasar etkisi yaylar kullanılarak rijitlik değişimine bağlı olarak elde edilmiştir.

Cantieni (2001), kemer barajlarda dinamik davranışı ve hasar etkilerini belirleyebilmek için deneysel bir çalışma yapmıştır. Çalışmada, 170m kret uzunluğuna ve 46m yüksekliğe sahip Norsjö Kemer Barajı'nın dinamik karakteristikleri belirlenmiştir. Baraja öncelikle çevresel titreşim testi uygulanmış ve barajın temel doğal frekansı 3.2Hz olarak bulunmuştur. Barajın dinamik karakteristikleri, sonlu eleman modeli MARC programında oluşturularak belirlenmiştir. Analizler sonucunda analitik dinamik karakteristiklerin deneysel olarak elde edilenlerden biraz farklı olduğu vurgulanmıştır.

Ndambi (2002), kısmen hasarlı betonarme kirişler üzerinde hasar tespiti amacıyla sönüm etkilerini incelemiş ve sönümü bir hasar kriteri olarak ortaya koymuştur. Çalışmada, enerji tabanlı bir yöntem kullanılmıştır.

Lee ve Shin (2002), kirişlerin frekans davranış fonksiyonundaki değişime dayalı hasar tespit yöntemi önermişlerdir. Çalışmada, hasar dağılım fonksiyonu kullanılarak kiriş içerisindeki hasar tanımlanmış ve hasarın titreşim modları arasındaki etkileşimi arttırdığı ortaya konulmuştur.

Bernal (2002), bilinen bir yük vektörü altındaki içsel kuvvetleri sıfır olan elemanlar grubunu hasar bölgesi olarak belirlemiş ve bu vektörleri Hasar Belirleme Vektörü olarak tanımlamıştır. Hasarsız durumun bilinmesine gerek olmayan bu yöntemle, hem tekil hem de çoğul hasar durumlarında güvenilir sonuçlar alınabilmektedir.

Shi vd. (2002), modal şekildeğiştirme enerjisine dayalı bir hasar tespit yöntemi geliştirmişlerdir. Bu yöntemle, tekil ya da çoğul hasar durumları için hem hasarın yeri belirlenebilirken hem de büyüklüğü hakkında bilgi edinilebildiği ifade edilmiştir. Çalışmada, bu yöntemin dezavantajının ölçüm ortamındaki gürültüden dolayı sonuçların oldukça fazla etkilenmenin olduğu belirtilmiştir.

Kharrazi vd. (2002), ASCE Yapısal Gözlemeleme Çalışma grubunda çevresel titreşimleri dikkate alarak yaptıkları deneysel modal analiz ölçümlerinden elde ettikleri sonuçları kullanarak hasar tespitine yönelik bir çalışma sunmuşlardır. Çalışmada, 1/3 ölçekte dört katlı çelik çerçeve model üzerinde farklı hasar durumları için ölçümler gerçekleştirilmiştir. Her bir hasar durumu için doğal frekanslar ve mod şekilleri hem zaman hem de frekans tanım alanında belirlenmiştir. Ayrıca, deneysel sonuçlar kullanılarak model geliştirme çalışmaları yapılmıştır.

Lauwagie vd. (2002), betonarme kirişlerin hassas ve kırılğan yapı elemanları olduğundan dolayı kullanım yükleri altında hasar oluşma eğiliminin yüksek olduğunu ve bu hasarların kirişin yerel eğilme rijitliğinde azalma meydana getirdiğini belirtmiştir. Çalışmada, hasarsız ve hasar durumu bilinen bir kirişin frekanslarındaki değişimler belirlenmiştir. Rijitlikle ilgili özelliklerde değişiklik yapılarak hasarlı durum davranışı analitik olarak belirlenmeye çalışılmıştır. Ters yöntem kullanılarak frekansları bilinen bir sistemin mekanik özellikleri elde edilmiştir. Ters yöntem kullanılarak hasar tespiti yapmaya dayalı benzer bir çalışma genetik algoritma yöntemi kullanılarak Liszkai ve Raich (2005) tarafından da sunulmuştur.

Kim vd. (2003), titreşim testlerinden sadece birkaç doğal frekans ve mod şekli elde edilmesi durumunda yapıdaki hasarların yeri ve boyutunu belirlemişlerdir. Çalışmada, Frekans Tabanlı Hasar Tespiti ve Mod Şekil Tabanlı Hasar Tespiti yöntemleri kullanılmıştır. Modal şekildeğiştirme enerjisindeki değişimleri dikkate alarak hasarın yerini ve boyutunu belirlemek amacıyla hasar indeksi algoritması geliştirilmiştir. Önerilen hasar tespit yöntemleri, farklı hasar durumlarına sahip öngörülen betonarme kirişleri üzerine uygulanmış ve önerilen yöntemlerin hasarın yerini ve boyutunu belirlemede geçerliliği ortaya konulmuştur.

Teughels ve Roeck (2003), yapılarda oluşan hasarların analitik modellerde malzeme ve rijitlik gibi belirsiz parametrelerdeki değişimler dikkate alınarak belirlenebileceğini belirtmişlerdir. Modal veriler belirsiz parametrelerin lineer olmayan fonksiyonu olduğu için, bu gibi problemlerde iterasyona dayalı yöntemlerin ve bilinmeyen parametre sayısının

azaltılması için hasar fonksiyonlarının kullanıldığı belirtilmiştir. Uygulama amacıyla, orta mesnedindeki çökmeden dolayı kirişlerinde hasar oluşan üç açıklıklı öngerilmeli betonarme köprü seçilmiştir. Hasarlı analitik modeller elastisite ve kayma modüllerindeki değişim dikkate alınarak güncellenmiştir.

Lord vd. (2003), 48 katlı ve kayma merkezine sahip betonarme bir binanın dinamik davranışını daha iyi belirleyebilmek amacıyla model güncelleme çalışmaları yapmışlardır. Bu amaçla, çevresel titreşimler kullanılarak Operasyonel Modal Analiz yöntemiyle yapılan ölçümlerden elde edilen sonuçlar yapının analitik modelini geliştirmek amacıyla kullanılmıştır. Mevcut proje kullanılarak oluşturulan başlangıç modelinde birkaç farklı parametre, deneysel ve teorik sonuçların korelasyonunu arttıracak şekilde değiştirilmiştir. Çalışmada, sonlu eleman modelinin daha esnek olması ile teorik ve deneysel sonuçların denkliği açısından elastisite modülünün azaltılması gerekliliği vurgulanmıştır.

Owen ve Haritos (2003), deneysel modal analiz yöntemini kullanarak betonarme köprülerde yapısal hasarların belirlenmesi üzerine çalışmışlardır. Uygulama amacıyla, 1/2.5 ölçekli köprü modelleri oluşturulmuştur. Köprü modellerinin sonlu eleman analizleri ve deneysel ölçümleri gerçekleştirilerek dinamik karakteristikler analitik ve deneysel olarak elde edilmiştir. Elde edilen dinamik karakteristik değerleri karşılaştırılmış ve köprü modellerinin mevcut durumlarını yansıtan analitik modelleri oluşturulmuştur. Köprü modelleri üzerinde statik yüklemeler ile kontrollü hasarlar oluşturulmuştur. Hasarlı modeller üzerinde deneysel ölçümler gerçekleştirilerek, yapısal hasarlar frekans değerlerindeki değişimler dikkate alınarak ortaya konulmuştur.

Ovanesova ve Suarez (2004), giriş ve düzlem çerçevelerdeki hasarları parçacık dönüşümü yöntemini kullanılarak elde etmişlerdir. Bu yöntemle, statik veya dinamik yüklemelerden oluşan tepki sinyalleri kullanılarak hasarın yeri belirlenmiştir. Çalışmada önerilen yöntemin, uygun dalgacık seçilmesi durumunda tepki sinyalleri kullanılarak yapıların hasar durumunun değerlendirilmesinde kullanılabileceği gösterilmiştir.

Hwang ve Kim (2004), yapılarıdaki hasar bölgelerini ve hasarın derecesini belirlemek amacıyla daha kısa süre ve daha az maliyet gerektiren bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu çalışmada, deneysel ölçümler sonucu elde edilen birkaç frekans davranış fonksiyonu üzerinde rijitlik matrisine dayalı bir hasar tespit yöntemi uygulanmıştır. Yöntemin uygulanabilirliğini göstermek amacıyla basit bir konsol giriş ve helikopter pervane kanadı üzerinde ölçümler yapılmıştır.

Ma vd. (2005), yapılarda hasarın varlığını, yerini ve boyutunu, titreşim sinyallerinin zaman tanım alanında direkt olarak değerlendirilmesiyle belirleyen bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu yöntemde, yapı elemanlarında hasarlardan dolayı oluşan etkileşimi engellemek amacıyla, yapı alt ölçüm bölgelerine ayrılarak incelenmiştir. Birden çok serbestlik derecesine sahip bir sistemin birbirinden bağımsız tek serbestlik dereceli sistemlerin birleşiminden oluştuğu kabul edilmiştir. Üç ve sekiz katlı iki farklı bina üzerinde yapılan uygulamalar ile yöntemin uygulanabilirliği ortaya konulmuştur.

Esneklik matrisinin hasar tespiti amacıyla yaygın olarak kullanıldığı bilinmektedir. Fakat çevresel titreşim verilerinde esneklik matrisi elde edilememektedir. Bu amaçla, ölçekli mod şekilleri ve modal frekanslara bağlı olarak Orantısal Esneklik Matrisi, Duan vd. (2005) tarafından tanımlanmıştır.

Sanchez (2005), yapısal hasarların dinamik karakteristiklerde meydana gelen değişimler kullanılarak belirlenmesine ve bu amaçla yeni yöntemler geliştirilmesine yönelik doktora tez çalışması hazırlamıştır. Çalışmada, Modal Eğrilik Matrisi, Frekans Davranış Fonksiyonu Eğriliği ve Ayrık Dalgacık Dönüşümü yöntemleri kullanılmıştır. Önerilen yöntemler farklı hasar durumları için basit mesnetli kiriş ve düzlem çerçeve sistemler üzerine uygulanmıştır. Hasar etkisi yapı elemanının rijitliğindeki azalmayla temsil edilmiştir. Önerilen dalgacık dönüşümü yöntemi ile frekans davranış fonksiyonlarındaki süreksizlikler belirlenerek hasar tespiti yapılmıştır.

Jaishi ve Ren (2005), çevresel titreşim test sonuçlarını kullanarak yapılar için pratik bir sonlu eleman iyileştirme tekniği geliştirmiştir. Bu amaçla, seçilen bir basit kirişin frekans değişimleri ve mod şekilleri göz önünde bulundurularak değerlendirme yapılmış ve kirişin sonlu eleman güncellemesi için bir amaç fonksiyonu belirlenmiştir. Bu amaç fonksiyonu kullanılarak, beton ve çelik karışımı bir köprünün çevresel titreşim testlerinden elde edilen sonuçlara göre analitik modelinde güncelleme yapılmıştır.

Ahşap yapılar üzerinde gerçekleştirilen benzer bir çalışmada Wang vd. (2005), titreşim testlerinden elde edilen doğal frekansları kullanarak yapının analitik modelini güncellemişlerdir.

Escobar vd. (2005), iki ve üç boyutlu bina modellerde yapısal hasarların tahmin edilmesi ve yerlerinin belirlenmesi için bir yöntem sunmuşlardır. Hasar, her bir elemanın rijitliğindeki değişimler dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Rijitlik matrisindeki değişimleri belirleyebilmek amacıyla geometrik dönüşüm matrisi tanımlanmıştır. Önerilen yöntemin uygulaması ve doğruluğu yapı modellerinin analiziyle gösterilmiştir.



Park vd. (2006), dört katlı çelik çerçeve bir sistemin hasar durumunu Hasar İndeksi yöntemini kullanarak belirlemişlerdir. Öncelikle, yapının hasarsız durumu için titreşim testleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, çerçeve sistemdeki bazı elemanlar çıkarılarak iki farklı hasar durumu oluşturulmuştur. Kullanılan yöntem ile hangi elemanlarda ne düzeyde hasar olduğu belirlenmiştir.

Unger vd. (2006), öngerilmeli betonarme kirişler üzerinde titreşim testleri gerçekleştirerek çatlak gelişiminin kirişin davranışına etkisini belirlemişlerdir. Öngerilmeli kiriş her adımda belirli bir statik yükü yüklenmiş ve bu yükleme durumu için titreşim testleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, öngerilme etkisinden dolayı ilk adımlarda kirişin hasar durumunun değerlendirilemediği, belirli bir yük değerinden sonra kirişteki hasar gelişiminin belirlenebildiği vurgulanmıştır.

Oliveira ve Faria (2006), kemer barajların hasar seviyelerini tespit edebilmek için küçük ölçekli modeller kullanarak deneysel çalışmalar yapmışlardır. Bu amaçla laboratuvar ortamında ölçekli kemer baraj modelleri inşa edilmiştir. Modellerin birinde, baraj hasar görene kadar uygulanan yük sistematik bir şekilde artırılmıştır. Diğer baraj modelinde ise izin verilen maksimum yerdeğiştirme değerine kadar yükleme yapılmıştır. Barajların kret seviyesin biraz altında orta bölgelerde çatlaklar olduğu gözlemlenmiştir. Deneysel olarak incelenen hasar durumları için analitik modeller üzerinde değerlendirmeler yapılmış ve elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla benzer olduğu görülmüştür.

Gentile ve Saisi (2007), Normalleştirilmiş Modal Fark İndeksi'nin mod şekillerindeki değişimin ortaya konulmasında daha etkili olduğunu ifade etmişlerdir. MGK değerleri hesaplandıktan sonra Normalleştirilmiş Modal Fark İndeksi tanımlanmıştır. Çalışmada, bu indeks değerlerinin %33'ten daha düşük olması durumunda modlar arasında iyi bir uyum olduğu, daha büyük olması durumunda ise modların uyumsuz olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca, yerel değerlendirme yapılırken Koordine Modal Güvence Kriteri kullanılmış ve hesaplanan değer 1'e yakın olması durumunda, o noktadaki modal yerdeğiştirmelerin birbirine yakın olduğu ifade edilmiştir.

Faverjon ve Sinou (2008), bir kirişte çoğul hasar olması durumunda hasar yerini ve boyutunu belirlemişlerdir. Hata oranı dikkate alınarak yapılan güncelleştirme yöntemiyle basit kirişteki çoğul hasar durumu ve miktarı ortaya konulmuştur. Önerilen yöntem ile %10-20 oranında gürültü içeren sinyallerde dahi hasar yeri ve miktarının yeterli doğrulukla belirlenebildiği gösterilmiştir.

Baghiee vd. (2009), betonarme kiriş modeller üzerinde adım adım nihai yükleme durumuna kadar yükleme adımları için dinamik karakteristikleri deneysel ölçüm yöntemiyle belirlemiştir. Çalışmada, kiriş modellerde yükleme adımları sonrasında oluşan değişimler, frekanslar ve mod şekilleri karşılaştırılarak belirlenmiştir. Mod şekillerinin karşılaştırılmasında, Modal Güvence Kriteri ve Koordine Modal Güvence Kriteri dikkate alınmıştır. Ayrıca, hasarlı kirişler kompozit güçlendirme levhaları kullanılarak güçlendirilmiştir. Güçlendirme uygulaması sonrasında gerçekleştirilen ölçümlerden, güçlendirmenin kiriş numuneler üzerine etkisi belirlenmiştir.

Ramos vd. (2010), laboratuvar ortamında yığma yapıları temsilen oluşturulan bir kemer model üzerinde tedrici olarak oluşturulan hasar durumları için hasar değerlendirme yapmışlardır. Çalışmada, hedeflenen hasar değerlendirme seviyelerine bağlı olarak literatürde önerilen yöntemler kullanılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Literatürde tanımlanan birçok yöntemle, model üzerindeki hasar düzeyi birinci, ikinci ve üçüncü seviyeye kadar belirlenebilmiş, dördüncü seviye hasar değerlendirme yapabilmek amacıyla analitik model güncelleme yöntemi kullanılmıştır.

Analitik model güncelleme yöntemi dayalı benzer bir çalışma çelik-beton kompozit yapı modeli üzerinde Chellini vd. (2010) tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, analitik modelin güncellenmesinde kolon-kiriş birleşim bölgelerindeki birleşim değerleri değişken alınmıştır.

### **1.3. Tezin Amacı ve Kapsamı**

Literatürde hasar tespiti amacıyla yapılan çalışmalar incelendiğinde, genellikle çubuk sistem türü yapıların çalışıldığı, frekans ve mod şekillerinden türetilen ifadelerin sıklıkla kullanıldığı görülmektedir. Gerçekleştirilen çoğu uygulamada, hasar değerlendirme tekil hasar durumu için yapılmış ve hasar etkisi 3. seviyeye kadar ortaya konulabilmiştir. Son yıllarda ise analitik modellerin güncellenmesine dayalı yöntemler kullanılarak hem çubuk sistem türü yapıların hem de üç boyutlu yapıların hasar tespitlerinin yapılmasına yönelik çalışmaların arttığı görülmektedir. Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında, inşaat mühendisliğinde birçok uygulamasıyla karşılaşılan çubuk ve çerçeve sistem yapılar ile betonarme binaların, köprülerin ve barajların hasar durumlarının tespiti ve değerlendirilmesinde çevresel titreşim verileri kullanılarak analitik model güncelleme yöntemine dayalı bir yaklaşımın ortaya konulması amaçlanmaktadır.

Belirtilen amaç doğrultusunda hazırlanan tez çalışması, başlıca dört bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, literatürde hasar tespiti konusunda yapılan çalışmalar ve kullanılan yöntemlerden bahsedilmektedir. Ayrıca, tezin hazırlanması sırasında analitik modellerin oluşturulmasında kullanılan Sonlu Eleman (SE) yöntemi ve deneysel ölçümlerin gerçekleştirilmesinde kullanılan Operasyonel Modal Analiz (OMA) yöntemi hakkında detaylı bilgiler verilmektedir. İkinci bölümde, ilk önce yapıların hasar durumlarının değerlendirilebilmesi amacıyla önerilen yaklaşımdan ve işlem adımlarından bahsedilmekte; daha sonra önerilen analitik model güncellenmeye dayalı hasar değerlendirme yaklaşımının çelik konsol kiriş ve iki boyutlu çerçeve modeller ile betonarme tek katlı bina, üç katlı bina, köprü ve baraj modelleri üzerinde farklı hasar durumları için uygulamaları verilmektedir. Bu amaçla, ilk olarak laboratuvar ortamında oluşturulan ve hasarsız olduğu varsayılan modeller üzerinde çevresel titreşimler altında gerçekleştirilen ölçümlerden elde edilen sonuçlar sunulmaktadır. Hasarsız durum için gerçekleştirilen ölçüm verileri kullanılarak analitik modeller kalibre edilmektedir. Daha sonra modeller üzerinde fiziksel özellikleri bilinen hasar etkileri oluşturularak, önceki ölçüm düzenekleri yardımıyla tekrarlanan ölçümlerden elde edilen sonuçlar verilmektedir. Üçüncü bölümde, hasarlı duruma ait ölçümlerden elde edilen veriler kullanılarak önerilen yaklaşım yardımıyla her bir model için hasarın varlığı, yeri ve yapı davranışına etkisi ortaya konulmaktadır. Ayrıca, önerilen yaklaşım kullanılarak elde edilen sonuçlar gerçek hasar durumuyla karşılaştırılmakta ve önerilen yaklaşımın uygulanabilirliği gösterilmektedir. Dördüncü bölümde ise, gerçekleştirilen çalışmalardan çıkarılan sonuçlar ve gelecek çalışmalara ışık tutacağı ümit edilen bazı öneriler sunulmaktadır.

#### **1.4. Analitik Model Güncellenme Yöntemi**

Hasar tespiti amacıyla geliştirilen yöntemlerin bir kısmında direkt olarak dinamik karakteristiklerden yararlanılırken, bir kısmında ise dinamik karakteristiklerden türetilen ifadelerden yararlanılmaktadır. Bu yöntemlerden yaygın olarak kullanılanları Hasar İndeks yöntemi (Stubbs vd., 1992), Mod Şekli Eğrilik yöntemi (Pandey vd., 1991), Modal Şekildeğiştirme Enerjisi yöntemi (Shi vd., 2002), Global Bütünlük İndeksi (Salawu, 1997a), Gözlemci Kalman Belirleme algoritması (Luş vd., 2000) ve Frekans Tabanlı Hasar Tespit yöntemi (Kim vd., 2003) olarak sıralanabilir. Günümüzde ise deneysel ve analitik olarak elde edilen dinamik karakteristiklerin karşılaştırılmasına ve analitik modellerin

güncelleştirilmesine dayalı yöntemler tercih edilmektedir. Bu tez çalışmasında analitik modellerin güncelleştirilmesine dayalı hasar tespit yöntemi kullanılmıştır.

Analitik model güncellemeye dayalı hasar tespit yönteminde, analitik model üzerinde yapının rijitlik, kütle ve sönüm gibi mekanik özellikleri değiştirilerek deneysel olarak ölçülen statik veya dinamik davranışın elde edilmesine çalışılmaktadır. Bu yöntemde kullanılan bazı ifadeler aşağıda tanımlanmaktadır (Dascotte ve Vanhonacker, 1989; İmregün ve Visser, 1991).

*Başlangıç Analitik Modeli:* Yapının projesinden ya da yapı üzerinde gerçekleştirilen rölemlerden elde edilen kesit özellikleri ve malzeme özellikleri dikkate alınarak oluşturulan analitik modeldir. Başlangıç analitik modeli, malzeme özelliklerinden sınır şartlarına kadar birçok kabulü içermektedir.

*Model Kalibrasyonu:* Yapıda hasarsız durum için gerçekleştirilen ölçüm sonuçları temel alınarak, başlangıç analitik modelinde değişiklik yapılarak deneysel ve analitik dinamik karakteristikler arasındaki farkın minimize edilmesi işlemidir. Model kalibrasyonu işleminde analitik model üzerinde malzeme özellikleri ve sınır şartlarındaki değişimler dikkate alınmaktadır.

*Kalibre Edilmiş Analitik Model:* Başlangıç analitik modelin malzeme özellikleri ve sınır şartları dikkate alınarak kalibre edilmesi sonucunda elde edilen ve yapının hasarsız durumunu temsil ettiği varsayılan analitik modeldir.

*Model Güncelleme:* Yapıya gelen ani bir etki (deprem, patlatma, çarpma, vb.) sonrasında yapı üzerindeki ölçümlerden elde edilen sonuçlar temel alınarak kalibre edilmiş analitik modelde, kesit özellikleri (atalet momenti, kalınlık, vb.) değişken olarak dikkate alınarak deneysel ve analitik dinamik karakteristikler arasındaki farkın minimize edilmesi işlemidir.

*Hasarlı Analitik Model:* Hasarlı duruma ait deneysel ölçüm sonuçlarına göre model güncelleme yöntemiyle güncellenen ve yapının hasarlı durumunu temsil ettiği varsayılan analitik modeldir.

Bu yaklaşım kullanılarak bir yapının hasar tespiti ve değerlendirme işlemi, analitik model kalibrasyonu ve güncelleme işlemleri olmak üzere başlıca iki aşamadan oluşmaktadır. Her bir aşamada gerçekleştirilen işlem adımları aşağıda verilmektedir.

1. *Adım:* Deneysel ve analitik dinamik karakteristiklerin belirlenmesi
2. *Adım:* Dinamik karakteristiklerin karşılaştırılması ve farklılığın ortaya konulması
3. *Adım:* Amaç fonksiyonlarının tanımlanması

4. *Adım:* Değişkenlerin seçilmesi ve değişim oranlarının tayin edilmesi
5. *Adım:* Duyarlılık analizlerinin gerçekleştirilmesi
6. *Adım:* Yakınsama kriterinin tanımlanması
7. *Adım:* Adım adım (iteratif) çözümlenme

#### **1.4.1. Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi**

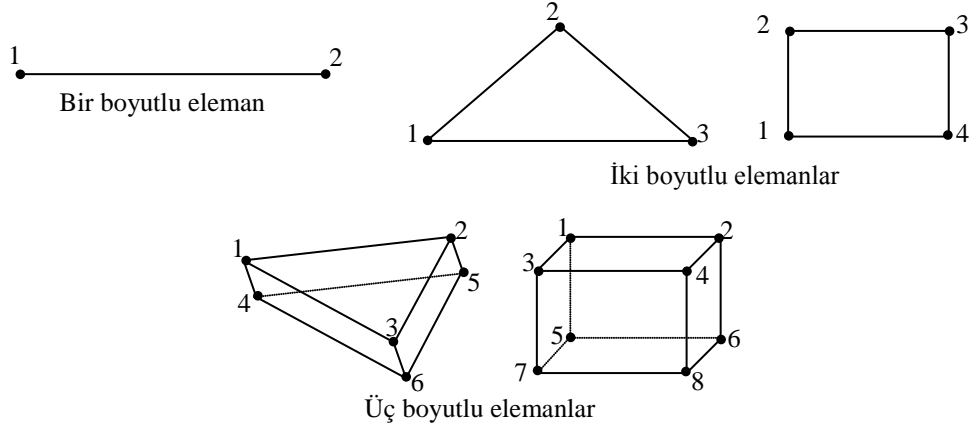
Yapıların dinamik davranışlarının belirlenmesinde analitik ve deneysel olmak üzere başlıca iki yöntem mevcuttur. Analitik yöntemde, yapının kütle, rijitlik ve sönüm özellikleri kullanılarak doğal titreşim frekansları ve mod şekilleri belirlenirken; deneysel yöntemde, yapının titreşimleri ölçülerek doğal titreşim frekansları, mod şekilleri ve sönüm oranları elde edilmektedir.

##### **1.4.1.1. Dinamik Karakteristiklerin Analitik Olarak Belirlenmesi**

Dinamik karakteristiklerin analitik olarak belirlenmesinde yaygın olarak Sonlu Eleman (SE) yöntemi kullanılmaktadır. Bu amaçla öncelikle yapının analitik modeli oluşturulur ve daha sonra malzeme özellikleri ile sınır şartları tanımlanır. Son olarak, sistemin kütle, sönüm ve rijitlik matrisleri oluşturularak modal analizi gerçekleştirilir. Bu işlem adımları ile ilgili genel bilgiler aşağıda verilmektedir.

###### **1.4.1.1.1. Analitik Modellerin Oluşturulması**

Analitik modellerin oluşturulmasında yapının gerçek davranışını temsil edecek elemanların seçilmesi önemli bir yer tutmaktadır. Birçok mühendislik yapısında kullanılması gereken eleman türleri bilinmekte ve genellikle kafes sistemler için bir boyutlu, döşemeler ve perdeler için iki boyutlu, köprüler ve barajlar için üç boyutlu elemanlar kullanılmaktadır (Şekil 1.1). Geometrik olarak gerçek yapıyı en iyi yansıtacak analitik model, her bir yapı elemanını parçalara (ağlara) bölerek ve ağ yakınsaması kontrolü yaparak oluşturulur. Hasar tespitinde frekanslara dayalı karşılaştırma yapılması durumunda ağ yakınsamasının önemi daha da ortaya çıkmaktadır. Yeterli ağ yakınsaması sağlanmamış analitik modellerin hassas sonuç vermeyeceği açıktır (Zienkiewicz, 2000).



Şekil 1.1. Sonlu Eleman yönteminde kullanılan elemanlar

#### 1.4.1.1.2. Malzeme Özellikleri ve Sınır Şartlarının Belirlenmesi

Analitik modellerin oluşturulmasında, modellenen yapının malzeme özelliklerinin ve sınır şartlarının yapıyı temsil edecek doğrulukla tanımlanması gerekmektedir. Yapıların inşası süresince kullanılan malzemelerin dayanımlarının değişebileceği düşünülerek gerekli olduğu durumlarda her bir inşa aşaması için farklı malzeme özellikleri tanımlanabilir. Benzer şekilde yapının zeminle etkileşimi, mesnetlenme şartları ve sistem içerisinde bağımlık özellikleri göz önüne alınmalı ve analitik model gerçek şartları mümkün olduğunca yansıtabilecek şekilde oluşturulmalıdır. Gerekli durumlarda mesnet birleşimleri yay elemanlar kullanılarak sağlanmalıdır (Bjorhovde vd., 1990; Awkar ve Lui, 1997; Türker, vd., 2009).

#### 1.4.1.1.3. Sonlu Eleman Yöntemiyle Modal Analiz

Sonlu Eleman yöntemine dayalı N serbestlik dereceli bir sistemin genel hareket denklemi,

$$[M]\{\ddot{U}(t)\} + [C]\{\dot{U}(t)\} + [K]\{U(t)\} = \{f(t)\} \quad (1.1)$$

bağıntısıyla verilebilir. Burada,  $[M]$ ,  $[C]$  ve  $[K]$  sırasıyla çok serbestlik dereceli sistemin kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini ve  $\{\ddot{U}(t)\}$ ,  $\{\dot{U}(t)\}$ ,  $\{U(t)\}$  ve  $\{f(t)\}$  ise sırasıyla çok serbestlik dereceli sistemin zamana bağlı ivme, hız, yerdeğiştirme ve kuvvet vektörlerini göstermektedirler.

Yapıda sönüm olmaması durumunda, analitik model kütle ve rijitlik terimleriyle ifade edilir. Bu durumda hareket denklemi,

$$[M]\{\ddot{U}(t)\} + [K]\{U(t)\} = \{f(t)\} \quad (1.2)$$

bağıntısıyla verilir. Yapının doğal frekanslarını veya modal özelliklerini bulmak için yapının serbest titreşim yaptığı düşünülürse, hareket denklemi,

$$[M]\{\ddot{U}(t)\} + [K]\{U(t)\} = \{0\} \quad (1.3)$$

olarak belirlenir. Bu denklemin çözümü için,

$$\{u(t)\} = \{U\} e^{i\omega t} \quad (1.4)$$

olduğu kabul edilir (Petyt, 1990). Burada  $\{U\}$   $N \times 1$  boyutunda zamandan bağımsız genliği göstermektedir. (1.4) ifadesi (1.3) denkleminde yerine yazılırsa,

$$([K] - \omega^2 [M])\{U\} e^{i\omega t} = \{0\} \quad (1.5)$$

denklemini elde edilir. Bu denklemin sıfırdan farklı çözümü için,

$$\det[K] - \omega^2 [M] = 0 \quad (1.6)$$

olmalıdır. Bu denklemin çözümünden  $N$  serbestlik derecesi kadar sönümsüz doğal açısız frekans (öz vektör)  $(\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_N)$  elde edilir. Her bir doğal frekansa karşılık yapının almış olduğu şekil, mod şekli olarak tanımlanır. Doğal frekansların küçükten büyüğe doğru

sıralanması sonucunda elde edilen en küçük frekans temel frekans ve bu frekansa karşılık gelen mod şekli temel mod şekli olarak adlandırılır.

Normalleştirilmiş mod şekilleri aşağıdaki ifade kullanılarak elde edilebilir (Petyt, 1990).

$$\{\phi\} = \frac{1}{\sqrt{m_r}} \{\Psi\}_r \quad (1.7)$$

Burada,  $m_r$  r. moda ait genelleştirilmiş kütle matrisini göstermektedir.

#### **1.4.1.2. Dinamik Karakteristiklerin Deneysel Olarak Belirlenmesi**

Yapı dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde deneysel modal analiz yöntemlerinin etkin sonuç verdiği ve ölçüm yapılan yapılarda hasar oluşturulmaması nedeniyle tercih edildiği ve kabul gördüğü bilinmektedir. Bu yöntem, ölçümlerde kullanılan titreşim etkisinin bilinip bilinmemesine bağlı olarak Geleneksel Deneysel Modal Analiz ve Operasyonel Modal Analiz yöntemleri olmak üzere kendi içerisinde iki gruba ayrılmaktadır. Bu tez çalışmasında, çevresel titreşim şartları altında dinamik karakteristiklerin belirlenmesini sağlayan Operasyonel Modal Analiz (OMA) yöntemi kullanılmıştır.

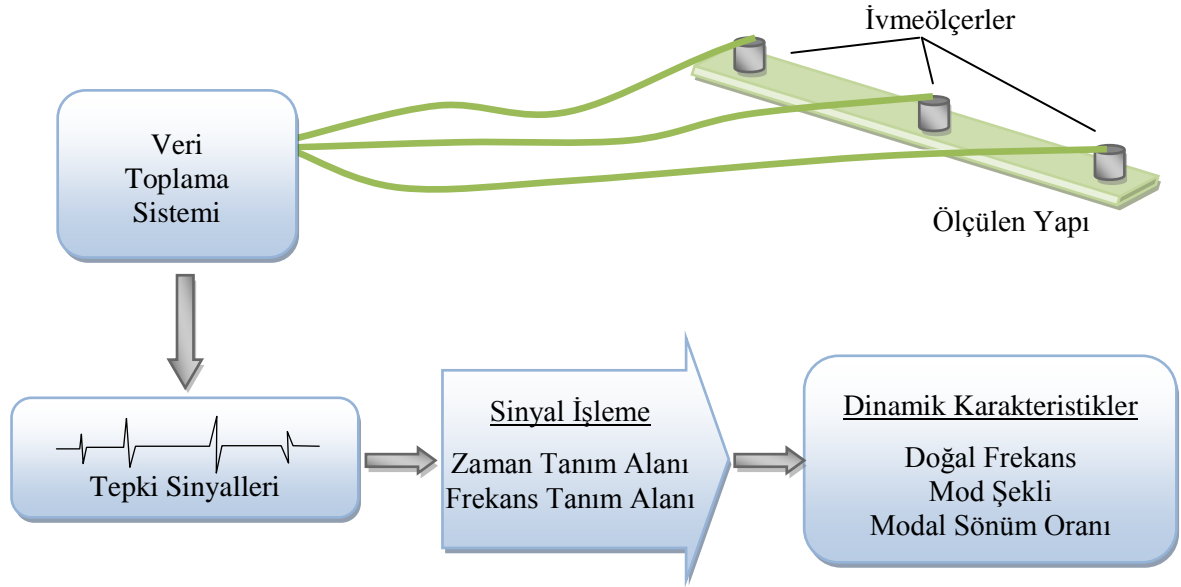
##### **1.4.1.2.1. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi**

Operasyonel Modal Analiz yöntemi yapılarda deprem, rüzgar, trafik, insan hareketi gibi çevresel etkilerden oluşan titreşimleri dikkate alarak yapıların dinamik karakteristiklerinin deneysel olarak belirlenmesinde kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde yapıya etkiyen titreşimlerin genliği ve zamanla değişimi bilinmemektedir. Yapıya ait dinamik karakteristikler yapı üzerinden ölçülen tepki verilerinin zaman ve frekans tanım alanlarında işlenmesiyle elde edilmektedir.

Bu yöntemin yeterince anlaşılabilmesi için temel titreşim biçimlerinin ve rezonans etkisinin bilinmesi gerekmektedir. Titreşim, başlangıç şartları veya uygulanan dış yükler altında yapıların göstermiş oldukları tepkilerdir. Temel olarak, serbest titreşim ve



zorlanmış titreşim olmak üzere iki farklı titreşim türü söz konusudur. Serbest titreşimde yapı, uygulanan başlangıç şartları altında titreşir. Bu tür titreşimde, en küçük doğal frekans (temel frekans) yapıda en etkili olan frekanstır. Bu tür titreşim, belirli bir süre sonra yapıdaki sönümün etkisiyle sona erer. Zorlanmış titreşim ise, yapının uygulanan bir dış yük altındaki titreşimidir. Bu tür titreşim, yük yapıya etkidiği sürece devam eder (Ewins, 1995). Bir yapı dış yükten dolayı titreştirildiğinde, yapının doğal frekansı ile dış yükün frekansının aynı olduğu bir duruma gelinebilir. Bu durumda yapı oldukça büyük genlikte titreşim yapar ve rezonans durumu olarak adlandırılır. Operasyonel Modal Analiz yönteminde yapıların dinamik karakteristiklerinin nasıl belirlendiğini gösteren akış şeması Şekil 1.2’de verilmektedir (Zhang vd., 2002; Brincker vd., 2003).



Şekil 1.2. Tipik bir Operasyonel Modal Analiz yöntemi ölçüm düzeneği

#### 1.4.1.2.2. Operasyonel Modal Analiz Yönteminin Uygulama Alanları

Günümüzde Operasyonel Modal Analiz yöntemi, teorik bilginin artması ve elektronik cihazlardaki hızlı gelişme sayesinde birçok mühendislik alanında kullanılabilir hale gelmiştir. Makine parçalarının titreşim analizlerinden büyük mühendislik yapılarındaki titreşimlerin analizine kadar birçok alanda Operasyonel Modal Analiz yöntemi kullanılmaktadır. Genel olarak bu yöntem,

- Yapıların projelendirilmesi aşamasında yapılan kabullerin gerçekte sağlanıp sağlanmadığının belirlenmesinde,
- Teorik analizler sonucu elde edilen dinamik karakteristiklerin deneysel olarak elde edilenlerle karşılaştırılması ve sonlu eleman modellerinin güncelleştirilmesinde,
- Teorik analizlerinin yapılması zor olan yapıların dinamik karakteristiklerinin deneysel olarak belirlenmesinde,
- Yapıların hasar görmüş durumlarının değerlendirilebilmesinde

kullanılmaktadır.

#### **1.4.1.2.3. Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle Ölçüm**

Operasyonel Modal Analiz yöntemiyle gerçekleştirilen ölçümlerde ölçümler sırasında sıcaklık değişimi ve nem gibi etkiler altında yapının malzeme özelliklerinin ve sınır şartlarının değişmediği, yapıda oluşan titreşimlerin küçük olduğu yani yapının lineer davranış sergilemeye devam ettiği, yapının bir bütün ve sürekli olduğu yani yapının bir noktasında elde edilen davranışın bütün yapıyı temsil ettiği kabul edilmektedir.

Ölçümlerin sağlıklı bir biçimde gerçekleştirilebilmesi için uygulamacıların hem kullanılan yöntem hem de ölçülecek yapı davranışı hakkında genel mühendislik bilgisine sahip olması ve amaca yönelik olarak test düzeni oluşturulması gerekmektedir. Test düzeninin hazırlanmasında aşağıda belirtilen hususlara dikkat edilmelidir.

- Ölçülecek yapının dinamik karakteristikleri hakkında ön bilgiye sahip olunmalı (yaklaşık frekans değerleri, mod şekilleri).
- Yapının frekans değerlerine göre ölçümlerde kullanılacak ivmeölçer tipi seçilmeli.
- Elde edilmesi hedeflenen modal hareketlere göre ivmeölçer bağlanacak noktalara ve ivmeölçerlerin yönlerine karar verilmeli.
- Ölçülecek yapıdaki titreşim düzeyi gözlemlenmeli gerekli ise taşıt, kalabalık insan hareketi gibi titreştiriciler kullanılmalı.
- Sinyallerin toplanacağı veri toplama ünitesi ayarları yapılmalı (frekans aralığı seçilmeli, model ve ivmeölçer bağlantıları oluşturulmalı, ölçüm süresi belirlenmeli, vb.).

Operasyonel Modal Analiz yöntemiyle gerçekleştirilen ölçümlerde kullanılan başlıca ekipmanlar yukarıda da belirtildiği gibi titreşim kaynakları, ivmeölçerler, veri toplama üniteleri ve sinyal işleme programlarından oluşmaktadır.

*Titreşim Kaynakları:* Operasyonel Modal Analiz yönteminde yapıların deprem, rüzgar, taşıt ve insan hareketleri gibi çevresel etkiler altında veya özel sarsma ekipmanlarıyla (shaker, darbe çekici) titreştirildiği varsayılmaktadır. Çoğu büyük boyutlu mühendislik yapılarını özel sarsıcı cihazlarla titreştirmek mümkün olmayacağı için, bu tür yapıların ölçümlerinde genellikle çevresel etkilerden yararlanılmaktadır. Darbe çekiçleri küçük veya orta ölçekli mühendislik yapılarını veya laboratuvar modellerini titreştirmek için kullanılmaktadır. Darbe çekiçleri hem genliği ve zamanla değişimi bilinmeyen rastgele titreşimler için hem de ölçülebilen büyüklüklerdeki titreşimler üretmek için kullanılabilirler. Darbe çekiçleri ile uygulanan titreşimin genliği çekiğin başlığı içerisindeki kuvvetölçer yardımıyla ölçülebilmektedir. Ayrıca yapıda farklı frekans içeriğine sahip etkiler oluşturabilmek amacıyla yumuşak, orta ve sert başlıklar kullanılabilir. Bu tez çalışmasında, laboratuvar ölçümlerinde B&K8210 tipi darbe çekici kullanılarak genliği ve zamanla değişimi bilinmeyen rastgele titreşimler üretilmiştir. Şekil 1.3'te kullanılan darbe çekicine ait görüntüler ve Tablo 1.1'de ise darbe çekicine ait bilgiler verilmektedir.



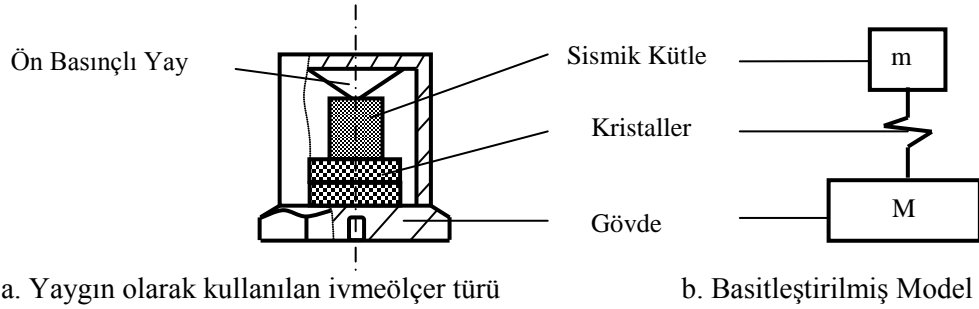
Şekil 1.3. B&K8210 tipi darbe çekici

Tablo 1.1. B&K8210 tipi darbe çekicine ait bazı özellikler

Model	B&K8210
Hassasiyet	0.225mV/N
Maksimum Kuvvet	22200N
Çalışma Sıcaklığı	-73 ile +60°C arası
Toplam Uzunluk	0.8966m
Toplam Kütle	5.44kg

*İvmeölçerler:* Operasyonel Modal Analiz yöntemiyle gerçekleştirilen ölçümlerde yapılarda oluşan titreşimleri ölçmek amacıyla ivmeölçerler kullanılmaktadır. İvmeölçerlerde tepkinin iletimi sismik kütle kullanılarak yapılır. Şekil 1.4'te tipik bir ivmeölçerin içyapısı verilmektedir. Bu düzende, kristallerde oluşan kuvvet, sismik kütlede atalet kuvvetidir. İvmeölçerlerin çalışma mantığı, oluşan titreşimlere karşı elektriksel voltajların üretilmesine dayanmaktadır. Bu elektrik yükünün kristal üzerindeki değişimi yer çekimi ivmesinin değişimi ile doğru orantılıdır. İvmeölçerlerdeki sismik kütlede 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 vardır. Bu şekilde üretilen sinyal veri toplama ünitesine aktarılmaktadır.

Farklı tipte ivmeölçerler olmasına karşın yapısal titreşimlerin ölçümlerinde genellikle piezoelektrik ivmeölçerler tercih edilmektedir.



Şekil 1.4. İvmeölçerlerin genel yapısı

İvmeölçer tipine bağlı olarak hassasiyet değerleri değişkenlik göstermektedir. Genellikle ölçümlerde yüksek hassasiyetli ivmeölçerler kullanılması istenilmektedir. Hassasiyetin yüksek olması ivmeölçerinin büyüklüğünü ve ağırlığını artırmaktadır. Bu da ölçülecek yapının küçük olması durumunda, ölçüm işlemi için elverişsiz olmaktadır. Bu nedenle, ölçülecek sisteme bağlı olarak yeterli hassasiyeti sağlayan ivmeölçerler kullanılmalıdır. İvmeölçer seçiminde başlıca ölçüm frekans aralığı, hassasiyeti, maksimum ivme değeri, çalışma sıcaklığı, ağırlığı gibi özellikler dikkate alınmalıdır. Ölçüm frekans aralığı ivmeölçerinin ölçebileceği maksimum ve minimum frekans aralığını, hassasiyet ivmeölçerinin yerçekimi ivmesiyle orantılı üretebileceği elektrik gücünü, maksimum ivme değeri ivmeölçerinin elektrik sinyali bozulmadan veya kaybolmadan ölçebileceği en büyük ivme genliği değerini, çalışma sıcaklığı ise ivmeölçerinin sağlıklı sinyal üretebileceği

maksimum ve minimum ortam sıcaklığını belirtmektedir. Ölçüm işlemi için ivmeölçerin bağlandığı yer ve bağlanma şekli önemlidir. İvmeölçerin ölçülecek sisteme bağlanmasında vidalı, yapışkanlı vb. birkaç farklı yöntem mevcuttur. Her bir bağlama yönteminin avantaj ve dezavantajları vardır. Bu nedenle, ölçülecek yapı ve kullanılacak ivmeölçer türüne göre uygun bağlantı düzeni oluşturulmalıdır.

Bu tez çalışmasında, çelik modellerde ve baraj modelde B&K4507 türü tek eksenli ivmeölçerler yapışkanlı bağlantılarla, betonarme bina ve köprü modellerinde ise B&K8340 tipi tek eksenli sismik ivmeölçerler çelik dübellere vidalı bağlantılarla kullanılmıştır. Şekil 1.5'te kullanılan ivmeölçerler, Tablo 1.2'de ise ivmeölçerlere ait bilgiler verilmektedir.



Şekil 1.5. B&K4507 ve B&K8340 tipi tek eksenli ivmeölçerler

Tablo 1.2. B&K4507 ve B&K8340 tipi tek eksenli ivmeölçerlere ait bazı özellikler

Model	B&K4507	B&K8340
Hassasiyet	1V/g	10V/g
Frekans Aralığı	0.4-6000	0.1-1500Hz
Maksimum İvme	±7g	± 0.5g
Çalışma Sıcaklığı	-54 ile +121°C arası	-51 ile +74°C arası
Boyutlar	10*10*10mm	50.3*50.3*91.9mm
Toplam Kütle	5gr	775gr

*Veri Toplama Ünitesi:* Veri toplama ünitesi ivmeölçerlerden gelen sinyallerin ölçüm geometrisi de dikkate alınarak derlenmesini sağlamaktadır. İvmeölçerler yapıdan aldıkları elektrik sinyallerini doğrudan ya da çeşitli sinyal koşullama ünitelerinden geçirdikten sonra veri toplama sistemine aktarmaktadır. Sinyaller içeriklerine göre uygun hızda ve

çözünürlükte örneklendikten sonra bilgisayar ortamında kaydedilmektedir. İvmeölçerlerden veri toplama ünitesine aktarılan sinyaller hamdır, yani sinyaller ölçüm ortamındaki gürültüleri (rüzgâr sesi, insan sesi, dere sesi vb.) içermektedir. Bu tarz gürültü sinyalleri yapı dinamik karakteristiklerinin sağlıklı bir şekilde belirlenmesine engel olmaktadır. Bu bakımdan veri toplama sisteminin en önemli işlevlerinden biri sinyal koşullamadır. 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. Bu işlemlerin en önemlisi istenmeyen sinyallerin filtrelenmesidir. 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.

Bu tez çalışmasında, gerçekleştirilen deneysel ölçümlerde B&K3560-C tipi on yedi kanallı veri toplama ünitesi kullanılmıştır. Şekil 1.6'da gösterilen veri toplama ünitesi bir adet beşlik ve bir adet on ikilik olmak üzere iki adet ivmeölçer giriş devresine sahiptir. Ayrıca zorlanmış titreşim testlerinde darbe çekiciden gelen etki sinyallerini ölçmek için bir adet kuvvet sensörü girişine sahiptir. Kullanılan veri toplama ünitesinin en önemli özelliği ölçüm yapılacak yapının büyük olması ve ivmeölçer sayısının yetersiz olması durumunda referanslı ölçüm yapılabilmesidir. Referanslı ölçümlerde yapı üzerine bağlanan ivmeölçerlerden bir tanesi sabit tutulurken diğer ivmeölçerler farklı noktalara yerleştirilebilmektedir. Ölçüm işlemlerinden sonra elde edilen ivme kayıtları birleştirilerek yapı üzerinde tek seferde ölçüm yapılmış gibi dikkate alınabilmektedir.



Şekil 1.6. B&K3560 tipi on yedi kanallı veri toplama ünitesi

*Sinyal İşleme:* Yapıların dinamik karakteristiklerinin belirlenebilmesi için ivmeölçerlerden veri toplama ünitesine aktarılan sinyallerin, sinyal işleme sürecine tabi tutulması gerekmektedir. Bu adım sinyallerin veri toplama ünitesinde sinyal koşullama işlemlerinden sonra bilgisayar ortamına aktarılmasıyla başlamaktadır. Sinyal işleme, bilgisayarda geliştirilen özel yazılımlar kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Sinyaller bilgisayara zaman tanım alanında aktarılmaktadır. Ancak gerek pratik sebeplerden gerekse hesaplama gereksinimlerinden dolayı zaman tanım alanından gelen sinyaller frekans tanım alanı dönüştürülmektedir. Zaman tanım alanındaki sinyallerin frekans tanım alanına aktarılmasında Fourier dönüşümlerinden yararlanılmaktadır.  $u(t)$  ile gösterilen periyodik bir sinyal sonsuz Fourier serisine açıldığında,

$$u(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ a_n \cos\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) \right] \quad (1.8)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Ramos, 2007). Burada  $a_0$ ,  $a_n$ ,  $b_n$ ,

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= \frac{2}{T} \int_0^T u(t) dt \\ a_n &= \frac{2}{T} \int_0^T u(t) \cos\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) dt \\ b_n &= \frac{2}{T} \int_0^T u(t) \sin\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) dt \end{aligned} \right\} \quad (1.9)$$

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

$$u_k = u(t_k) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{N/2} \left[ a_n \cos\left(\frac{2\pi k}{N} n\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi k}{N} n\right) \right], \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (1.10)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada  $a_0$ ,  $a_n$ ,  $b_n$  sırasıyla,

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N u_k \\ a_n &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N u_k \cos \frac{2\pi nk}{N} \\ b_n &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N u_k \sin \frac{2\pi nk}{N} \end{aligned} \right\} \quad (1.11)$$

olarak ifade edilmektedir.

Sinyal işleme sırasında sızıntı hatası gibi bazı problemlerle karşılaşmaktadır. Sızıntı hatası, sinyal periyodunun tam katlı olmamasından yani sinyalin periyodik olmamasından kaynaklanmaktadır. Bu hatayı azaltmak için ölçüm süresi uzun tutulmalıdır. Diğer bir çözüm ise pencereleme yöntemlerini kullanmaktır. Pencereleme yöntemleri sinyal periyodunu tam katlı hale getirerek sızıntı problemini ortadan kaldırmaktadır (Heylen vd., 2007; Ramos, 2007).

Bu tez çalışması kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda; ivmeölçerlerin veri toplama ünitesine tanıtılmasında, ivmeölçerlerden sinyallerin alınarak veri toplama ünitesinde depolanmasında, depolanan sinyallerin sinyal koşullandırma işlemlerinin tamamlanmasında ve bilgisayara dayalı sinyal işleme programına aktarılmasında PULSE (PULSE, 2006) yazılımı kullanılmıştır. Titreşim testlerinden alınan sinyallerin işlenmesinde ve yapıların dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde OMA (OMA, 2006) yazılımı kullanılmıştır.

#### 1.4.1.2.4. Modal Parameterlerin Elde Edilmesi

Operasyonel Modal Analiz yönteminde ölçümü gerçekleştirilen yapının sadece belirli noktalarından titreşimleri ölçüldüğünden dolayı dinamik karakteristikler bu veriler kullanılarak elde edilmektedir. Bu durumda, yapıların dinamik karakteristikleri frekans ve zaman tanım alanında algoritmalara sahip yöntemlerle belirlenmektedir (Zhang vd., 2002; Brincker vd., 2003). Frekans tanım alanındaki yöntemler, her bir noktada ölçülen sinyalin analizine ve sinyaller arasındaki korelasyona dayanmaktadır. Bu yöntemler parametrik olmayan yöntemler olarak da adlandırılmaktadır. Zaman tanım alanındaki yöntemler ise her bir noktada sinyalin zaman geçmişine veya korelasyon fonksiyonlarıyla model uydurmaya dayanmaktadır.



Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, ölçümü gerçekleştirilen yapıların dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde OMA yazılımında yer alan ve literatürde sıklıkla tercih edilen yöntemlerden Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (GFTAA) ve Stokastik Altalan Belirleme (SAB) yöntemleri kullanılmıştır.

#### 1.4.1.2.4.1. Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma Yöntemi

Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (GFTAA) yöntemi, kullanımı kolay olan Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma yönteminin genişletilmiş halidir. Bu yöntemde, modlar sinyal işleme sonucunda elde edilen spektral yoğunluk fonksiyonlarında piklerin seçilmesiyle elde edilmektedir. Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma yöntemi Hızlı Fourier Dönüşümü'nden tek bir frekans hattının kullanımına dayalı olduğundan, belirlenen doğal frekansın kesinliği dönüşümün çözünürlüğüne bağlıdır. Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma yöntemiyle ise doğal frekanslar ve mod şekilleri ayrıca modal sönüm oranları elde edilebilmektedir (Jacobsen vd., 2006).

Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma yönteminde, bir titreşim pikinin etrafında tanımlanan tek serbestlik dereceli Güç Spektral Yoğunluk fonksiyonu Ters Ayrık Fourier Dönüşümü kullanılarak zaman tanım alanına geri dönüştürülebilmektedir. Doğal frekans zamana bağlı sıfır geçiş sayısının belirlenmesiyle, sönüm ise tek serbestlik dereceli normalize edilmiş oto-korelasyon fonksiyonunun logaritmik azalışıyla elde edilmektedir. Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma yönteminde ölçülmeyen etki kuvveti ve ölçülen davranış fonksiyonu arasındaki bağıntı;

$$G_{yy}(j\omega) = H(j\omega)^* G_{xx}(j\omega) H(j\omega)^T \quad (1.12)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Bendat ve Piersol, 2004). Burada  $G_{xx}(j\omega)$  etki sinyalinin Güç Spektral Yoğunluk fonksiyonunu,  $G_{yy}(j\omega)$  tepki sinyalinin Güç Spektral Yoğunluk fonksiyonunu ve  $H(j\omega)$  frekans davranış fonksiyonunu göstermektedir. (1.12) denklemindeki \* ve T sırasıyla ifadelerin kompleks eşleniğini ve transpozisini göstermektedir. Matematiksel düzenlemelerden sonra tepki sinyaline ait Güç Spektral Yoğunluk fonksiyonu tek kutuplu artık değer fonksiyonu formunda,

$$H(j\omega) = \sum_{k=1}^n \frac{R_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{R_k^*}{j\omega - \lambda_k^*} \quad (1.13)$$

şeklinde elde edilmektedir. Burada,  $n$  mod sayısını,  $\lambda_k$  kutup fonksiyonunu ve  $R_k$  artık değer fonksiyonunu göstermektedir. Gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra (1.12) denklemi,

$$G_{yy}(j\omega) = \sum_{k=1}^n \sum_{s=1}^n \left[ \frac{R_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{R_k^*}{j\omega - \lambda_k^*} \right] G_{xx}(j\omega) \left[ \frac{R_s}{j\omega - \lambda_s} + \frac{R_s^*}{j\omega - \lambda_s^*} \right]^{\bar{H}} \quad (1.14)$$

şeklinde elde edilmektedir (Brincker vd., 2000). Burada  $s$  tekil değerleri,  $\bar{H}$  kompleks eşleniği ve transpozeyi ifade etmektedir. Matematiksel ifadeler sadeleştirildiğinde tepki sinyaline ait Güç Spektral Yoğunluk fonksiyonu tek kutuplu artık değer fonksiyonu formunda,

$$G_{yy}(j\omega) = \sum_{k=1}^n \frac{A_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{A_k^*}{j\omega - \lambda_k^*} + \frac{B_k}{-j\omega - \lambda_k} + \frac{B_k^*}{-j\omega - \lambda_k^*} \quad (1.15)$$

şeklinde elde edilmektedir. Burada,  $A_k$  tepki sinyalinin Güç Spektral Yoğunluk fonksiyonuna ait  $k$ . artık değer matrisini göstermektedir. Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma yönteminde ilk adım Güç Spektral Yoğunluk matrisini belirlemektir. Ayırık frekanslarda tepki sinyalinin Güç Spektral Yoğunluk fonksiyonun tahmini  $\omega = \omega_i$  olarak bilinmekte ve sonra tekil değer ayırıştırma matrisi alınarak ayırıştırılmaktadır. Buna göre (1.15) denklemi,

$$G_{yy}(j\omega_i) = U_i S_i U_i^{\bar{H}} \quad (1.16)$$

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. (1.16) denklemine verilen Güç Spektral

Yoğunluk fonksiyonunda, pik değer yapan noktalar doğal frekanslara karşılık gelmektedir. Pik noktaları oluşturan tekil vektörler ( $u_{ij}$ ) ise doğal mod şekillerine karşılık gelmektedir.

Pik etrafındaki Güç Spektral Yoğunluk fonksiyonundan elde edilen tek serbestlik dereceli tekil değer yoğunluk fonksiyonu kullanılarak, doğal frekans ve sönüm elde edilmektedir. Bu işlem ters Hızlı Fourier Dönüşümü ile yapılarak zaman tanım alanında doğal frekans ve sönüm belirlenebilmektedir. İki modun belirgin olması durumunda, birinci tekil vektör her zaman için iyi bir mod şekli ortaya koyacaktır. Bununla birlikte, iki modun ortogonal olması durumunda, bu modlara ait tekil vektörler ilgili mod şekil vektörlerini göstermektedir. Yapının modları ayrık değerler halinde ölçülebildiği durumda en yüksek genlik metodu kullanılarak yapının modal parametreleri elde edilebilir. Bu yöntemin işlem adımları aşağıda sıralanmıştır.

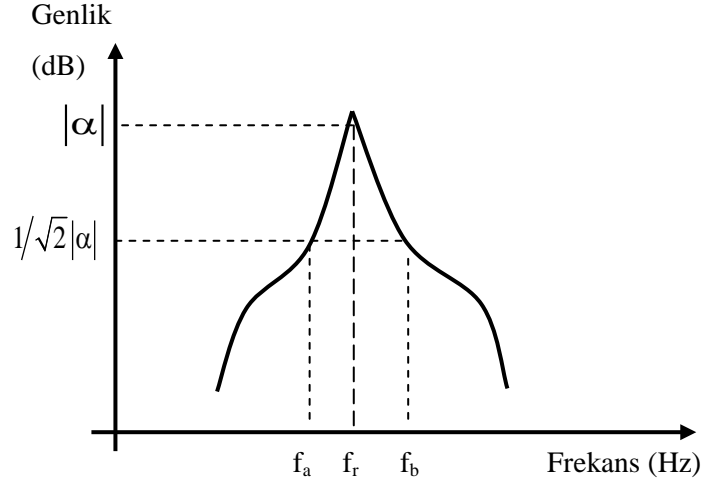
- ✓ Spektral yoğunluk fonksiyonunda her bir rezonansa ait tepe noktası ve bu noktaya karşılık gelen frekans değeri (yapının doğal frekansı),  $f_r$ , belirlenir.
- ✓ Tepe noktasına karşılık gelen genlik değeri,  $|\alpha|$ , belirlenir. Bu tepe noktasından genlik değerinin  $1/\sqrt{2}$ 'si kadar aşağıda o rezonansa ait frekans bant genişliği  $\Delta f$ , belirlenir. Bu noktalar  $f_a$  ve  $f_b$  olarak frekans davranış fonksiyonu üzerinde işaretlenir ve yarı-güç noktaları olarak adlandırılırlar (Şekil 1.7).
- ✓ Modal sönüm oranı  $\xi$ ,

$$n_r = \frac{f_a^2 - f_b^2}{2 f_r^2} = \frac{\Delta f}{f_r} \quad (1.17)$$

$$\xi = 2 * n_r \quad (1.18)$$

ifadesiyle hesaplanır.

Bu yöntemde sönüm maksimum genliğe bağlı olarak hesaplandığından, maksimum genlik değeri ne kadar doğru olarak belirlenirse, yapının sönümü de o kadar doğru hesaplanır.



Şekil 1.7. Modal sönüm oranının elde edilmesi

#### 1.4.1.2.4.2. Stokastik Altalan Belirleme Yöntemi

Zaman tanım alanına dayalı Stokastik Altalan Belirleme (SAB) yöntemi korelasyon veya spektrum dönüşümüne ihtiyaç duymadan doğrudan zaman tanım alanındaki verilerle sonuç vermektedir. Bu yöntem dinamik karakteristiklerin belirlenmesi için çok uygundur (Overschee ve Moor, 1996; Peeters ve Roeck, 2000; Peeters, 2000). Bu yöntemde yapı sisteminin dinamik davranışı lineer, sabit katsayılı ikinci derece diferansiyel bir denklem olarak,

$$[M]\{\ddot{U}(t)\} + [C]\{\dot{U}(t)\} + [K]\{U(t)\} = \{R(t)\} = [B]\{u(t)\} \quad (1.19)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada;  $[M]$ ,  $[C]$ ,  $[K]$  sırasıyla sistemin kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini,  $\{R(t)\}$  titreşim kuvvetini,  $\{U(t)\}$ ,  $\{\dot{U}(t)\}$ ,  $\{\ddot{U}(t)\}$  ise zamana bağlı yerdeğiştirme, hız ve ivme vektörlerini göstermektedir. Burada,  $R(t)$  kuvvet vektörü, ortamdaki verileri simgeleyen  $[B]$  matrisi ve  $\{u(t)\}$  vektörü cinsinden ifade edilebilmektedir. Dinamik denge denklemi titreşen yapının davranışını temsil etmesine rağmen bu şekliyle Stokastik Altalan Belirleme yöntemine uygun değildir. Bu yüzden, denklem (1.19) daha uygun bir form olan ayrık-zaman stokastik durum-uzayı modeline dönüştürülmektedir (Yu ve Ren, 2005). Durum-uzay modeli kontrol teorisinden

üretilmekte, ancak bu model inşaat mühendisliğinde viskoz sönüme sahip yapıların dinamik karakteristiklerini hesaplamak için kullanılmaktadır. Aşağıdaki tanımlamalar kullanılarak (1.19) denklemi,

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{x}(t) &= \begin{pmatrix} \mathbf{U}(t) \\ \dot{\mathbf{U}}(t) \end{pmatrix} \\ \mathbf{A}_* &= \begin{pmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I}_{n_2} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{pmatrix} \\ \mathbf{B}_* &= \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{B} \end{pmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (1.20)$$

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}_* \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_* \mathbf{u}(t) \quad (1.21)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir. Burada,  $\mathbf{A}_*$  durum matrisini,  $\mathbf{B}_*$  veri matrisini ve  $\mathbf{x}(t)$  durum vektörünü göstermektedir. Deneysel ölçümden yapının bütün serbestliklerini ölçmek mümkün olmadığından durum-uzay vektörünün eleman sayısı sistemin durumunu tanımlayan bağımsız değişken sayısına eşitlenir ve gözlem denklemi,

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}_* \mathbf{x}(t) + \mathbf{D}_* \mathbf{u}(t) \quad (1.22)$$

şeklinde ifade edilir (Yu ve Ren, 2005). Burada,  $\mathbf{C}_*$  sistem davranış matrisini,  $\mathbf{D}_*$  doğrudan iletim matrisini göstermektedir. (1.21) ve (1.22) denklemleri sürekli-zaman belirli durum-uzay modelini oluşturmaktadır. Burada “sürekli zaman” ile ifadelerin herhangi bir  $t \in \mathbb{N}$  anında değerlendirilebileceği ifade edilmektedir. Fakat ölçümler  $k\Delta t$  ( $k \in \mathbb{N}$ ) gibi ayırık zamanlarda gerçekleştirilmektedir. Örnekleme süresi ve ortamdaki gürültü, sinyal verilerini her zaman için etkilemektedir. Örneklemeden sonra durum-uzay modeli,

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{x}_{k+1} &= \mathbf{A}_* \mathbf{x}_k + \mathbf{B}_* \mathbf{u}_k \\ \mathbf{y}_k &= \mathbf{C}_* \mathbf{x}_k + \mathbf{D}_* \mathbf{u}_k \end{aligned} \right\} \quad (1.23)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada,  $x_k = x(k\Delta t)$  ayrık-zaman durum vektörünü,  $u_k$  belirgin etki sinyal vektörünü göstermektedir. Gerçek çalışma koşullarında yapılan ölçümler, yapıya ve dış ortamdaki gürültüye ait sinyalleri içermektedir. Dolayısıyla (1.23) denkleminde stokastik gürültü bileşenleri eklendiğinde belirli-stokastik durum-uzay modeli,

$$\left. \begin{aligned} x_{k+1} &= A_* x_k + B_* u_k + w_k \\ y_k &= C_* x_k + D_* u_k + v_k \end{aligned} \right\} \quad (1.24)$$

şeklini alır. Burada,  $w_k$ , modeldeki belirsizlikler ve kusurlar nedeniyle işlenen gürültü sinyallerini,  $v_k$  ise ivmeölçer kusurlarından dolayı işlenen gürültü sinyalini göstermektedir. Her iki vektör de değeri ölçülemeyen sinyallerden oluşmaktadır. Etkisi olmayan beyaz gürültü ve kovaryans matrisleri,

$$E_* \left[ \begin{pmatrix} w_p \\ v_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_q^T & v_q^T \end{pmatrix} \right] = \begin{pmatrix} Q & S \\ S^T & R \end{pmatrix} \delta_{pq} \quad (1.25)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada  $E_*$  beklenen değer operatörünü,  $\delta_{pq}$  ise Kronecker deltasını göstermektedir. Kronecker delta iki değişkenli bir fonksiyondur ve aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\delta_{pq} = \begin{cases} 1, & \text{eğer } p = q \\ 0, & \text{eğer } p \neq q \end{cases} \quad (1.26)$$

Stokastik Altalan Belirleme yönteminde yapı sisteminin davranışı, normal operasyon koşullarında değeri ölçülemeyen sinyallerle titreştirilerek belirlenmektedir. Bu veri eksikliğinden dolayı, (1.24) denkleminde 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,

$$\left. \begin{aligned} x_{k+1} &= A_* x_k + w_k \\ y_k &= C_* x_k + v_k \end{aligned} \right\} \quad (1.27)$$

şeklinde ifade edilmektedir. (1.27) denklemi çevresel titreşimlerden dolayı dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde zaman alanının temelini oluşturmaktadır.

#### 1.4.2. Dinamik Karakteristiklerin Karşılaştırılması

Deneysel ölçümlerden ve analitik modellemelerden elde edilen dinamik karakteristiklerin karşılaştırılmasında birçok kriter tanımlanmıştır. Bu kriterler genellikle mod şekilleri için tanımlanmış olup, yaygın olarak kullanılan kriterler Modal Ölçek Faktörü, Modal Güvence Kriteri, Normalleştirilmiş Modal Fark, Koordine Modal Güvence Kriteri ve Modal Ortogonalite Kriteri olarak sıralanabilir. Bu tez çalışmasında, analitik doğal frekanslar, deneysel frekanslar baz alınarak; mod şekilleri ise çoğunlukla Modal Güvence Kriteri değerlerine bağlı olarak karşılaştırılmıştır.

##### 1.4.2.1. Doğal Frekansların Karşılaştırılması

Deneysel ve analitik ölçümlerden elde edilen doğal frekans değerlerinin karşılaştırılmasında aşağıda tanımlanan durum dikkate alınmıştır.

$$\delta = \left| \frac{f^d - f^a}{f^d} \right| \quad (1.28)$$

Burada,  $f^d$  ve  $f^a$  sırasıyla deneysel ve analitik modal analizlerden elde edilen frekans değerlerini,  $\delta$  ise frekanslardaki değişim oranını göstermektedir. Yapıda hasar oluşması durumunda hasarın yerine ve büyüklüğüne bağlı olarak her bir frekans üzerinde farklı etkiler oluşmaktadır. Bu durum hasar belirlemede önemli bir yer tutmaktadır.

##### 1.4.2.2. Mod Şekillerinin Karşılaştırılması

*Modal Güvence Kriteri (MGK):* Yapının iki farklı durumuna ait mod şekilleri arasında tanımlanan Modal Güvence Kriteri modlar arasındaki uyumu göstermektedir.

Aynı frekans değeri için hasarsız-hasarlı veya analitik-deneysel mod şekil vektörleri arasındaki Modal Güvence Kriteri değeri,

$$\text{MGK}(a, b) = \frac{\left| \sum_{j=1}^n (\phi_a)_j (\phi_b)_j^* \right|^2}{\left( \sum_{j=1}^n (\phi_a)_j (\phi_a)_j^* \right) \left( \sum_{j=1}^n (\phi_b)_j (\phi_b)_j^* \right)} \quad (1.29)$$

ifadesiyle hesaplanmaktadır. Burada,  $(\phi_a)$  ilk duruma ait mod şekil vektörünü  $(\phi_b)$  ikinci duruma ait mod şekil vektörünü göstermektedir. Bu kriterin değeri 0 ile 1 arasında değişmektedir. Değerin 1'e yakın olması modların aynı frekans değerine ait olduğu, 0'a yakın olması ise modların farklı frekanslara ait olduğu ya da hasar oluştuğu anlamına gelmektedir.

*Modal Ölçek Faktörü (MÖF):* İki mod vektörü arasındaki Modal Ölçek Faktörü,

$$\text{MÖF}(a, b) = \frac{\sum_{j=1}^n (\phi_a)_j (\phi_b)_j^*}{\sum_{j=1}^n (\phi_b)_j (\phi_b)_j^*} \quad (1.30)$$

olarak tanımlanmaktadır. Eğer deneysel ölçülen mod şekli ile analitik olarak hesaplanan mod şekli aynı moda ait ise Modal Ölçek Faktörü değeri yaklaşık olarak 1; aksi halde 0 olur.

Normalleştirilmiş Modal Fark (NMF) indeksi, mod şekillerindeki değişimi ortaya koymada daha etkilidir. Modal Güvence Kriteri değerleri hesaplandıktan sonra normalleştirilmiş modal fark indeksi,

$$\text{NMF}_{a,b} = \sqrt{\frac{1 - \text{MGK}_{a,b}}{\text{MGK}_{a,b}}} \quad (1.31)$$

olarak tanımlanmaktadır. Normalleştirilmiş Modal Fark değerinin %33'ten daha düşük olması durumunda modlar arasında iyi bir uyum olduğunun, daha büyük olması durumunda ise modların uyumsuzluğunun göstergesidir (Gentile ve Saisi, 2007). Ayrıca yerel değerlendirme yapılırken, Koordine Modal Güvence Kriteri kullanılmakta ve



$$\text{KMGK}_{i,a,b} = \frac{\left| \sum_{j=1}^m \phi_{i,j}^a \phi_{i,j}^b \right|}{\sum_{j=1}^m (\phi_{i,j}^b)^2 \sum_{j=1}^m (\phi_{i,j}^a)^2} \quad (1.32)$$

olarak tanımlanmaktadır. Hesaplanan değerin 1'e yakın olması o noktadaki modal genlikler birbirine yakın olduğu anlamına gelmektedir.

### 1.4.3. Amaç Fonksiyonlarının Tanımlanması

Yapının ölçülen ve analizlerden elde edilen dinamik karakteristikleri arasında farklılıklar olması durumunda analitik model üzerinde değişiklikler yapılması gerekmektedir. Gerçekleştirilecek olan değişiklikler hem doğal frekanslarda hem de mod şekillerinde farklı etkiler ortaya çıkartacaktır. Bu nedenle, deneysel ve analitik olarak belirlenen dinamik karakteristikler arasında amaç fonksiyonları tanımlanarak analitik model üzerinde yapılan düzenlemelerin istenilen doğrultuda gerçekleşmesi sağlanabilmektedir.

Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında, çoğunlukla frekanslar arasındaki farklılıklar dikkate alınarak amaç fonksiyonları tanımlanmış; deneysel ve analitik frekanslar arasındaki farklılığın en fazla %1 olması amaçlanmıştır. Bazı durumlarda ise Modal Güvence Kriteri ve modal yerdeğiştirmeler de kullanılarak amaç fonksiyonları oluşturulmuştur.

### 1.4.4. Değişkenlerin Seçilmesi ve Değişim Oranlarının Tayin Edilmesi

Analitik model üzerinde değişiklikler yapılırken değişim verilecek parametrelerin tanımlanması ve değişim aralıklarının belirlenmesi gerekmektedir. Yapının analitik modeli oluşturulurken malzeme özelliklerinden kesit özelliklerine ve sınır şartlarına kadar birçok parametre tanımlanmaktadır. Malzeme özellikleri olarak kütle yoğunluğu, elastisite değeri, Poisson oranı; kesit özellikleri olarak kesit alanı, atalet momenti, kalınlıklar; sınır şartları olarak ankastre, sabit mesnet, yarı rijit (yaylı) birleşimler kullanılabilmektedir. Yapının

gerçek durumunu yansıtacak değişikliklerin yapılacağı parametrelerin seçilmesinden sonra her bir parametre için değişim oranlarının tanımlanması gerekmektedir. Değişim oranlarının seçilmesinde mühendislik öngörülleri ve gerçek durumlar dikkate alınmaktadır (Blakely, 1984).

Başlangıç analitik modellerin kalibre edilmesinde değişkenler olarak malzeme özellikleri ve mesnet birleşimleri; analitik modellerin güncellenmesinde değişken olarak ise kesit özellikleri ve birleşim durumları alınmaktadır. Değişim oranları seçilen değişkenlere bağlı olmakla birlikte genellikle %5 ile %20 aralığında seçilmektedir (Vanhonacker, 1980; Teughels ve Roeck, 2003; Lord vd., 2003).

#### 1.4.5. Duyarlılık Analizlerinin Gerçekleştirilmesi

Duyarlılık analizi belli bir parametrenin analiz sonuçları üzerindeki etkisini belirleyebilmeyi sağlamaktadır. Analitik model güncelleme işleminde, parametre olarak malzeme özellikleri, geometrik özellikler, yay sabitleri, sınır şartları ve kütle özellikleri, analiz sonuçları olarak da doğal frekanslar ve mod şekilleri dikkate alınmaktadır. Duyarlılık analizinde yaygın olarak kullanılan iki yaklaşım söz konusudur. Bunlar Diferansiyel Duyarlılık Analizi ve Sonlu Fark Duyarlılık Analizi'dir. Bu tez çalışmasında, Diferansiyel Duyarlılık Analizi yöntemi kullanılarak, seçilen parametrelerin dinamik karakteristikler üzerindeki etkisi belirlenmiştir (Haug, vd., 1986; Zeischka vd., 1988; Ibrahim ve Stavriniadis, 1993).

Diferansiyel duyarlılık analizi yönteminde duyarlılık matrisi aşağıda verilen şekilde hesaplanır (Zeischka vd., 1988).

$$[S] = S_{ij} = \left[ \frac{\delta R_i}{\delta P_j} \right] \quad i: 1 \dots N, \quad j = 1 \dots N \quad (1.33)$$

Burada,  $R_i$  tepki değerlerini,  $P_j$  ise parametreleri göstermektedir. Doğal frekanslar için duyarlılık analizi sönümsüz sisteme ait hareket denkleminde yola çıkarak,

$$\{\phi_i\}^T [K] \frac{\delta \{\phi_k\}}{\delta P_j} = \frac{\delta \{\phi_i\}^T}{\delta P_j} [K] \{\phi_k\} \quad (1.34)$$

$$\{\phi_i\}^T [M] \frac{\delta\{\phi_k\}}{\delta P_j} = \frac{\delta\{\phi_i\}^T}{\delta P_j} [M] \{\phi_k\} \quad (1.35)$$

olarak elde edilir.  $i=k$  olması durumunda,

$$\frac{\delta f_i}{\delta P_j} = \frac{\{\phi_i\}^T \left( \frac{\delta[K]}{\delta P_j} - 4\pi^2 f_i^2 \frac{\delta[M]}{\delta P_j} \right) \{\phi_i\}}{8\pi^2 f_i^2 \left( \{\phi_i\}^T [M] \{\phi_i\} \right)} \quad (1.36)$$

ifadesi elde edilir. Bu ifade rijitlik ve kütle değişimlerini içermektedir. Parametre olarak elastisite değeri ve kütle yoğunluğu seçilmesi durumunda frekanslardaki değişim için duyarlılık analizi (Zeischka vd., 1988),

$$\frac{\delta f_i}{\delta E_j} = \frac{1}{8\pi^2 f_i} \{\bar{\phi}_i\}^T \frac{\delta[K]}{\delta E_j} \{\bar{\phi}_i\} \quad (1.37)$$

$$\frac{\delta f_i}{\delta \rho_j} = \frac{f_i}{2} \{\bar{\phi}_i\}^T \frac{\delta[M]}{\delta \rho_j} \{\bar{\phi}_i\} \quad (1.38)$$

ifadeleriyle hesaplanmaktadır. Bu ifadelerde mod şekil vektörleri kütle matrisine göre normalleştirilmiştir. Parametre olarak sınır şartlarının seçilmesi durumunda ise duyarlılık analizi aşağıda verilen ifade ile hesaplanmaktadır.

$$\frac{\delta f_i}{\delta k_j} = \frac{1}{8\pi^2 f_i} \{\bar{\phi}_i\}^T \frac{\delta[K]}{\delta k_j} \{\bar{\phi}_i\} \quad (1.39)$$

Mod şekilleri için duyarlılık analizi  $N$  adet mod dikkate alınarak,

$$\frac{\delta\{\phi_i\}}{\delta P_j} = \sum_{k=1}^N a_k^i \{\phi_k\} \quad (1.40)$$

$$a_k^i = \frac{\{\phi_i\}^T \frac{\delta[K]}{\delta P_j} \{\phi_i\} - \lambda_i \{\phi_i\}^T \frac{\delta[M]}{\delta P_j} \{\phi_i\}}{\lambda_i - \lambda_k} \quad i \neq k \quad (1.41)$$

ifadesiyle hesaplanır. Burada,  $i=k$  olduğu varsayılarak gerekli düzenlemeler yapılırsa  $a_k^i$  değeri,

$$a_k^i = -\frac{1}{2} \{\phi_i\}^T \frac{\delta[M]}{\delta P} \{\phi_i\} \quad (1.42)$$

olarak elde edilir.

#### 1.4.6. Yakınsama Kriterinin Tanımlanması

Yakınsama kriteri için dinamik karakteristiklere bağlı birçok kriter tanımlanabilmektedir. Bu kriterlerden doğal frekanslar için tanımlanan Ağırlıklı Nispi Fark ve Ağırlıklı Mutlak Nispi Fark, mod şekilleri için tanımlanan Ortalama Modal Güvence Kriteri ve Ağırlıklı Mutlak Modal Yerdeğiştirme ve kütle özellikleri için tanımlanan Ağırlıklı Mutlak Modal Kütle Kriteri yaygın olarak kullanılmaktadır (Allemang ve Brown, 1982).

*Ağırlıklı Nispi Fark Kriteri (ANF)*: Deneysel ve analitik doğal frekanslar arasında tanımlanan bu kriter,

$$YK = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n H_i \frac{\Delta f_i}{f_i} \quad (1.43)$$

şekilde ifade edilmektedir. Burada, YK yakınsama kriterini,  $H_i$  istenilen hata oranını,  $f_i$  frekans değerini,  $n$  ise frekans sayısını göstermektedir.

*Ağırlıklı Mutlak Nispi Fark Kriteri (AMNF)*: Deneysel ve analitik doğal frekanslar arasında tanımlanan bu kriter aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır.

$$YK = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n H_i \frac{|\Delta f_i|}{f_i} \quad (1.44)$$

*Ortalama Modal Güvence Kriteri (OMGK):* Deneysel ve analitik mod şekilleri arasında tanımlanan bu kriter,

$$YK = 1 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^m H_i MGK_i \quad (1.45)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada N deneysel ve analitik durumlar için eşleşen mod sayısını göstermektedir.

*Ağırlıklı Mutlak Modal Yerdeğiştirme Kriteri (AMMY):* Deneysel ve analitik modal yerdeğiştirmeler arasında tanımlanan bu kriter,

$$YK = \frac{1}{H} \sum_{i=1}^n H_i \frac{\Delta \varphi_i}{\varphi_i} \quad (1.46)$$

$$H = \sum_{i=1}^n H_i \quad (1.47)$$

şeklinde elde edilir. Burada,  $\varphi_i$  her bir moddaki modal genliği göstermektedir.

*Ağırlıklı Mutlak Modal Kütle Kriteri (AMMK):* Deneysel ve analitik modal kütleler arasında tanımlanan bu kriter aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır.

$$YK = \frac{1}{H} \sum_{i=1}^n H_i m_i \quad (1.48)$$

Burada,  $m_i$  her bir moddaki modal kütle göstermektedir.

Bu tez çalışmasında, tanımlanan kriterlerin birleşiminden oluşan Toplam Ağırlıklı Nispi Fark Kriteri kullanılmıştır.

### 1.4.7. Adım Adım Çözümleme

Model kalibrasyonda ve güncellemede esas amaç, seçilen değişkenler için tanımlanan fonksiyonun minimize edilebilmesidir. Bu amaçla, dinamik karakteristikler ile yapısal parametreler arasındaki ilişki Taylor serileri açılımıyla (Mottershead ve Friswell, 1995),

$$\{R_d\} = \{R_a\} + [S](\{P_u\} - \{P_o\}) \quad (1.49)$$

veya kısaca

$$\{\Delta R\} = [S]\{\Delta P\} \quad (1.50)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada,  $\{R_d\}$  deneysel ölçüm sonuçlarını,  $\{P_o\}$  değişkenlerin başlangıç değerlerini,  $\{R_a\}$  başlangıç değerleri için analitik sonuçları,  $\{P_u\}$  değişkenlerin güncellenmiş değerlerini ve  $[S]$  duyarlılık matrisini göstermektedir. Bu denklem, genellikle En Küçük Kareler, Ağırlıklı En Küçük Kareler ve Bayesian yöntemleri kullanılarak çözülmektedir.

## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Tez çalışmasının bu bölümünde, yapıların hasar durumlarını tespit edebilmek ve değerlendirebilmek amacıyla deneysel ölçümler ve analitik modellemeyi içeren bir hasar tespit yaklaşımı ortaya konulmuştur. Önerilen hasar tespit yaklaşımının uygulanabilirliği, çelik konsol giriş ve iki boyutlu çerçeve ile betonarme tek katlı bina, üç katlı tuğlalı ve sıvalı bina, köprü ve baraj modelleri üzerinde gerçekleştirilen uygulamalarla gösterilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla, her bir model için sırasıyla başlangıç analitik modeller oluşturulmuş, hasarsız durumu temsil ettiği kabul edilen laboratuvar modelleri üzerinde çevresel titreşimler altında ölçümler yapılmış, başlangıç analitik modelleri hasarsız deneysel ölçüm verilerine göre kalibre edilmiş ve modeller üzerinde farklı hasar durumları göz önüne alınarak hasarlı durum ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Hasar durumları olarak tekil ve çoğul hasar durumları dikkate alınmıştır.

### 2.1. Önerilen Hasar Tespit Yaklaşımı

Yapıların hasar durumlarını değerlendirebilmek için önerilen yaklaşım, yapıların analitik modellerinin deneysel ölçüm sonuçlarına göre güncellenmesini içermektedir. İki aşamadan oluşan yaklaşımın esası, analitik modeller üzerinde değişiklikler yapılarak deneysel ve analitik dinamik karakteristikler arasındaki farkın minimize edilmesine dayanmaktadır. Bu amaçla, ilk aşamada yapının hasarsız durum için oluşturulan analitik modeli yapının gerçek davranışını yansıtacak şekilde kalibre edilmekte; ikinci aşamada ise ilk aşamada elde edilen model kullanılarak yapının hasarlı durumu için elde edilen deneysel ölçümlere göre analitik modelin güncellenmesi yapılmaktadır. İki aşama arasındaki temel farklar: 1. Başlangıç modellerinin farklı olması 2. Güncelleştirme için dikkate alınan parametrelerin farklı olmasıdır.

Önerilen yaklaşımın hesap adımlarını içeren bir akış şeması Şekil 2.1'de verilmektedir. Aşağıda bu akış şemasının ayrıntıları maddeler halinde sıralanmıştır.

#### 1. Aşama

1. Başlangıç analitik model oluşturulur.
2. Hasarsız durum ölçümleri gerçekleştirilir.

### 3. Başlangıç analitik model kalibre edilir.

- 3.1. Deneysel ölçüm düzeneğinde tanımlanan modelin düğüm noktaları ile analitik olarak oluşturulan modelin düğüm noktaları eşleştirilir.
- 3.2. Deneysel ve analitik frekanslar ve mod şekilleri karşılaştırılır.
- 3.3. Frekanslar için yakınsama kriteri seçilir.
- 3.4. Mod vektörleri için yakınsama kriteri seçilir.
- 3.5. Değişken parametre olarak elastisite ve/veya yay sabitleri seçilir ve parametreye ait sınır değerler ile değişim aralığı tanımlanır.
- 3.6. Yakınsama kriterleri sağlanana kadar çözüm aranır.

### 2.Aşama

#### 4. Hasarlı durum ölçümleri gerçekleştirilir.

#### 5. Kalibre edilmiş analitik model hasarlı durum için güncellenir.

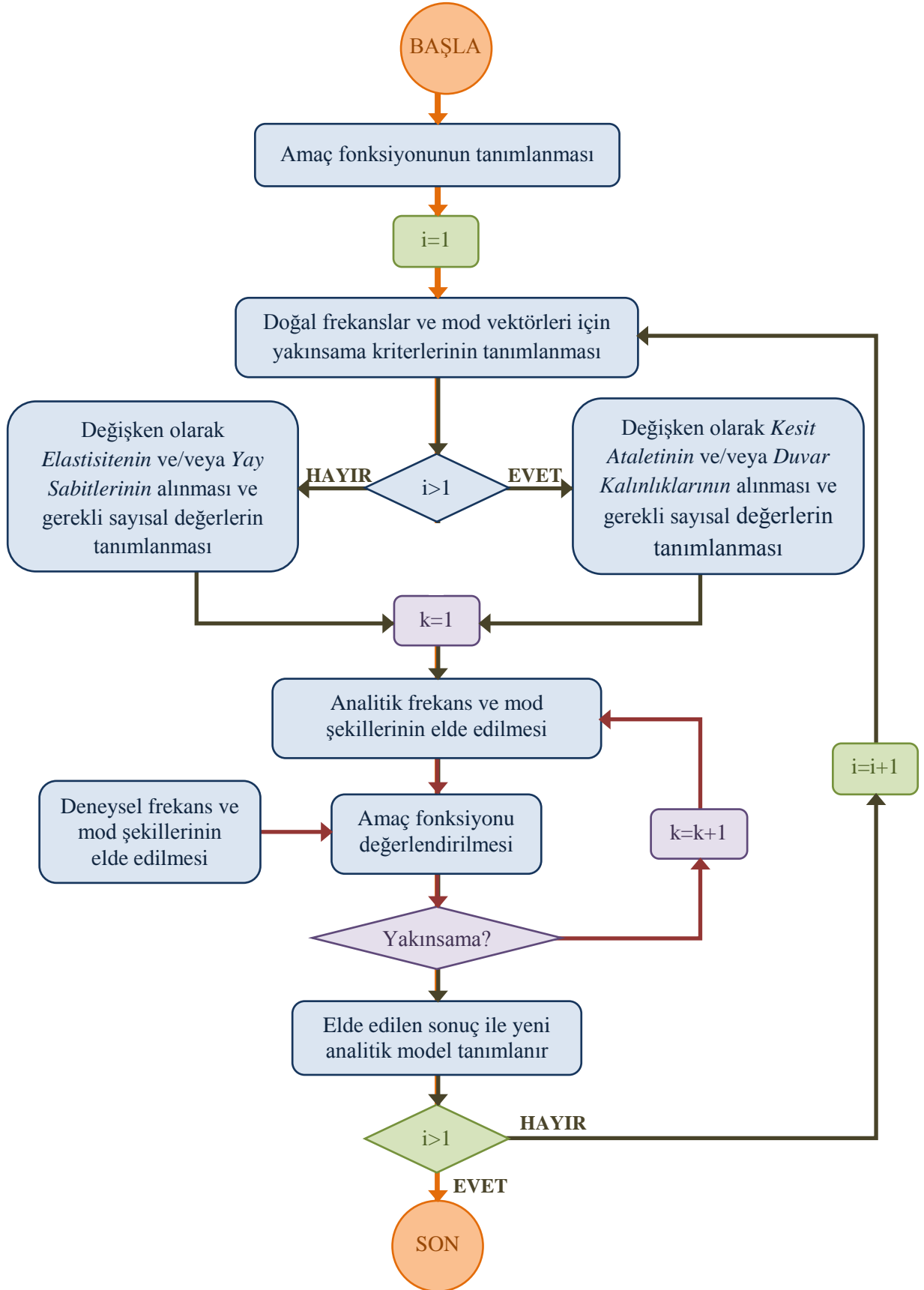
- 5.1. Deneysel ölçüm düzeneğinde tanımlanan modelin düğüm noktaları ile analitik olarak oluşturulan modelin düğüm noktaları eşleştirilir.
- 5.2. Deneysel ve analitik frekanslar ve mod şekilleri karşılaştırılır.
- 5.3. Frekanslar için yakınsama kriteri seçilir.
- 5.4. Mod vektörleri için yakınsama kriteri seçilir.
- 5.5. Değişken parametre olarak kesit ataleti ve/veya duvar kalınlığı seçilir ve parametreye ait sınır değerler ile değişim aralığı tanımlanır.
- 5.6. Yakınsama kriterleri sağlanana kadar çözüm aranır.

#### 6. Yapı elemanlarından kesitinde ve/veya duvar kalınlığında azalma olan elemanlar hasarlı eleman olarak belirlenir.

#### 7. Statik yükleme yapılarak hasarın yapı davranışına etkisi belirlenir.

Bu tez çalışmasında analitik modellerin oluşturulması aşamasında SAP2000 sonlu eleman programı (SAP2000, 2008), deneysel ölçümlerin gerçekleştirilmesi aşamasında PULSE ve OMA yazılımları (PULSE, 2006; OMA 2006) ve model güncelleme aşamasında ise Femtools yazılımı (Femtools, 2003a, 2003b ) kullanılmıştır.



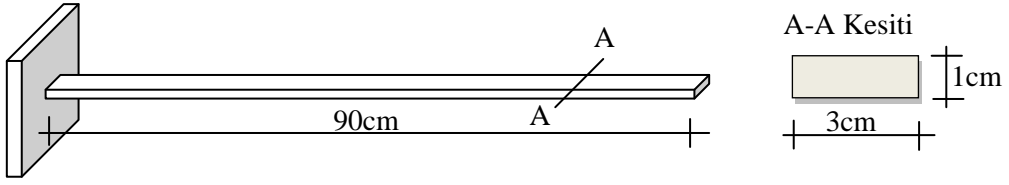


Şekil 2.1. Analitik model güncelleme yöntemi için uygulanan hesap adımları

## 2.2. Çelik Konsol Kiriş Model Uygulaması

### 2.2.1. Modelin Özellikleri ve İnşası

Konsol kiriş olarak seçilen model dikdörtgen kesitli çelik profil kullanılarak oluşturulmuştur. 3cm\*1cm dolu kesitli konsol modelin toplam uzunluğu 90cm'dir. Şekil 2.2'de konsol kiriş modele ait üç boyutlu görünüm ve boyutlar verilmektedir.



Şekil 2.2. Konsol kiriş modele ait üç boyutlu görünüm ve boyutlar

Konsol kiriş model, seçilen özelliklerdeki çelik profil kullanılarak laboratuvar ortamında oluşturulmuştur. Modelin bir ucu, ankastre mesnet şartı oluşturulması amacıyla beton blok üzerine yerleştirilen çelik başlığa kaynaklanmıştır. Şekil 2.3'te oluşturulan konsol kiriş model verilmektedir.

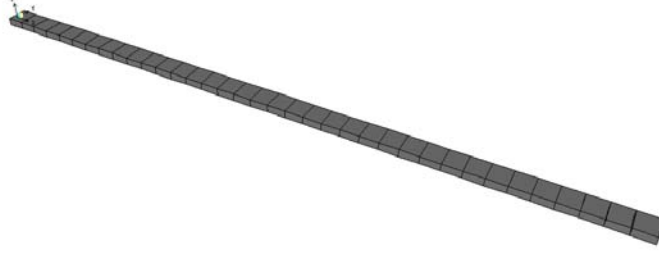


Şekil 2.3. Laboratuvar ortamında oluşturulan konsol kiriş model

### 2.2.2. Başlangıç Analitik Modelin Oluşturulması

Konsol kiriş model, Sonlu Eleman (SE) yöntemiyle analitik olarak modellenmiş ve modelin modal analizi gerçekleştirilmiştir. Sistemin modellenmesinde SAP2000 (SAP2000, 2008) programından yararlanılmıştır. Konsol kirişin modellenmesinde her bir

noktasında üç serbestliği olan kiriş elemanlar kullanılmıştır. Modelin bir ucundaki mesnet şartları tamamen tutulu (ankastre) olarak kabul edilmiştir. Konsol kirişi temsil etmek amacıyla oluşturulan analitik model Şekil 2.4'te verilmektedir.



Şekil 2.4. Konsol kirişe ait başlangıç analitik modeli

Analitik modelin, konsol kirişin gerçek davranışını temsil edebilmesi için model farklı sayıda elemanlara bölünmüş ve ağ yakınsaması kontrolü yapılmıştır. Eleman sayısı belirlenirken daha sonraki aşamalarda yapılacak hasar değerlendirme işlemi de göz önüne alınmıştır. Bunun neticesinde, analitik model otuz altı eşit parçaya bölünmüş ve bu durumda elde edilen sonuçların yeterli olduğu sonucuna varılmıştır. Konsol kirişe ait analitik modelin oluşturulmasında dikkate alınan malzeme ve kesit özellikleri Tablo 2.1'de verilmektedir. Kullanılan malzemenin birim kütlesi olarak hassas ölçüm cihazıyla yapılan ölçüm sonucuna göre belirlenen değer, elastisite değeri olarak ise çelik için verilen standart değer dikkate alınmıştır.

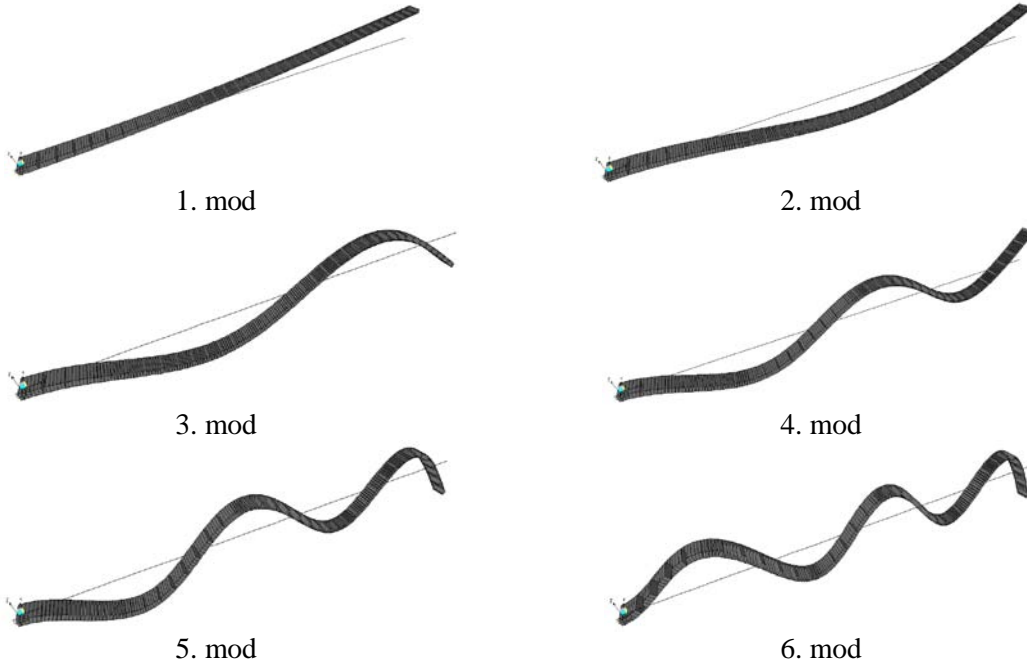
Tablo 2.1. Konsol kiriş modele ait malzeme ve kesit özellikleri

Elastisite Modülü (N/m <sup>2</sup> )	2.06*10 <sup>11</sup>
Birim Kütle (kg/m <sup>3</sup> )	7750
Kesit Alanı (m <sup>2</sup> )	3.00*10 <sup>-4</sup>
Kesit Atalet Momenti (m <sup>4</sup> )	2.50*10 <sup>-9</sup>

Başlangıç analitik model üzerinde gerçekleştirilen modal analizden elde edilen ilk altı doğal frekans değeri Tablo 2.2'de, mod şekilleri ise Şekil 2.5'te verilmektedir.

Tablo 2.2. Konsol kirişe ait başlangıç analitik modelden elde edilen doğal frekanslar

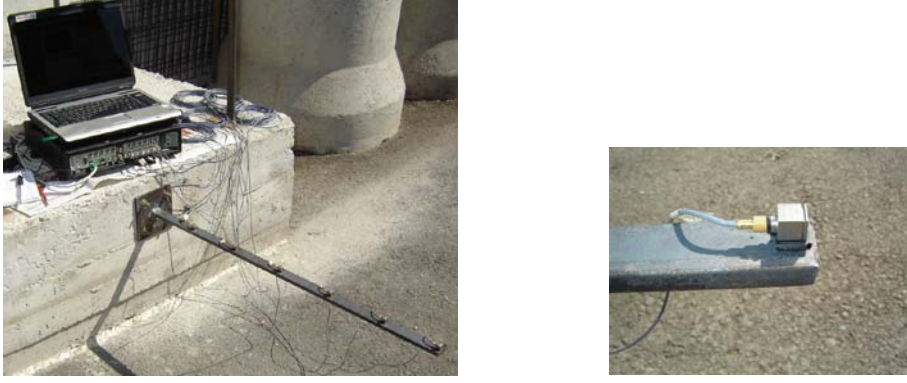
Mod Numarası	Doğal Frekans (Hz)
1	10.278
2	64.357
3	180.06
4	352.56
5	582.33
6	869.19



Şekil 2.5. Konsol kirişe ait başlangıç analitik modelden elde edilen mod şekilleri

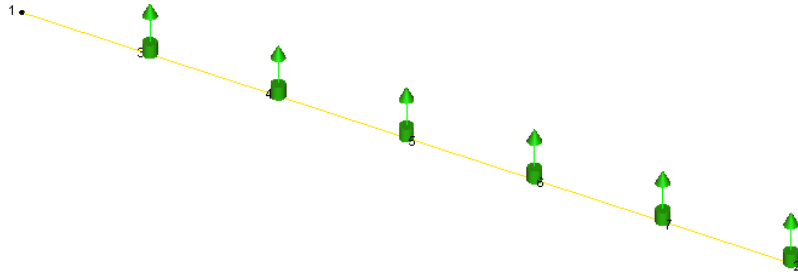
### 2.2.3. Hasarsız Duruma ait Ölçümün Gerçekleştirilmesi

Konsol kiriş model üzerinde gerçekleştirilen deneysel ölçümde toplam altı adet tek eksenli ivmeölçer kullanılmıştır. İvmeölçerler model üzerine eşit aralıklarla ve düşey doğrultudaki tepkileri ölçecek şekilde yerleştirilmiştir. Şekil 2.6'da konsol kiriş model için oluşturulan ölçüm düzeni verilmektedir.



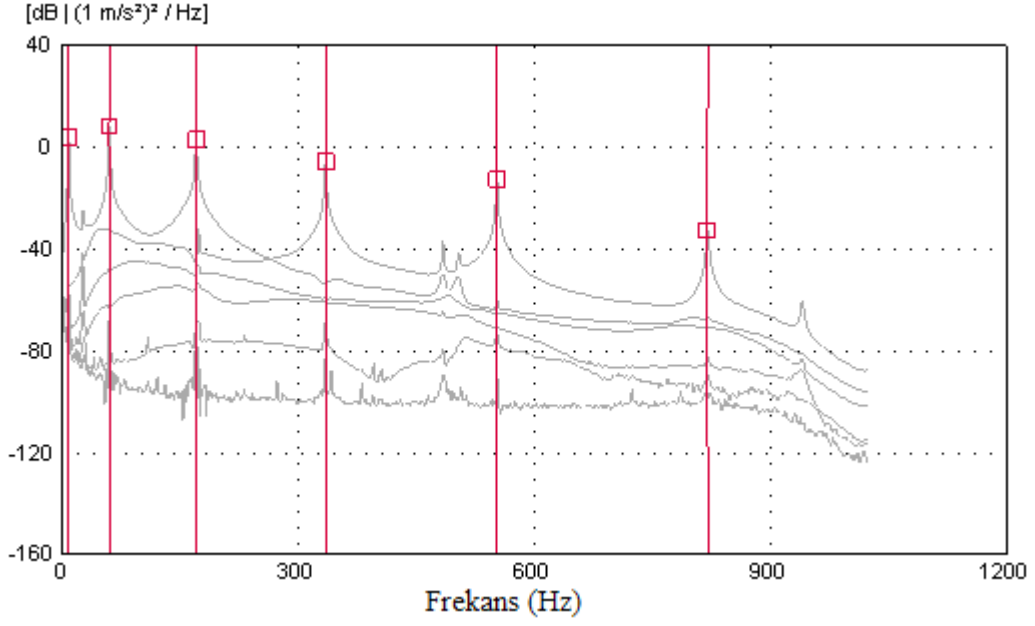
Şekil 2.6. Konsol kiriş için oluşturulan ölçüm düzeni ve ivmeölçer yerleşimi

Gerçekleştirilen ölçümde frekans aralığı 0-800Hz olarak seçilmiş ve toplam 10dk'lık bir ölçüm alınmıştır. Konsol modelde homojen (her noktadan) titreşim temin edebilmek amacıyla modelin bağlı olduğu beton bloğa plastik uçlu balyozla rastgele vurularak titreşim üretilmiştir. Deneysel ölçüm sırasında ivmeölçerlerden gelen sinyaller, PULSE (PULSE, 2006) veri toplama arayüz programında eşzamanlı olarak Fourier dönüşümlerine tabi tutularak bilgisayara kayıt edilmiştir. Konsol model üzerinde ölçüm gerçekleştirilmesi için kullanılan PULSE programında oluşturulan temsili model ve ivmeölçer yerleşimi Şekil 2.7'de verilmektedir.



Şekil 2.7. Konsol kirişe ait temsili model ve ölçüm düzeni

Ölçümden elde edilen verilere, OMA (OMA, 2006) programında ağırlık fonksiyonları yardımıyla filtreleme işlemi uygulanmıştır. Konsol kiriş model üzerinde gerçekleştirilen ölçümde modal parametreler GFTAA yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Bu yöntemin kullanılması sonucunda her bir kanaldaki sinyale ait spektral yoğunluk fonksiyonları elde edilmiştir. Konsol modelin hasarsız durumu için gerçekleştirilen ölçümden elde edilen spektral yoğunluk fonksiyonları Şekil 2.8'de verilmektedir.

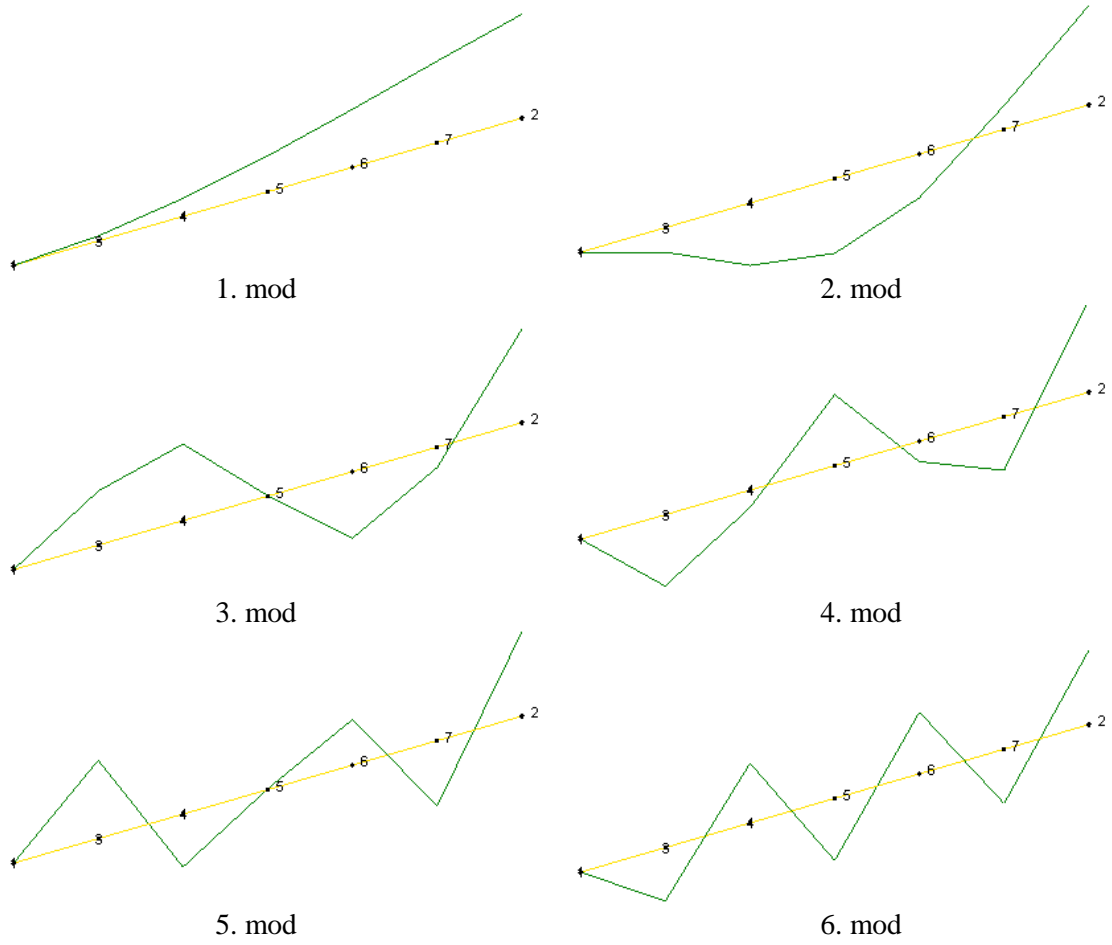


Şekil 2.8. Konsol kiriş modelin hasarsız durum için spektral yoğunluk fonksiyonları

Spektral yoğunluk fonksiyonları kullanılarak doğal frekanslar ve modal sönüm oranları belirlenmiştir. Konsol modelin hasarsız durumu için gerçekleştirilen ölçümden elde edilen ilk altı frekans ve modal sönüm oranı değerleri Tablo 2.3'te verilmektedir. Konsol kiriş modelin hasarsız durum için ölçümlerden elde edilen mod şekilleri ise Şekil 2.9'da verilmektedir.

Tablo 2.3. Konsol kiriş modelin hasarsız durum için ölçülen doğal frekansları ve modal sönüm oranları

Mod Numarası	Doğal Frekans (Hz)	Modal Sönüm Oranı (%)
1	9.788	6.269
2	61.288	0.694
3	171.59	0.394
4	335.77	0.192
5	553.74	0.125
6	821.30	0.125



Şekil 2.9. Konsol kiriş modelin hasarsız durum için ilk altı mod şekli

#### 2.2.4. Analitik Modelin Kalibre Edilmesi

Konsol kiriş modele ait başlangıç analitik modelin oluşturulması aşamasında malzeme özelliklerinde ve sınır şartlarında bazı kabuller yapılmıştır. Başlangıç analitik modelin oluşturulmasında mesnet birleşiminin ankastre, kullanılan malzemenin elastisite değerinin standartlarda verilen değer olduğu varsayılmıştır. Hasarsız durum için gerçekleştirilen ölçümden ve başlangıç analitik modelden elde edilen frekans değerleri ile modlar arasındaki uyumun göstergesi olarak değerlendirilen Modal Güvence Kriteri (MGK) değerleri Tablo 2.4'te verilmiştir.

Tablo 2.4. Konsol kiriş modelin hasarsız durum için deneysel ve başlangıç analitik frekansları ve MGK değerleri

Mod Numarası	Doğal Frekansı(Hz)			Modal Güvence Kriteri (MGK)
	Deneysel Hasarsız	Analitik Başlangıç	Fark* (%)	
1	9.788	10.278	5.00	1.000
2	61.288	64.357	5.00	0.999
3	171.59	180.06	4.94	0.998
4	335.77	352.56	5.00	0.996
5	553.74	582.33	5.16	0.993
6	821.30	869.19	5.83	0.993

\*Fark değeri mutlak değerce hesaplanmıştır.

Gerçekleştirilen birçok çalışmada başlangıç modelin kalibre edilmesinde elastisite değerindeki değişimin dikkate alınmasının etkili sonuç verdiği literatür araştırması kısmında belirtilmişti. Tablo 2.4'te de görüldüğü üzere, frekanslar arasında ortalama %5.16'lık bir fark vardır. Frekanslar arası fark değerlerinin birbirine yakın olması malzeme özelliklerinde bir değişim olduğuna işaret etmektedir. Bu nedenle, konsol kirişin başlangıç modelinin kalibre edilmesinde elastisite değeri değişken olarak dikkate alınmış; doğal frekans, mod şekli ve MGK değerlerinde en fazla %1 fark olacak şekilde kriterler ortaya konulmuştur. Bu amaçla elastisite değerinde %10'luk bir değişimin olabileceği varsayılarak yapılan iterasyonlar neticesinde verilen yakınsama kriteri sağlanmış ve elde edilen elastisite değeri için doğal frekanslar ve mod şekilleri hesaplanmıştır. Başlangıç modelin elastisite değerindeki değişim dikkate alınarak gerçekleştirilen kalibrasyon neticesinde elde edilen değerler Tablo 2.5'te verilmektedir.

Tablo 2.5. Konsol kiriş modelin kalibre edilmiş duruma ait deneysel ve analitik frekans değerleri ile MGK değerleri

Mod Numarası	Doğal Frekansı(Hz)			Modal Güvence Kriteri
	Deneysel Hasarsız	Analitik Kalibre	Fark (%)	
1	9.788	9.774	0.14	1.000
2	61.288	61.201	0.14	0.999
3	171.59	171.23	0.21	0.998
4	335.77	335.27	0.15	0.996
5	553.74	553.78	0.01	0.993
6	821.30	826.56	0.64	0.993



Başlangıç analitik modelin kalibre edilmesi sonucunda frekanslar arasındaki ortalama fark %5.16'dan %0.21'e kadar indirilebilmiştir. Elastisite değerindeki değişim dikkate alınarak gerçekleştirilen analitik model kalibrasyonu işleminde elastisite değeri  $2.06 \cdot 10^{11} \text{N/m}^2$  değerinden  $1.8629 \cdot 10^{11} \text{N/m}^2$  değerine indirilmiştir. Elde edilen sonuçlar arasındaki uyum değerlendirildiğinde elastisite değerinde meydana gelen %9.57'lik değişim makul olarak kabul edilmektedir.

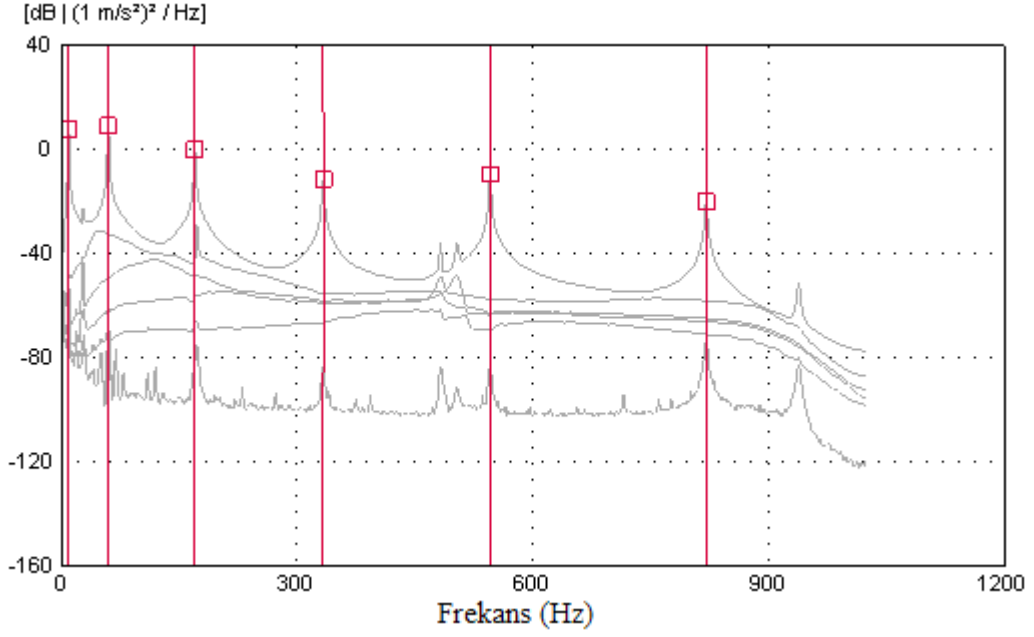
### 2.2.5. Hasarlı Durum Ölçümünün Gerçekleştirilmesi

Konsol kiriş modelde yeri ve büyüklüğü bilinen bir hasar etkisi oluşturulmuş ve deneysel ölçümler aynı çevresel şartlar altında tekrarlanmıştır. Hasar etkisi olarak konsol kiriş modelde mesnetten serbest uç doğrultusunda 52.5cm'de yaklaşık 5mm derinliğinde bir kesik oluşturulmuştur. Şekil 2.10'da çelik testere kullanılarak oluşturulan ve 1mm genişliğinde kesik gösterilmektedir.



Şekil 2.10. Konsol kiriş modelde oluşturulan hasar durumu

Hasarlı duruma ait ölçüm hasarsız durumda kullanılan ölçüm düzeni kullanılarak tekrarlanmıştır. Deneysel ölçümden hasarlı durum için elde edilen spektral yoğunluk fonksiyonları Şekil 2.11'de verilmektedir.

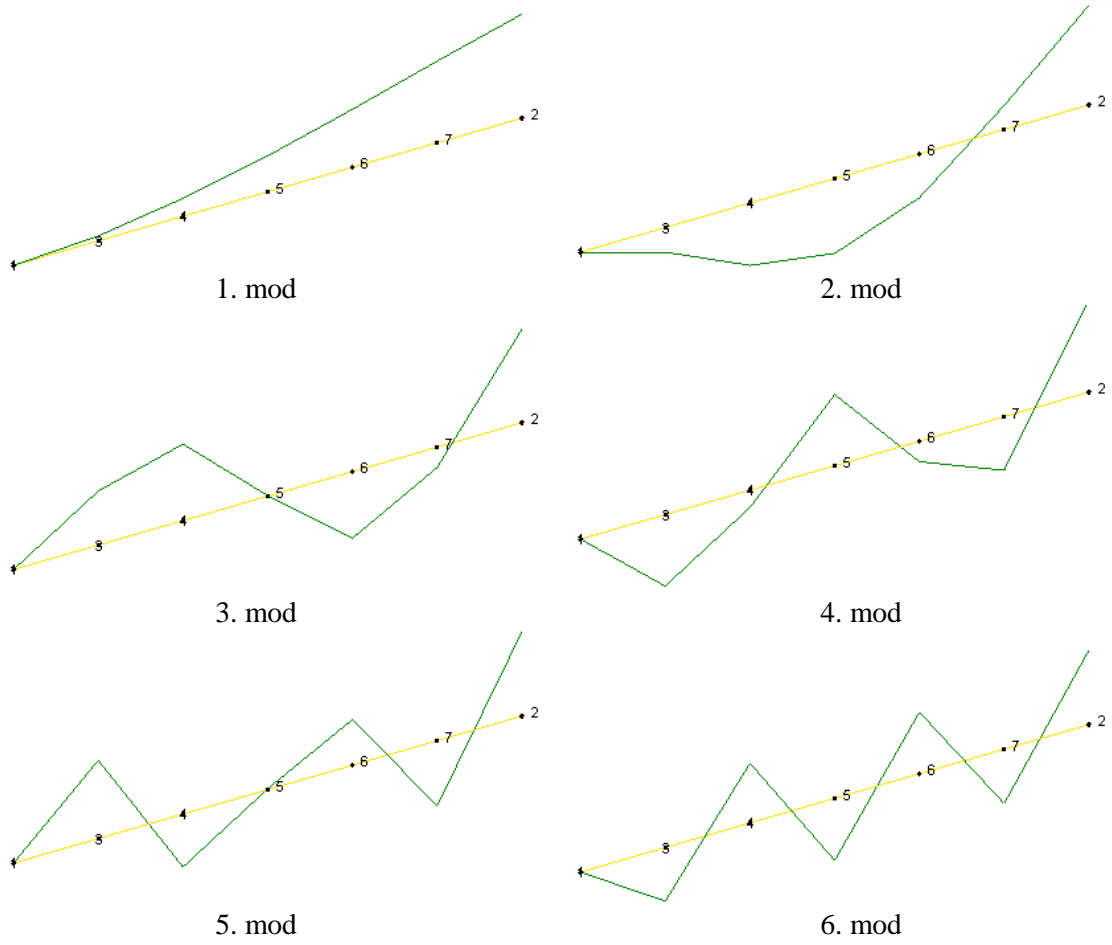


Şekil 2.11. Konsol kiriş modelin hasarlı durumu için spektral yoğunluk fonksiyonları

Konsol kiriş modelin hasarlı durumu için gerçekleştirilen ölçümden elde edilen ilk altı doğal frekans ve modal sönüm oranları Tablo 2.6'da, mod şekilleri ise Şekil 2.12'de verilmektedir.

Tablo 2.6. Konsol kiriş modelin hasarlı durum için ölçülen doğal frekansları ve modal sönüm oranları

Mod Numarası	Doğal Frekans (Hz)	Modal Sönüm Oranı (%)
1	9.752	6.438
2	60.195	0.950
3	170.35	0.374
4	333.54	0.237
5	546.04	0.135
6	821.01	0.118



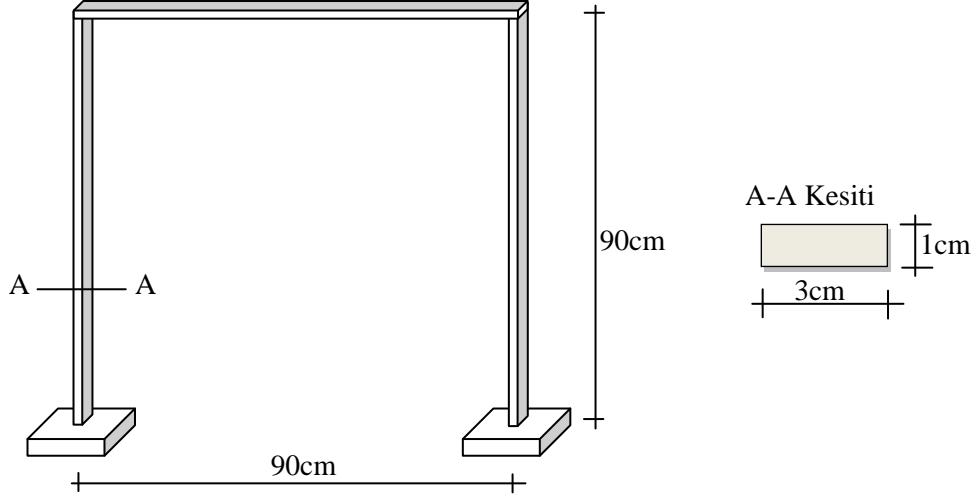
Şekil 2.12. Konsol kiriş modelin hasarlı durum için mod şekilleri

Konsol kiriş modelin hasarsız ve hasarlı durumları için gerçekleştirilen ölçümlerden doğal frekansların ve sönüm oranlarının az da olsa değiştiği, hasarlı durumda daha düşük frekans değerleri olduğu görülmektedir. Benzer şekilde mod şekillerinde de çok küçük değişiklikler meydana gelmiştir.

## 2.3. İki Boyutlu Çelik Çerçeve Model Uygulaması

### 2.3.1. Modelin Özellikleri ve İnşası

İki boyutlu çerçeve model dikdörtgen kesitli çelik profiller kullanılarak oluşturulmuştur. 3cm\*1cm dolu kesitli malzemeler kullanılarak oluşturulan modelin mesnet açıklığı ve çerçeve yüksekliği ise 90cm'dir. Şekil 2.13'te iki boyutlu çerçeve modele ait görünüm ve boyutlar verilmektedir.



Şekil 2.13. İki boyutlu çelik çerçeve modelin görünümü ve boyutları

İki boyutlu çerçeve model, laboratuarda seçilen kesitteki çelik profil kullanılarak oluşturulmuştur. Modelin kolon ayakları beton blok içerisine yerleştirilen çelik başlığa kaynaklanarak ankastre mesnet şartı temin edilmeye çalışılmıştır. Şekil 2.14'te laboratuarda oluşturulan iki boyutlu çerçeve model verilmektedir.

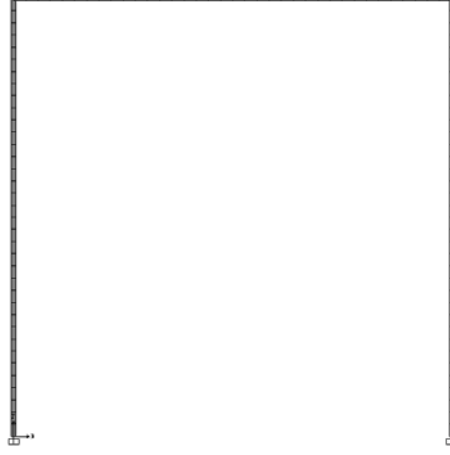


Şekil 2.14. Laboratuarda oluşturulan iki boyutlu çerçeve model ve mesnet birleşimleri

### 2.3.2. Başlangıç Analitik Modelin Oluşturulması

İki boyutlu çerçeve SE yöntemiyle analitik olarak SAP2000 programında modellenmiş ve modal analizi gerçekleştirilmiştir. İki boyutlu çerçevenin

modellenmesinde her bir noktasında üç serbestliği olan kiriş elemanlar kullanılmıştır. Modelin kolon alt uçlarındaki mesnet şartları tamamen tutulu (ankastre) olarak dikkate alınmıştır. İki boyutlu çerçeveyi temsil etmek amacıyla oluşturulan analitik model Şekil 2.15'te verilmektedir.



Şekil 2.15. İki boyutlu çerçeveye ait başlangıç analitik modeli

Analitik modelin iki boyutlu çerçevenin gerçek davranışını temsil edebilmesi amacıyla her bir eleman otuz altı eşit parçaya bölünmüştür. İki boyutlu çerçeveye ait analitik modelin oluşturulmasında dikkate alınan malzeme ve kesit özellikleri Tablo 2.7'de verilmektedir.

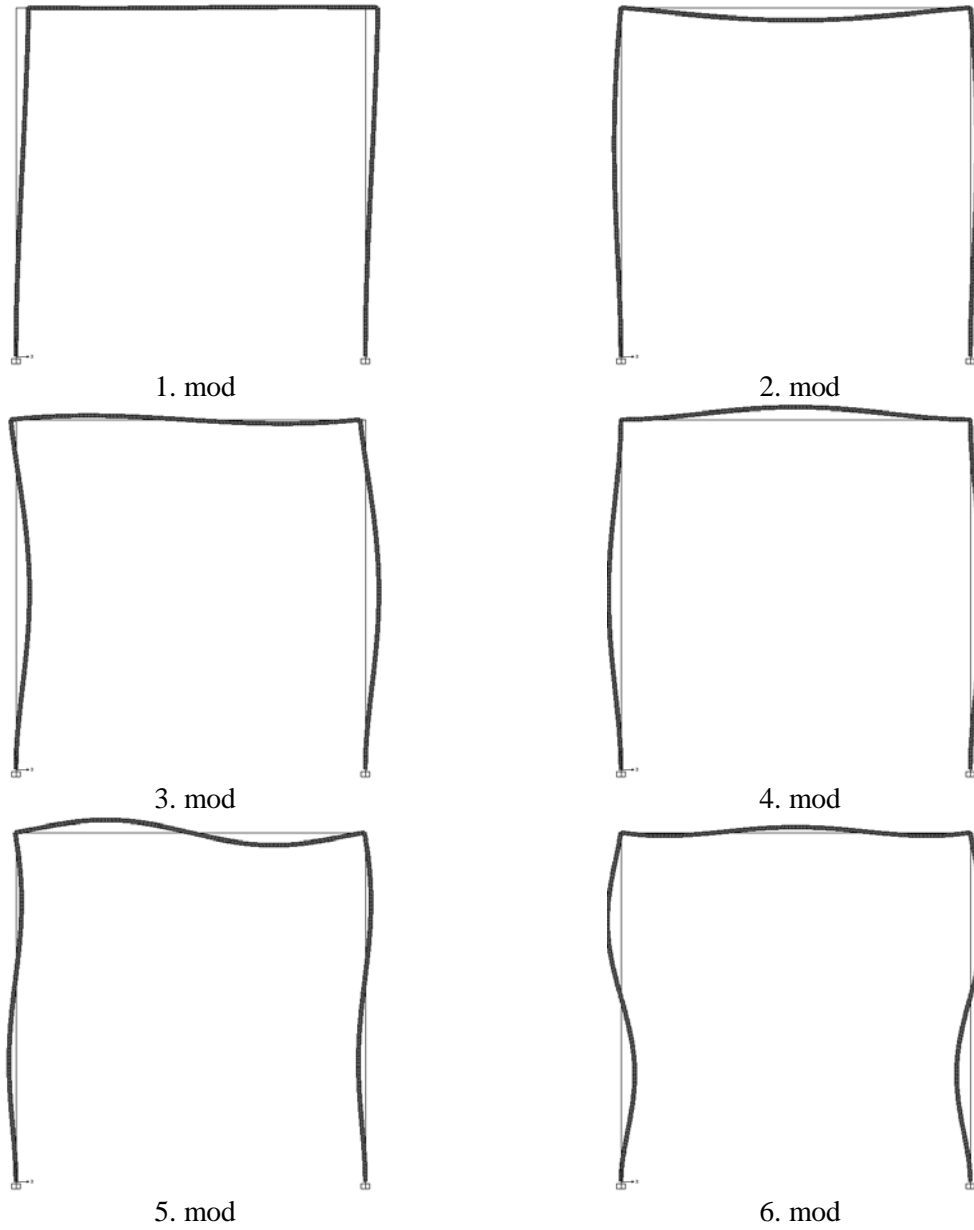
Tablo 2.7. İki boyutlu çerçeve modelin malzeme ve kesit özellikleri

Elastisite Modülü (N/m <sup>2</sup> )	2.06*10 <sup>11</sup>
Birim Kütle (kg/m <sup>3</sup> )	7750
Kesit Alanı (m <sup>2</sup> )	3.00*10 <sup>-4</sup>
Kesit Atalet Momenti (m <sup>4</sup> )	2.50*10 <sup>-9</sup>

İki boyutlu çerçeve için oluşturulan başlangıç analitik modeli üzerinde gerçekleştirilen modal analizlerden elde edilen ilk altı doğal frekans değeri Tablo 2.8'de, mod şekilleri ise Şekil 2.16'da verilmektedir.

Tablo 2.8. İki boyutlu çerçeveye ait başlangıç analitik modelden elde edilen ilk altı doğal frekans değeri

Mod Numarası	Doğal Frekansı (Hz)
1	9.371
2	36.979
3	60.316
4	65.398
5	132.07
6	161.35



Şekil 2.16. İki boyutlu çerçeveye ait başlangıç analitik modelden elde edilen mod şekilleri

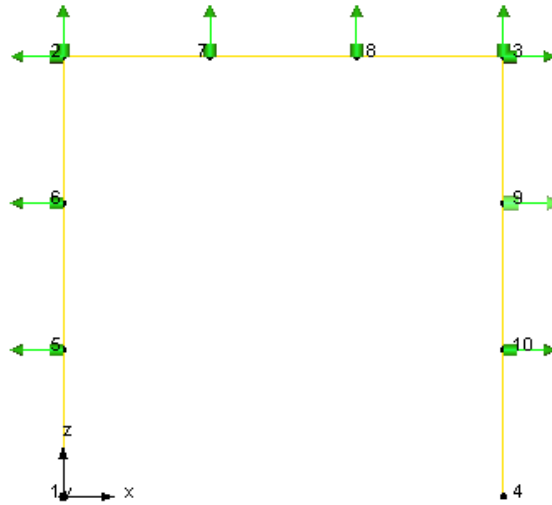
### 2.3.3. Hasarsız Durum Ölçümünün Gerçekleştirilmesi

İki boyutlu çerçeve model üzerindeki ölçümde toplam on adet tek eksenli ivmeölçer kullanılmıştır. İvmeölçerler model üzerine eşit aralıklarla (30cm arayla) düşey ve yatay doğrultulardaki tepkileri ölçecek şekilde yerleştirilmiştir. Şekil 2.17’de iki boyutlu çerçeve model üzerinde gerçekleştirilen ölçümde kullanılan ölçüm düzeni görülmektedir.



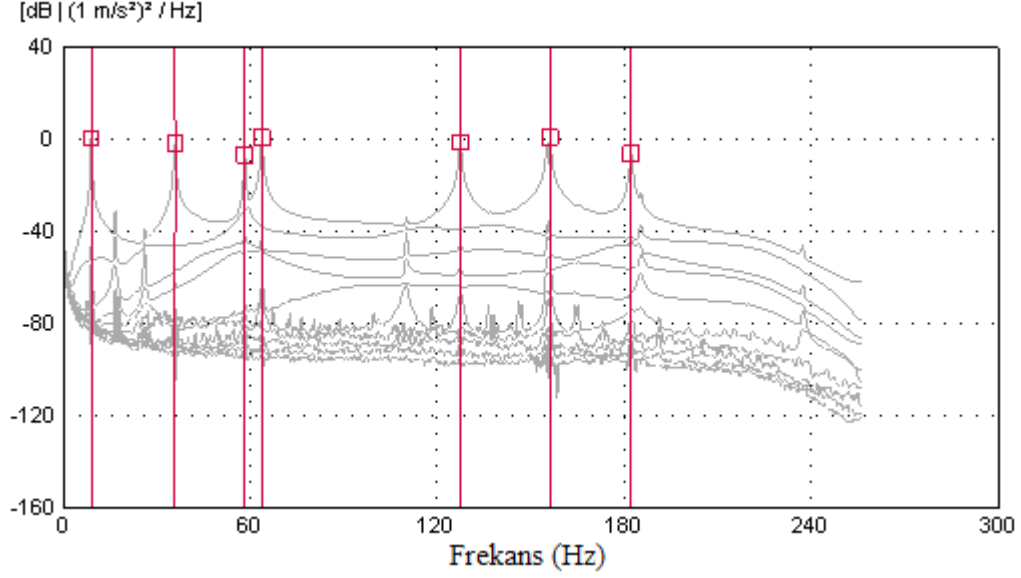
Şekil 2.17. İki boyutlu çerçeve modeldeki deneysel ölçüm düzeni ve ivmeölçer yerleşimi

Ölçümlerde iki boyutlu çerçeve modelin ilk altı frekans değerinin ve mod şekillerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, ölçümde frekans aralığı 0-256Hz olarak seçilmiş ve toplam 10dk’lık bir ölçüm alınmıştır. Çerçeve model üzerindeki ölçüm için PULSE programında oluşturulan temsili model ve ivmeölçer yerleşimi Şekil 2.18’de verilmektedir.



Şekil 2.18. İki boyutlu çerçeve modelin ölçümünde kullanılan deneysel ölçüm düzeni

İki boyutlu çerçeve modelin her noktasında titreşim temin edebilmek amacıyla modelin bağlı olduğu beton bloğa balyozla rastgele vurularak titreşimler üretilmiştir. İki boyutlu çerçeve modelin hasarsız durumu için gerçekleştirilen ölçümlerden, GFTAA yöntemi kullanılarak elde edilen spektral yoğunluk fonksiyonları Şekil 2.19’da verilmektedir.



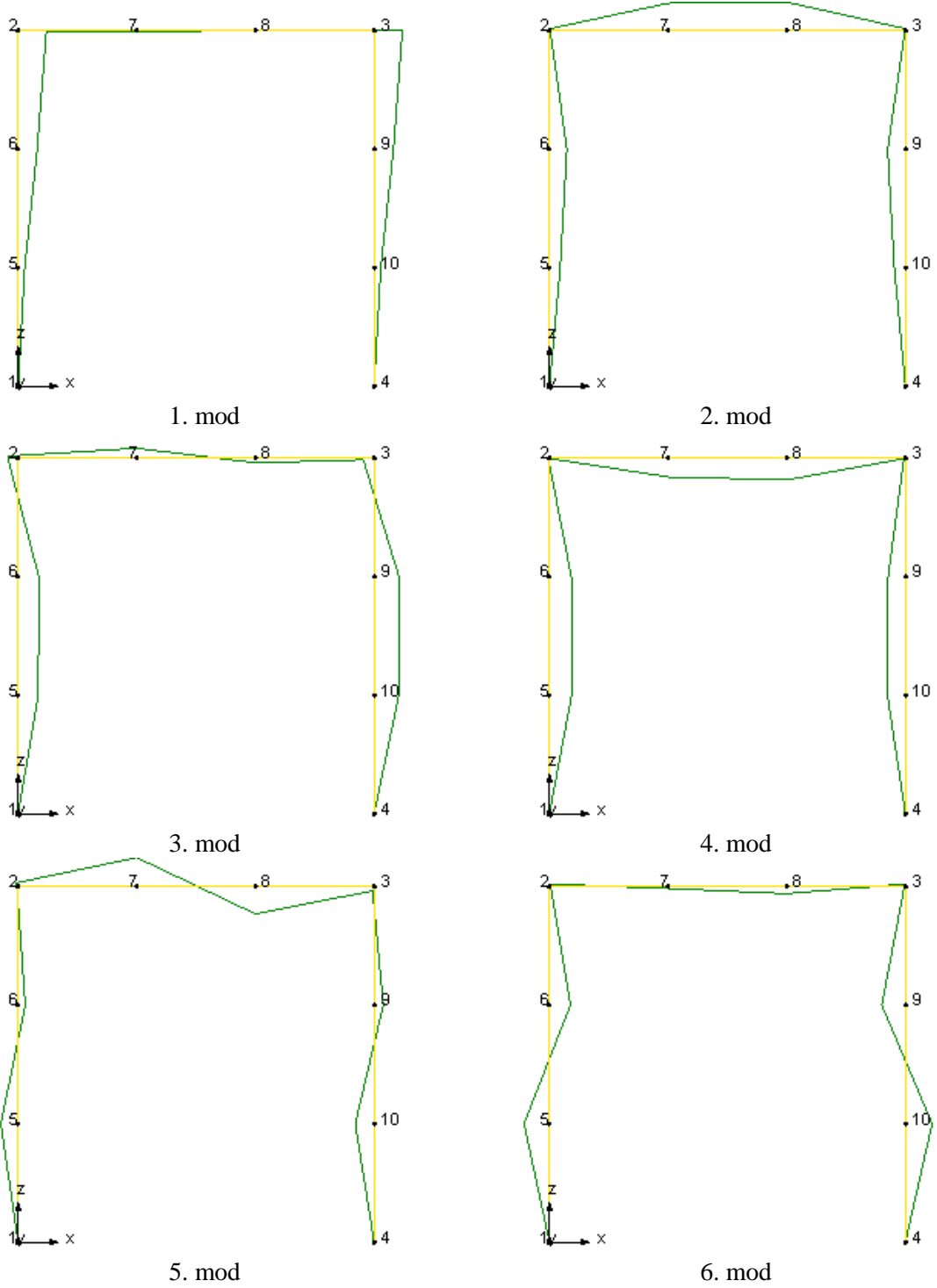
Şekil 2.19. İki boyutlu çerçeve modelin hasarsız durum için spektral yoğunluk fonksiyonları

Spektral yoğunluk fonksiyonlarından elde edilen ilk altı doğal frekans değeri ve modal sönüm oranları Tablo 2.9’da verilmektedir. Ayrıca, çerçeve modelin hasarsız durum için gerçekleştirilen ölçümünden elde edilen mod şekilleri Şekil 2.20’de verilmektedir.

Tablo 2.9. İki boyutlu çerçeve modelin hasarsız durum için ölçülen doğal frekansları ve modal sönüm oranları

Mod Numarası	Doğal Frekansı (Hz)	Modal Sönüm Oranı (%)
1	9.065	1.587
2	35.890	0.458
3	58.313	0.286
4	63.795	0.295
5	127.470	0.193
6	156.390	0.088





Şekil 2.20. İki boyutlu çerçeve modelin hasarsız durum için mod şekilleri

### 2.3.4. Analitik Modelin Kalibre Edilmesi

İki boyutlu çerçevenin başlangıç analitik modelinin oluşturulmasında konsol modele benzer şekilde malzeme özelliklerinden sınır şartlarına kadar birçok kabuller yapılmıştı. Bu

nedenle, modelin hasarsız ölçüm sonuçlarının analitik sonuçlardan farklı olması muhtemeldir. İki boyutlu çerçevenin hasarsız durum için gerçekleştirilen ölçümünden ve başlangıç analitik modelin modal analizinden elde edilen frekans değerleri ve MGK değerleri Tablo 2.10’da verilmektedir.

Tablo 2.10. İki boyutlu çerçevenin hasarsız durum için deneysel ve başlangıç analitik frekansları ile MGK değerleri

Mod Numarası	Doğal Frekansı(Hz)			Modal Güvence Kriteri
	Deneysel Hasarsız	Analitik Başlangıç	Fark (%)	
1	9.065	9.371	3.38	0.999
2	35.890	36.979	3.03	0.996
3	58.313	60.316	3.43	0.982
4	63.795	65.398	2.51	0.988
5	127.470	132.07	3.61	0.984
6	156.390	161.35	3.17	0.987

Tablo 2.10’da verilen frekanslar arasındaki farklar dikkate alındığında, frekanslar arasında ortalama %3.19’luk bir farkın olduğu görülmektedir. Frekanslar arasındaki fark değerlerinin birbirine yakın olması malzeme özelliklerinde bir değişim olduğuna işaret etmektedir. Bu nedenle, iki boyutlu çerçevenin başlangıç modelinin kalibre edilmesinde elastisite değeri değişken olarak dikkate alınmış; doğal frekans, mod şekli ve MGK değerlerinde en fazla %1 farklılık sağlanacak şekilde kriterler ortaya konulmuştur. Bu amaçla, elastisite değerinde %10’luk bir değişimin olabileceği varsayılarak yapılan çözümler sonucunda seçilen elastisite değeri için doğal frekanslar ile mod şekilleri hesaplanmıştır. Başlangıç analitik modelinde elastisite değerindeki değişim dikkate alınarak gerçekleştirilen kalibrasyon neticesinde elde edilen değerler Tablo 2.11’de verilmektedir.

Tablo 2.11. İki boyutlu çerçevenin kalibre edilmiş durum için deneysel ve analitik frekansları ile MGK değerleri

Mod Numarası	Doğal Frekansı(Hz)			Modal Güvence Kriteri
	Deneysel Hasarsız	Analitik Kalibre	Fark (%)	
1	9.065	9.081	0.18	0.999
2	35.890	35.837	0.15	0.996
3	58.313	58.453	0.24	0.982
4	63.795	63.378	0.65	0.988
5	127.470	127.99	0.41	0.984
6	156.390	156.36	0.02	0.987

İki boyutlu çerçevenin başlangıç analitik modelinin kalibre edilmesi sonucunda frekanslar arasındaki ortalama farkın %3.19'dan %0.27'e kadar indirgenebildiği görülmektedir. Elastisite değerindeki değişim dikkate alınarak gerçekleştirilen analitik model kalibrasyonu işleminde, elastisite değeri  $2.06 \cdot 10^{11} \text{N/m}^2$  değerinden  $1.9347 \cdot 10^{11} \text{N/m}^2$  değerine indirilmiştir. Elastisite değerinde meydana gelen %6.08'lik değişim, frekanslar arasındaki uyum değerlendirildiğinde makul kabul edilmektedir.

### 2.3.5. Hasarlı Durum Ölçümlerinin Gerçekleştirilmesi

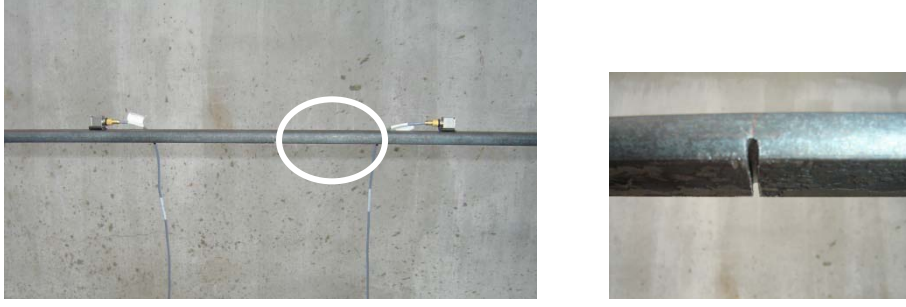
İki boyutlu çerçeve modelde yeri ve büyüklüğü bilinen iki farklı hasar etkisi oluşturulmuş ve deneysel ölçüm aynı çevresel şartlar altında tekrarlanmıştır. Hasar etkisi olarak;

- ✓ Kiriş ortasında yaklaşık 5mm derinliğinde bir kesik
- ✓ Kolon-kiriş birleşim bölgelerinde kesit kaybı

olmak üzere iki durum dikkate alınmıştır. Hasar etkileri birbirini takiben aynı model üzerinde oluşturulmuştur.

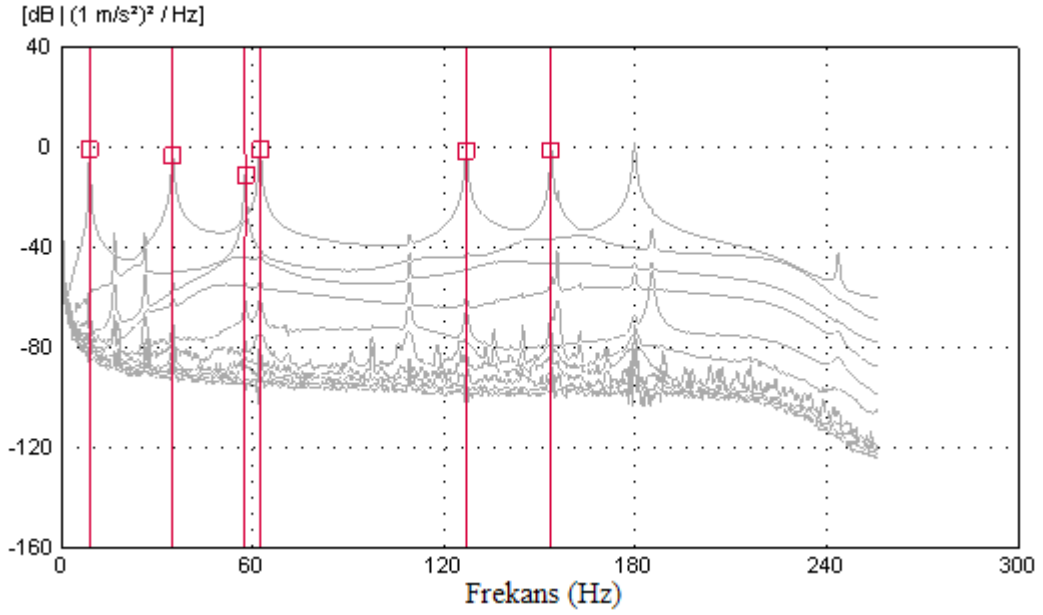
#### 2.3.5.1. Kiriş Ortası Hasarı

Şekil 2.21'de iki boyutlu çerçeve modelde oluşturulan kiriş ortası hasar durumu gösterilmektedir.



Şekil 2.21. İki boyutlu çerçeve modelde oluşturulan kiriş ortası hasarı

İki boyutlu çerçeve modelde hasarlı duruma ait ölçümde hasarsız durumda kullanılan ölçüm düzeni kullanılarak ölçüm tekrarlanmıştır. Kiriş ortasının hasarlı olduğu durum için deneysel ölçümden GFTAA yöntemi kullanılarak elde edilen spektral yoğunluk fonksiyonları Şekil 2.22’de verilmektedir.

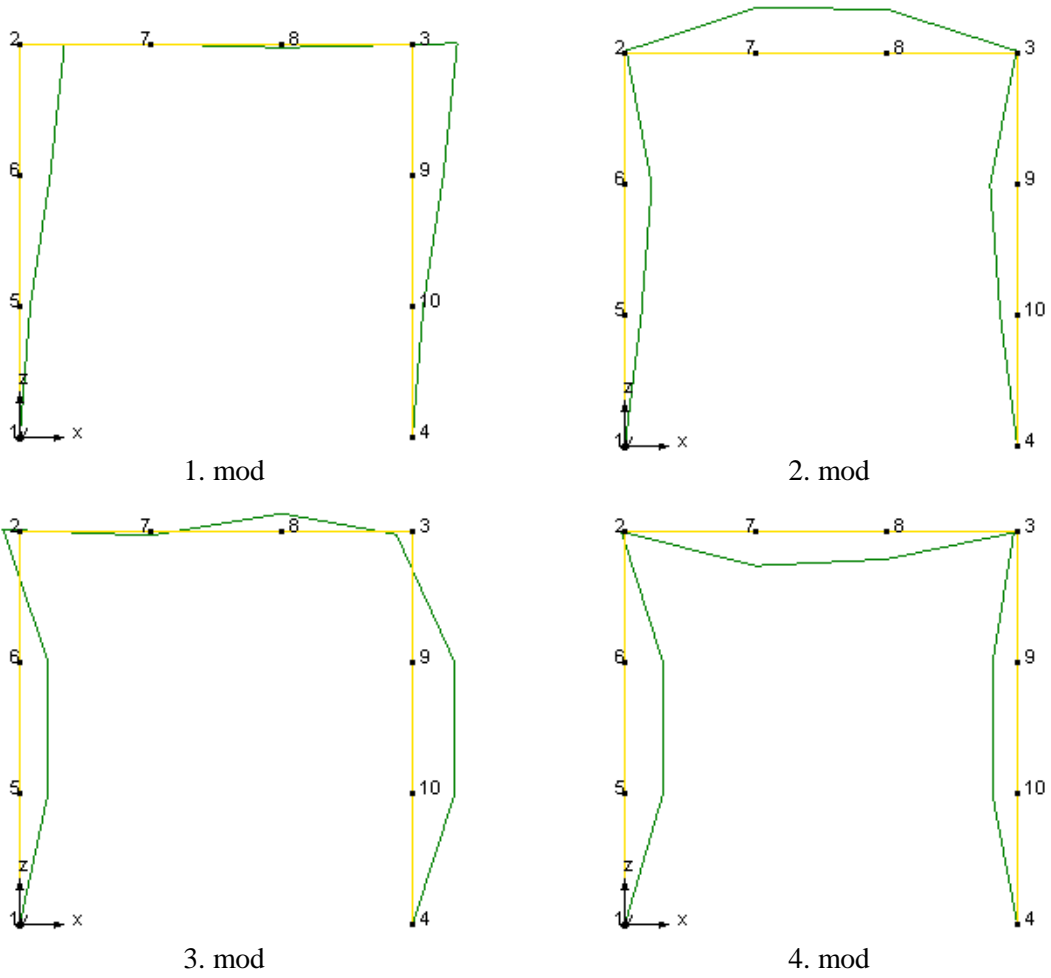


Şekil 2.22. İki boyutlu çerçeve modelin kiriş ortası hasarı için spektral yoğunluk fonksiyonları

İki boyutlu çerçeve modelin kiriş ortası hasarı için gerçekleştirilen ölçümden elde edilen ilk altı doğal frekans değeri ve modal sönüm oranları Tablo 2.12’de, mod şekilleri ise Şekil 2.23’te verilmektedir.

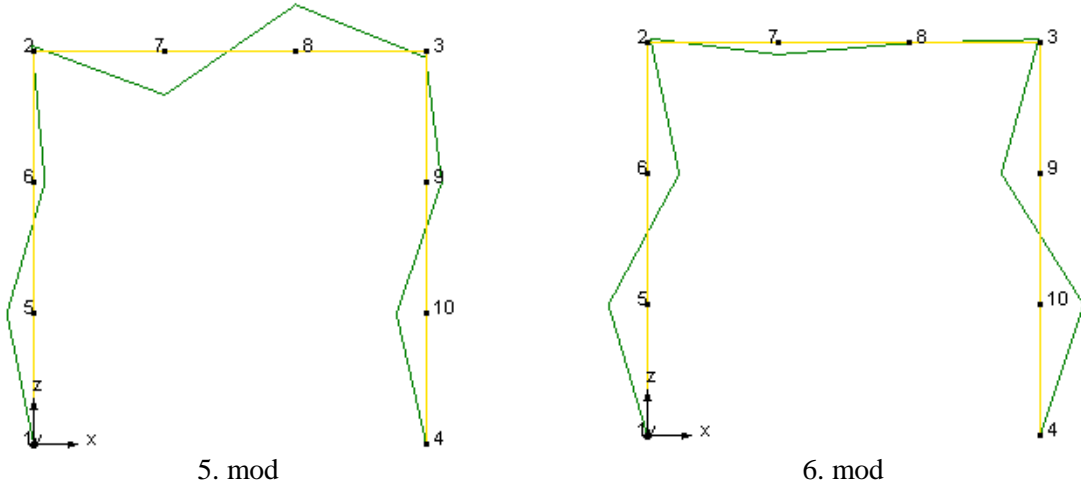
Tablo 2.12. İki boyutlu çerçevenin kiriş ortası hasarı için ölçülen doğal frekansları ve modal sönüm oranları

Mod Numarası	Doğal Frekansı (Hz)	Modal Sönüm Oranı (%)
1	9.004	1.485
2	35.018	0.671
3	57.699	0.355
4	62.420	0.359
5	127.070	0.190
6	153.730	0.137



Şekil 2.23. İki boyutlu çerçevenin kiriş ortası hasarı için mod şekilleri

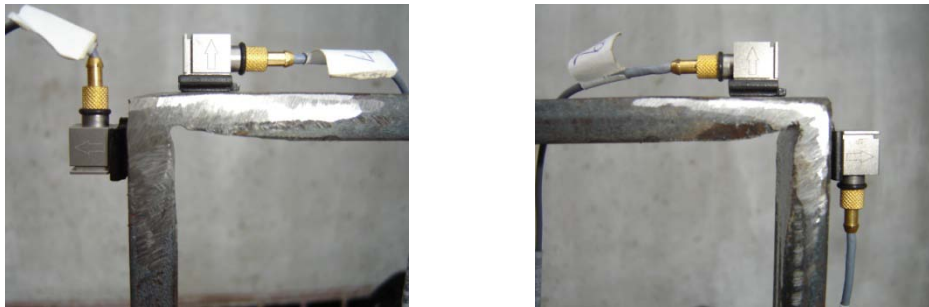
Şekil 2.23'ün devamı



İki boyutlu çerçeve modelde hasarlı durum için gerçekleştirilen ölçümde doğal frekansların ve sönüm oranlarının azaldığı, mod şekillerinde ise çok küçük değişikliklerin meydana geldiği belirlenmiştir.

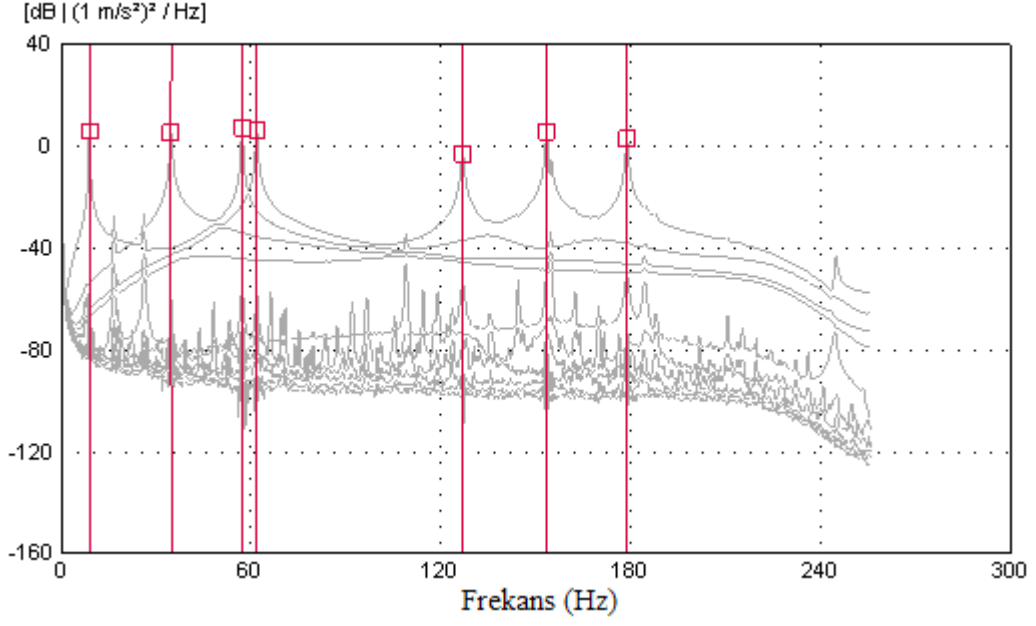
### 2.3.5.2. Kolon-Kiriş Birleşim Bölgesi Hasarı

İki boyutlu çerçeve modelde kolon-kiriş birleşim hasar durumu Şekil 2.24'te gösterilmektedir.



Şekil 2.24. İki boyutlu çerçeve modelde kolon-kiriş birleşim bölgesi hasarı

Bu hasar durumu için de daha önce kullanılan ölçüm düzeni kullanılarak ölçüm tekrarlanmış ve elde edilen spektral yoğunluk fonksiyonları Şekil 2.25'te verilmektedir.

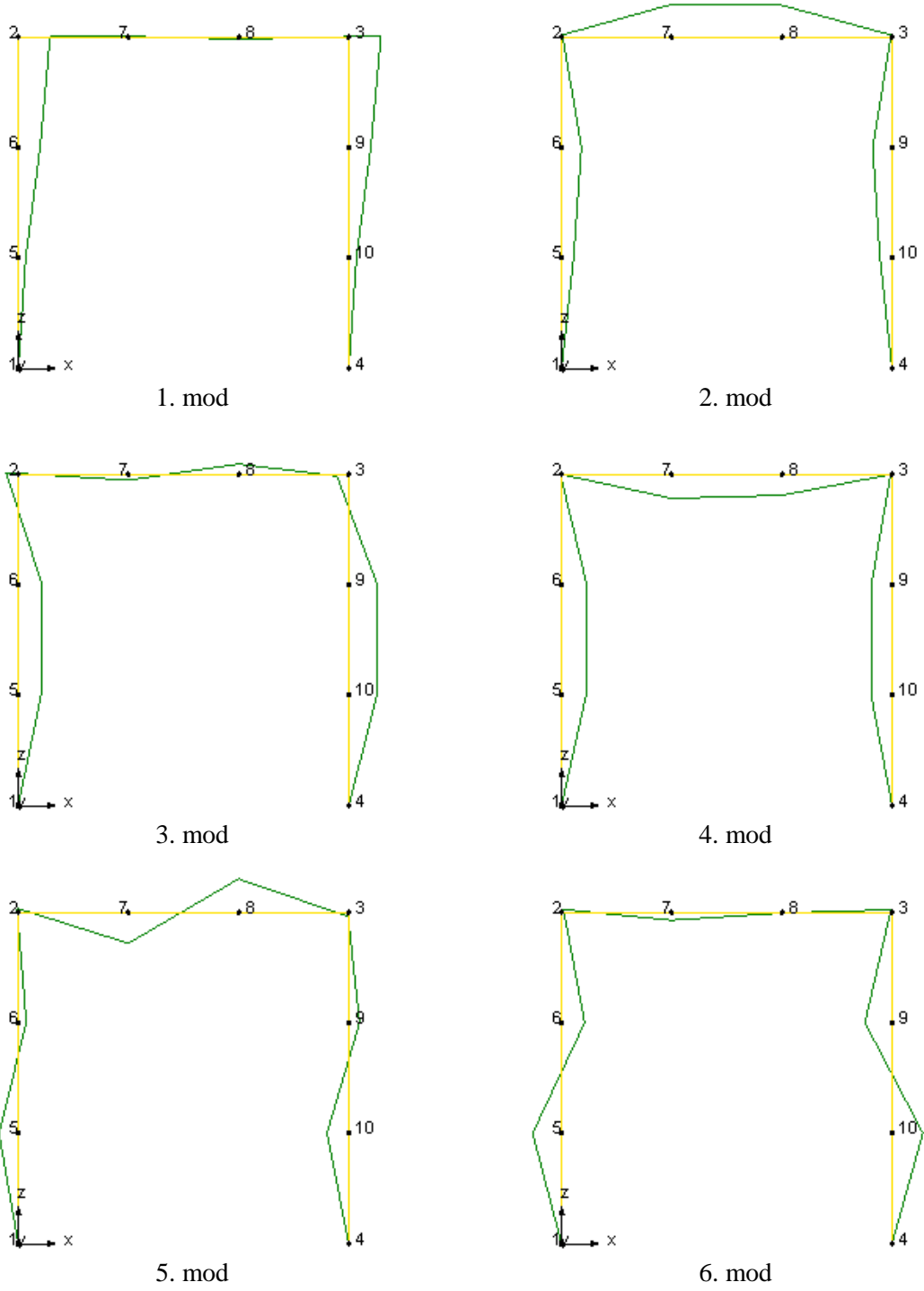


Şekil 2.25. İki boyutlu çerçeve modelin kolon-kiriş birleşim bölgesi hasarı için spektral yoğunluk fonksiyonları

İki boyutlu çerçevenin bu hasar durumuna ait ilk altı doğal frekans değerleri ve modal sönüm oranları Tablo 2.13'te, mod şekilleri ise Şekil 2.26'da verilmektedir.

Tablo 2.13. İki boyutlu çerçevenin kolon-kiriş birleşim bölgesi hasar durumu için ölçülen doğal frekansları ve modal sönüm oranları

Mod Numarası	Doğal Frekansı (Hz)	Modal Sönüm Oranı (%)
1	9.004	1.469
2	34.857	0.546
3	57.260	0.291
4	61.904	0.324
5	126.990	0.242
6	153.510	0.122



Şekil 2.26. İki boyutlu çerçevenin kolon-kiriş birleşim bölgesi hasarı için mod şekilleri

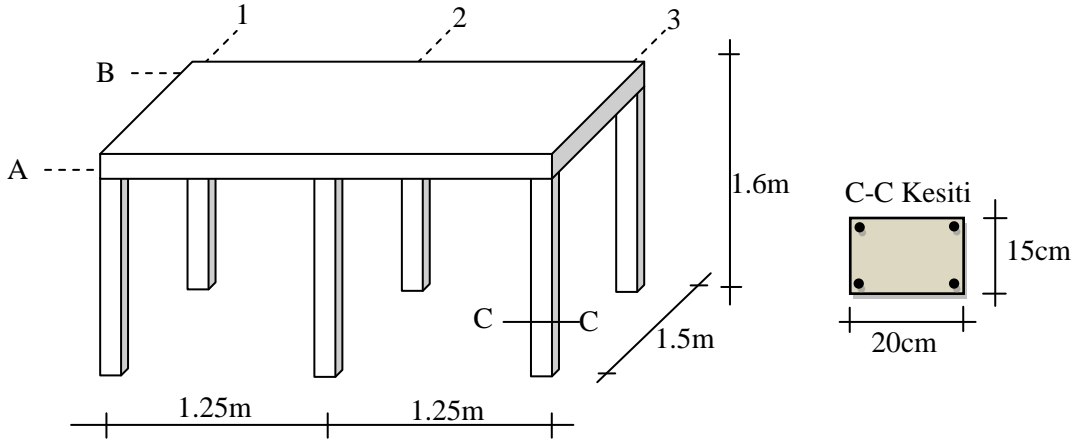
İki boyutlu çerçeve modelde bu hasar durumu için elde edilen doğal frekansların ve sönüm oranlarının azaldığı belirlenmiştir. Benzer şekilde mod şekillerinde de çok küçük değişiklikler meydana geldiği gözlemlenmiştir.



## 2.4. Tek Katlı Betonarme Bina Modeli Uygulaması

### 2.4.1. Modelin Özellikleri ve İnşası

Betonarme binalarda hasar etkilerini belirleyebilmek amacıyla öncelikle 1/2 ölçekli bir katlı betonarme model standartlarda önerilen betonarme yapı şartlarını sağlayacak şekilde oluşturulmuştur. Yatay düzlemde boyuna doğrultuda iki açıklığa, enine doğrultuda ise tek açıklığa sahip olan bu modelin, kolonları ve kirişleri 15cm\*20cm boyutlarında, döşemesi ise 7.5cm kalınlığındadır. Modelde boyuna doğrultudaki açıklıklar 1.25m, enine doğrultudaki açıklık 1.5m ve kat yüksekliği 1.6m'dir. Oluşturulan betonarme modelin mesnetlerinin tam ankastre olmasını sağlayabilmek amacıyla, modele 50cm kalınlığında bir radye temel yapılmıştır. Şekil 2.27'de tek katlı betonarme modele ait üç boyutlu görünüm ve boyutlar, Şekil 2.28'de modelin inşa aşamaları görülmektedir.



Şekil 2.27. Tek katlı betonarme bina modeli



Şekil 2.28 Tek katlı betonarme modelin inşa aşamalarına ait görüntüler

Betonarme modelin inşasında kullanılan betonun ortalama basınç dayanımının 20MPa olması istenmiş ve bu özelliklerde beton temin edilmiştir. Betonun analitik modellemede kullanılacak olan mekanik özelliklerini belirleyebilmek amacıyla beton dökümü sırasında numuneler alınmıştır. Alınan numunelerden betonun kütle yoğunluğu ve elastisite değeri belirlenmiştir. Şekil 2.29'da beton dökümü sırasında numune alımına ait görüntüler verilmektedir.



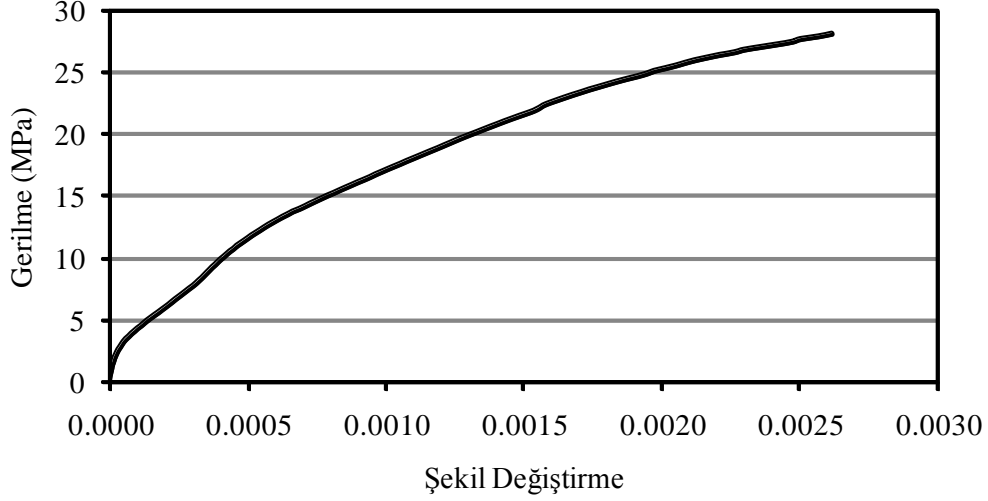
Şekil 2.29. Betondan numuneler alınması

Alınan beton numuneler, 28 gün  $21 \pm 2^\circ\text{C}$  sabit sıcaklıktaki kür tankında muhafaza edildikten sonra numunelere kükürt başlık yapılarak aksenal yükleme deneyine tabi tutulmuşlardır. Elastisite değerini belirleyebilmek amacıyla, beton numunelere şekildeğiştirme ölçerler yapıştirılarak deney gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.30). Bu sayede, uygulanan yüklemeye karşılık oluşan şekildeğiştirme değerleri ölçülebilmüş ve gerilme-şekildeğiştirme eğrisi elde edilmiştir. Bu eğriler yardımıyla numunelere ait elastisite değerleri yaklaşık olarak belirlenmiştir.



Şekil 2.30. Beton numunelerde yapılan beton dayanımı ve elastisite tayini deneyleri

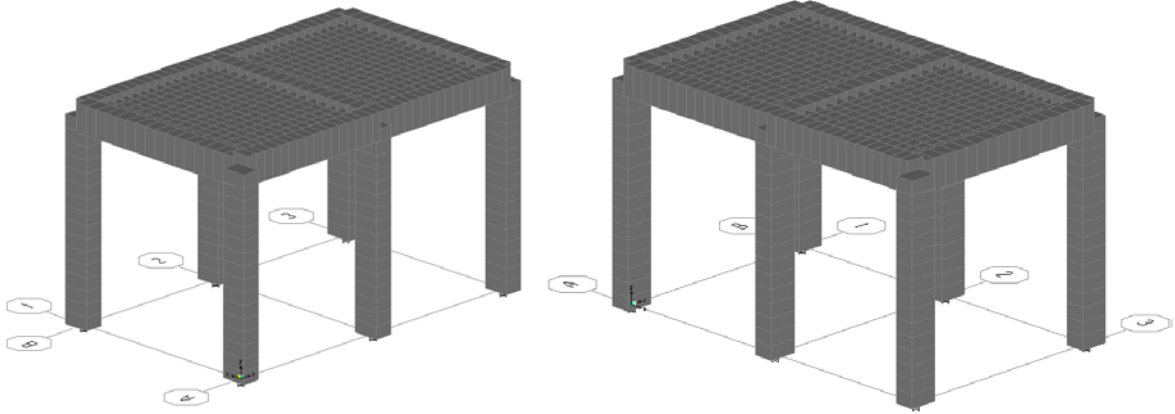
Beton numuneler üzerinde yapılan deneylerden ortalama kütle yoğunluğu  $2350\text{kg/m}^3$ , basınç dayanımı 16-18MPa ve yaklaşık elastisite değeri ise 22000MPa olarak belirlenmiştir. Eksenel yükleme deneyi sonucunda elde edilen tipik bir gerilme-şekildeğiştirme eğrisi Şekil 2.31’de verilmektedir.



Şekil 2.31. Beton numuneler üzerinde aksel yüklemeye deneyinden elde edilen gerilme-şekildeğiştirme grafiği

#### 2.4.2. Başlangıç Analitik Modelin Oluşturulması

Tek katlı betonarme binanın başlangıç analitik modeli, kolon ve kirişlerin kiriş elemanlarla, döşemenin ise plak elemanla modellenmesiyle oluşturulmuştur. Modellemede gerçek davranışı yansıtabilmek amacıyla, deneylerden elde edilen veriler, laboratuvar modelinin kesit özellikleri ve donatı düzeni dikkate alınmıştır. SAP2000 programında oluşturulan tek katlı binanın analitik modeline ait görüntüler Şekil 2.32’de verilmektedir. Analitik modelde kolon alt uçlarının tamamen tutulu olduğu yani ankastre mesnet olduğu varsayılmıştır.

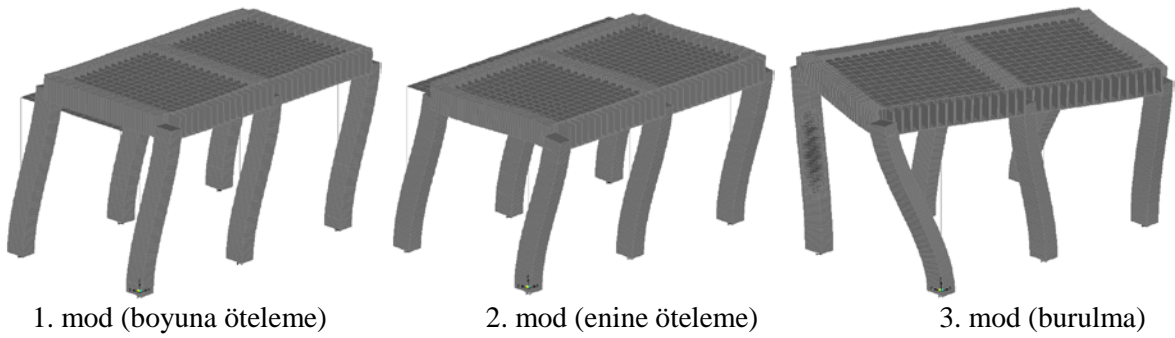


Şekil 2.32. Tek katlı betonarme binaya ait analitik modelden görüşler

Tek katlı betonarme modelin başlangıç analitik modelinden elde edilen frekans değerleri Tablo 2.14’te ve mod şekilleri Şekil 2.33’te verilmektedir.

Tablo 2.14. Tek katlı betonarme binanın başlangıç analitik modelden elde edilen ilk üç doğal frekansı

Mod Numarası	Doğal Frekansı (Hz)
1	16.534
2	21.749
3	26.338



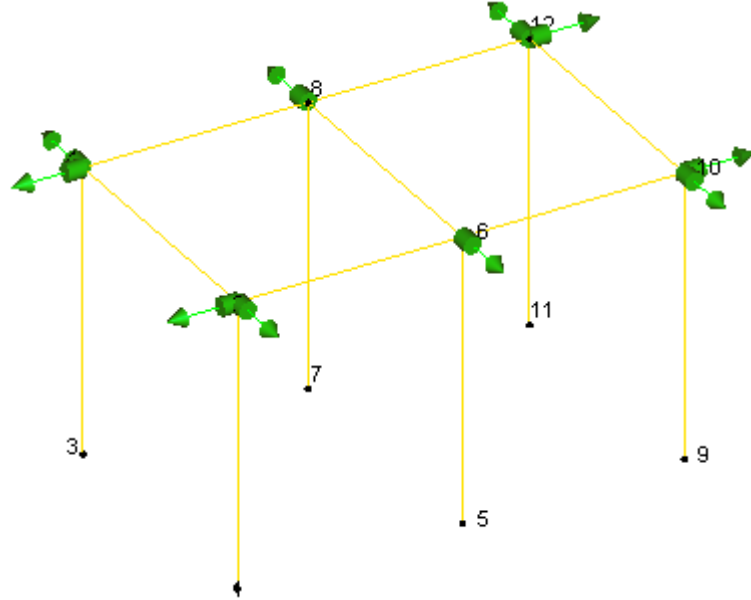
Şekil 2.33. Tek katlı betonarme bina modelin başlangıç analitik modelinden elde edilen mod şekilleri

### 2.4.3. Hasarsız Durum Ölçümünün Gerçekleştirilmesi

Tek katlı betonarme modelin hasarsız durumu için gerçekleştirilen ölçüm Şekil 2.34'te verilmektedir. Modelin köşe ve orta noktalarına tek eksenli sismik ivmeölçerler bağlanarak gerçekleştirilen ölçümlerden, doğal titreşim frekansları ve mod şekilleri elde edilmiştir. Ölçüm 0-50Hz frekans aralığında ve 5dk süreyle gerçekleştirilmiştir. Deneysel ölçüm sisteminde tanımlanan geometri ve ivmeölçer yerleşimi Şekil 2.35'te verilmektedir.



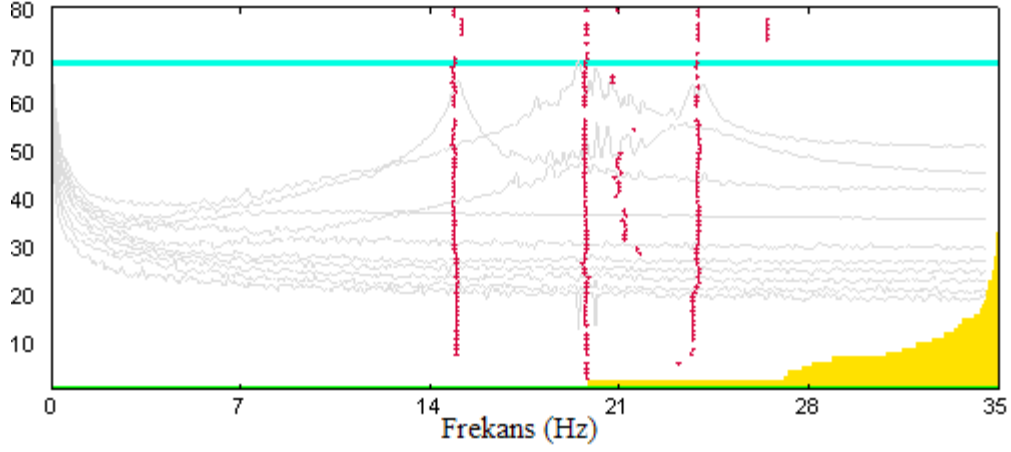
Şekil 2.34. Tek katlı betonarme bina modelin hasarsız durum ölçümlerine ait görüntüler



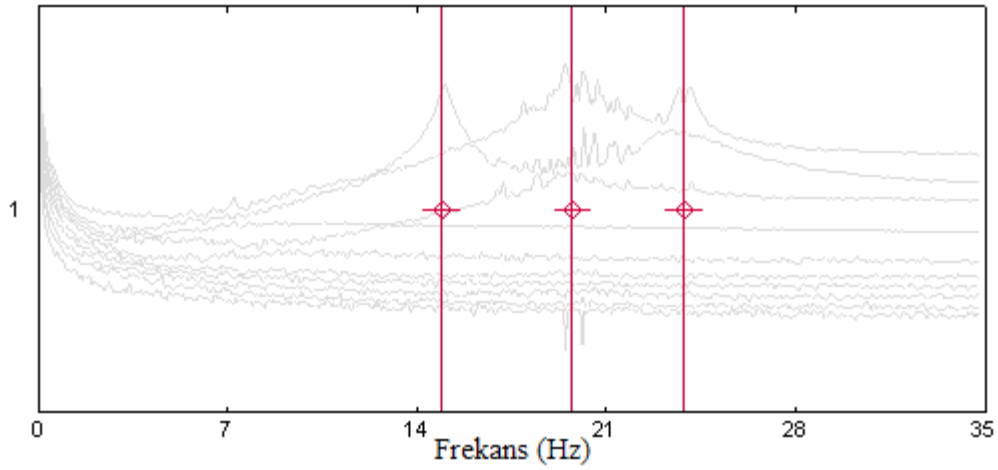
Şekil 2.35. Tek katlı betonarme bina modelinde kullanılan deneysel ölçüm düzeni ve ivmeölçer yerleşimi

Betonarme bina üzerindeki ölçüm verilerinden, modal parametreler Stokastik Altalan Belirleme (SAB) yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Betonarme bina modelin hasarsız

durumuna ait, titreşim modlarının tekrarlılığının göstergesi olan kararlılık diyagramı ve spektral yoğunluk fonksiyonu Şekil 2.36'da verilmektedir.



a. Kararlılık diyagramı



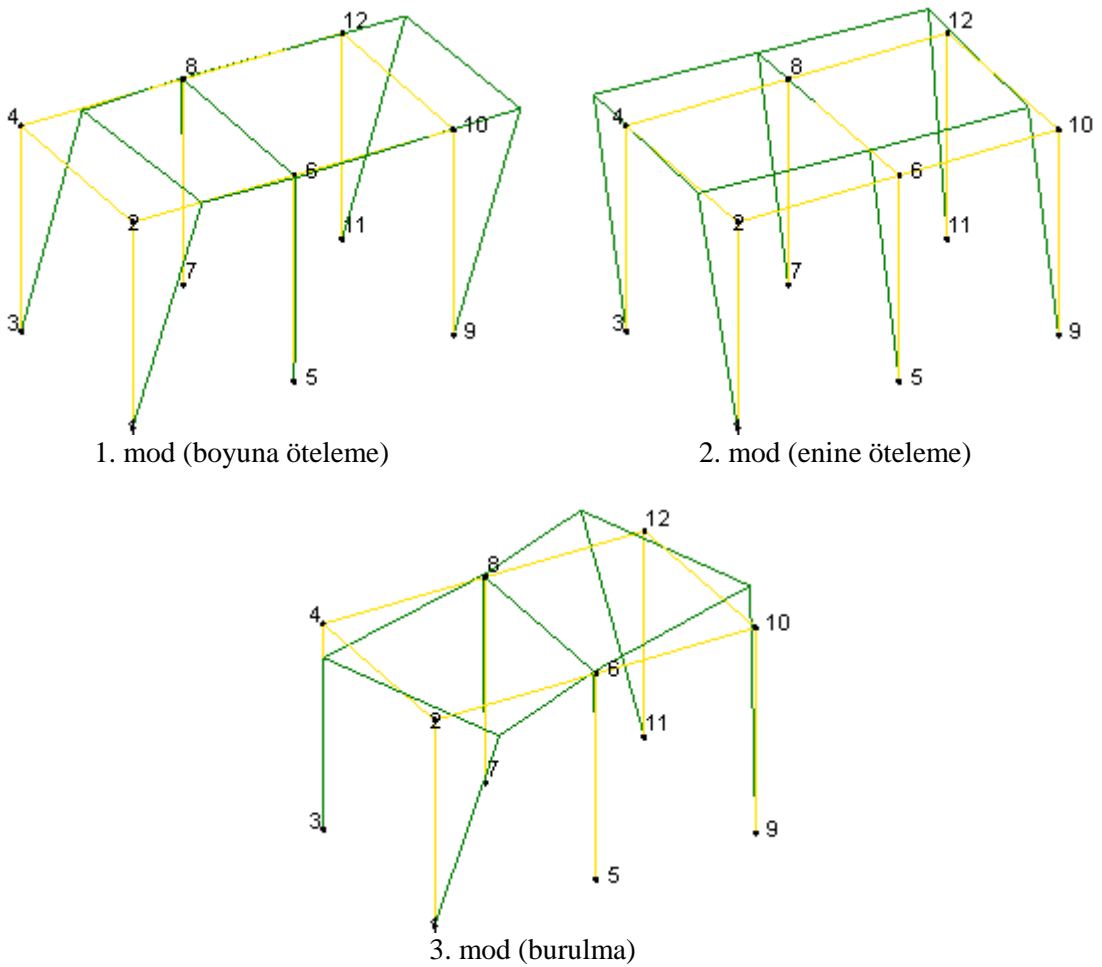
b. Spektral yoğunluk fonksiyonu

Şekil 2.36. Tek katlı betonarme modele ait kararlılık ve spektral yoğunluk fonksiyonları

Spektral yoğunluk fonksiyonlarından elde edilen, modelin hasarsız durumuna ait frekans değerleri ve modal sönüm oranları Tablo 2.15'te, mod şekilleri ise Şekil 2.37'de verilmektedir.

Tablo 2.15. Tek katlı betonarme binanın hasarsız durum için ölçülen doğal frekansları ve modal sönüm oranları

Mod Numarası	Doğal Frekans (Hz)	Modal Sönüm Oranı (%)
1	14.936	1.649
2	19.751	2.471
3	23.880	0.782



Şekil 2.37. Tek katlı betonarme modelin hasarsız durum için deneysel mod şekilleri

#### 2.4.4. Analitik Modelin Kalibre Edilmesi

Tek katlı betonarme binanın başlangıç analitik modeli oluşturulurken, kolonlar, kirişler ve döşemelerde tanımlanan mekanik özellikler için beton deneylerinden elde edilen sonuçlar kullanılmış, mesnet şartları ise ankastre olarak dikkate alınmıştır. Hasarsız durum

için gerçekleştirilen ölçümlerden ve başlangıç analitik modelden elde edilen frekans değerleri ve MGK değerleri Tablo 2.16’da verilmektedir.

Tablo 2.16. Tek katlı betonarme bina modelde hasarsız durum için deneysel ve başlangıç analitik frekanslar ile MGK değerleri

Mod Numarası	Doğal Frekansı(Hz)			Modal Güvence Kriteri
	Deneysel Hasarsız	Analitik Başlangıç	Fark (%)	
1	14.936	16.534	10.70	0.993
2	19.751	21.749	10.12	0.985
3	23.880	26.338	10.29	0.990

Tablo 2.17’de verilen frekans farkları dikkate alındığında, frekanslar arasında ortalama %10.37’lik bir farklılık olduğu görülmektedir. Tek katlı betonarme modelin başlangıç modelinin kalibre edilmesinde kolon, kiriş ve döşeme için ayrı ayrı elastisite değerleri tanımlanmış ve elastisite değerleri değişken olarak dikkate alınmıştır. Doğal frekans, mod şekli ve MGK değerlerinde en fazla %1 farklılık sağlanacak şekilde kriterler belirlenmiştir. Belirlenen kıstaslar doğrultusunda elastisite değerlerinde %10’luk bir değişim olabileceği varsayılarak başlatılan iterasyonlar sonucunda verilen yakınsama kriteri sağlanmış ve seçilen elastisite değeri için doğal frekanslar ve mod şekilleri hesaplanmıştır. Başlangıç modelin elastisite değerindeki değişim dikkate alınarak gerçekleştirilen kalibrasyon neticesinde elde edilen değerler Tablo 2.18’de verilmektedir.

Tablo 2.17. Tek katlı betonarme bina modelde kalibre edilmiş durum için deneysel ve analitik frekanslar ile MGK değerleri

Mod Numarası	Doğal Frekansı(Hz)			Modal Güvence Kriteri
	Deneysel Hasarsız	Analitik Kalibre	Fark (%)	
1	14.936	14.936	0.00	99.3
2	19.751	19.751	0.00	98.5
3	23.880	23.880	0.00	99.0

Başlangıç analitik modelinin kalibre edilmesi sonucunda frekanslar arasındaki fark tamamen ortadan kaldırılmıştır. Elastisite değerindeki değişim dikkate alınarak



gerçekleştirilen analitik model kalibrasyonu işleminde, kolonlar için elastisite değeri  $1.7742 \cdot 10^{10} \text{N/m}^2$ , kirişler için  $2.0238 \cdot 10^{10} \text{N/m}^2$  ve döşeme için  $1.8614 \cdot 10^{11} \text{N/m}^2$  olarak belirlenmiştir.

#### 2.4.5. Hasarlı Durum Ölçümlerinin Gerçekleştirilmesi

Tek katlı betonarme modelde yeri ve büyüklüğü yaklaşık olarak ölçülmüş hasar etkileri oluşturulmuş ve deneysel ölçümler aynı çevresel şartlar altında tekrarlanmıştır. Hasar etkileri birbirini takiben oluşturulmuştur. Bu hasar etkileri;

- ✓ Bütün kolonların üst uçlarında kabuk (paspayı) betonu hasarı
- ✓ Bütün kolonların alt uçlarında kabuk betonu hasarı
- ✓ A-1 kolonu üst ucu çekirdek (göbek) betonu hasarı

olarak dikkate alınmıştır.

##### 2.4.5.1. Kolon Üst Uçları Kabuk Betonu Hasarı

Tek katlı betonarme modelde deprem ve patlatma gibi titreşimlerde öncelikle kolon üst uçlarındaki kabuk betonunun zarar göreceği varsayılarak, modelde bu bölgelere kırıcı matkap yardımıyla hasar verilmiştir (Şekil 2.38). Bütün kolonların üst uçlarında yaklaşık 20cm'lik bir kısma ait donatıların dışında kalan beton örtüsü kırıcı matkap yardımıyla sıyrılmıştır.



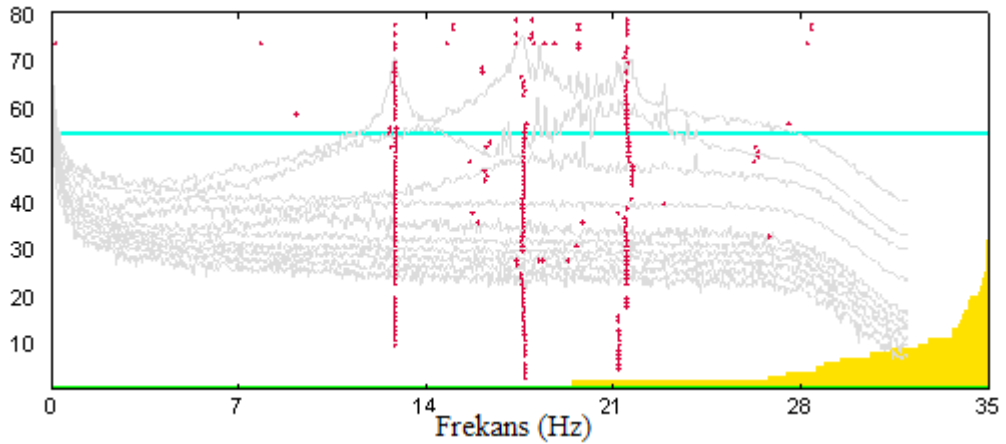
Şekil 2.38. Tek katlı betonarme modelde kolon üst uçlarında hasar olması durumu

Oluşturulan hasarlı durum için, hasarsız durumda yapılan ölçümde oluşturulan ivmeölçer düzeni kullanılarak ölçüm tekrarlanmıştır. Şekil 2.39'da hasarlı yapıya ait ölçümden görüntüler verilmektedir.



Şekil 2.39. Tek katlı betonarme modelde kolon üst uçları kabuk betonu hasarı

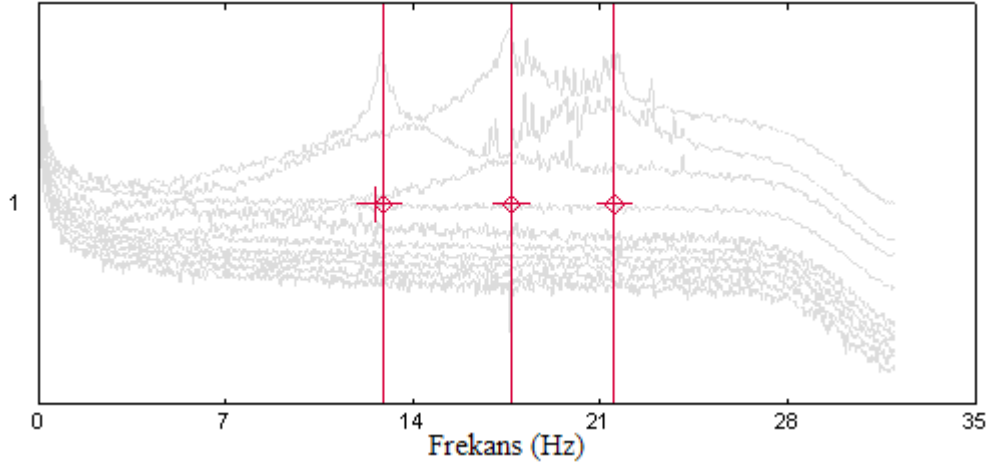
Oluşturulan hasar durumu için gerçekleştirilen ölçümden SAB yöntemiyle elde edilen kararlılık diyagramı ve spektral yoğunluk fonksiyonu Şekil 2.40'ta verilmektedir.



a. Kararlılık diyagramı

Şekil 2.40. Tek katlı betonarme bina modelde kolon üst ucu hasarları için kararlılık ve spektral yoğunluk fonksiyonları

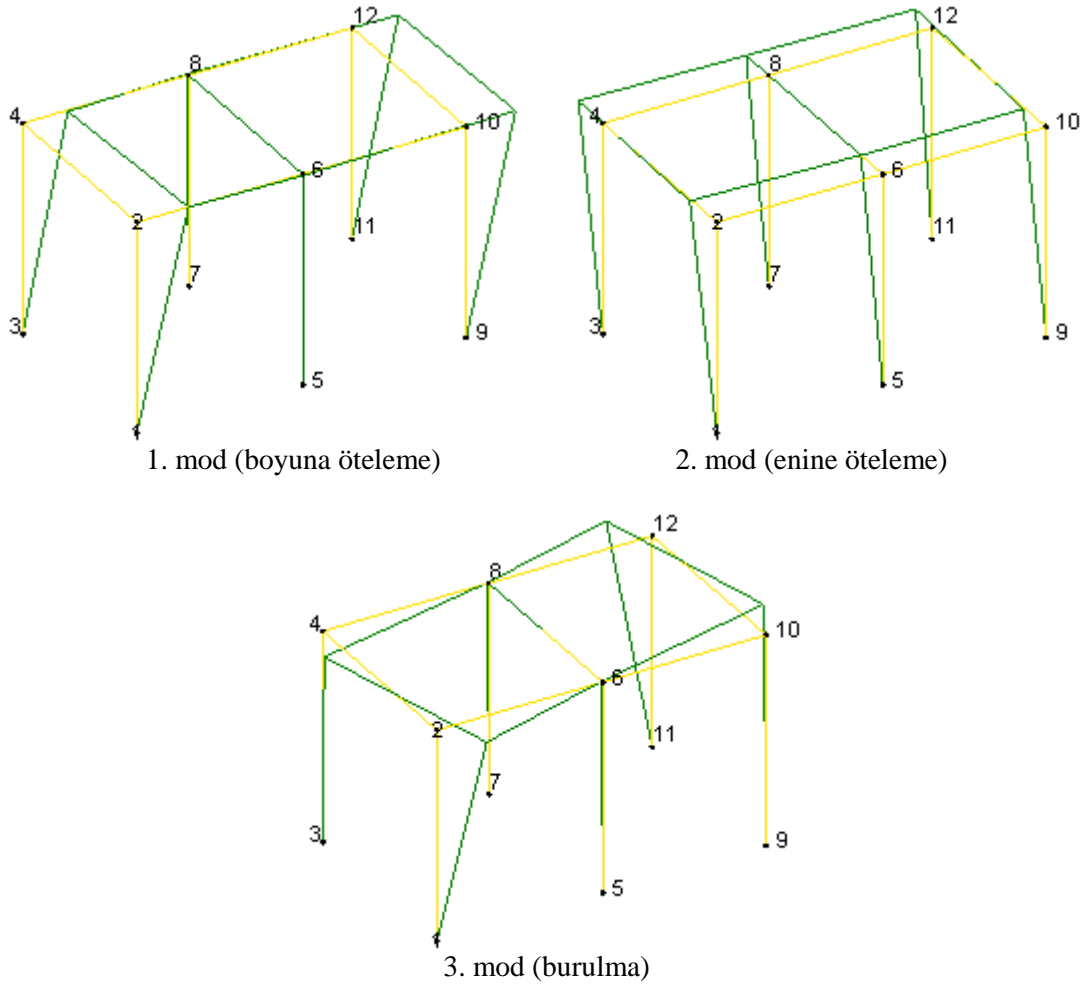
Şekil 2.40'in devamı



Tek katlı betonarme modelde kolon üst ucundaki kabuk betonu hasarı için SAB yöntemiyle elde edilen frekans ve modal sönüm oranı değerleri Tablo 2.18'de, mod şekilleri ise Şekil 2.41'de verilmektedir.

Tablo 2.18. Tek katlı betonarme binanın kolon üst ucu kabuk betonu hasarı için ölçülen doğal frekansları ve modal sönüm oranları

Mod Numarası	Doğal Frekans (Hz)	Modal Sönüm Oranı (%)
1	12.879	0.909
2	17.685	1.550
3	21.528	1.705



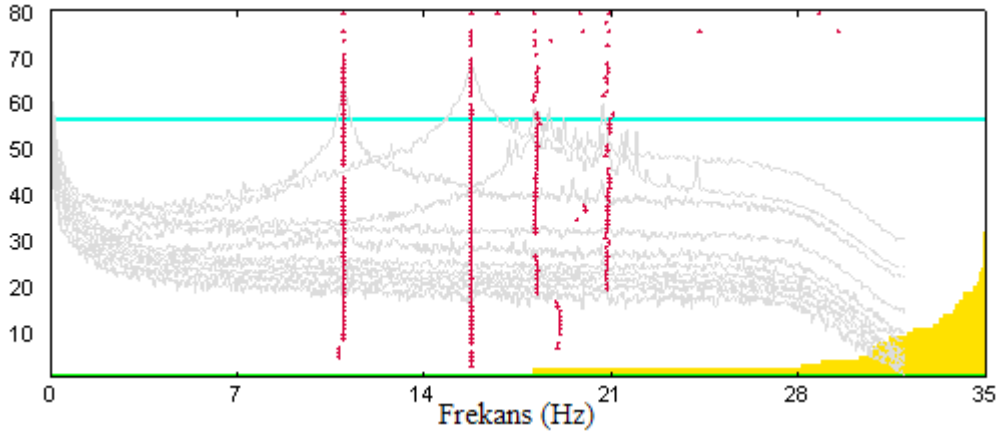
Şekil 2.41. Tek katlı betonarme bina modelde kolon üst uçlarındaki kabuk betonu hasarı için deneysel mod şekilleri

#### 2.4.5.2. Kolon Alt Uçları Kabuk Betonu Hasarı

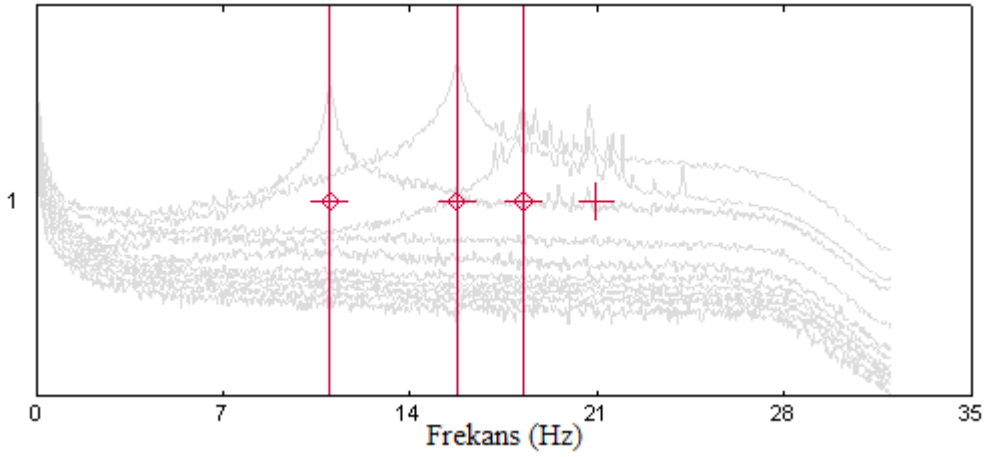
Tek katlı betonarme modelde ikinci hasar durumu olarak, kolon üst uçlarındaki hasarlara ek olarak kolon alt uçlarındaki kabuk betonunun zarar göreceği varsayılmış ve bu bölgelere kırıcı matkap yardımıyla hasar verilmiştir. Bütün kolonların alt uçlarında yaklaşık 20cm'lik mesafede donatıların dışında kalan beton örtüsü kırıcı matkap yardımıyla sıyrılmıştır. Şekil 2.42'de tek katlı betonarme modelde hem kolon üst uçları hem de alt uçlarının hasarlı olduğu durum görülmektedir. Bu hasar durumu için gerçekleştirilen ölçümden SAB yöntemiyle elde edilen kararlılık diyagramı ve spektral yoğunluk fonksiyonu Şekil 2.43'te verilmektedir.



Şekil 2.42. Tek katlı betonarme modelde kolon alt uçlarında kabuk betonu hasar durumu



a. Kararlılık diyagramı



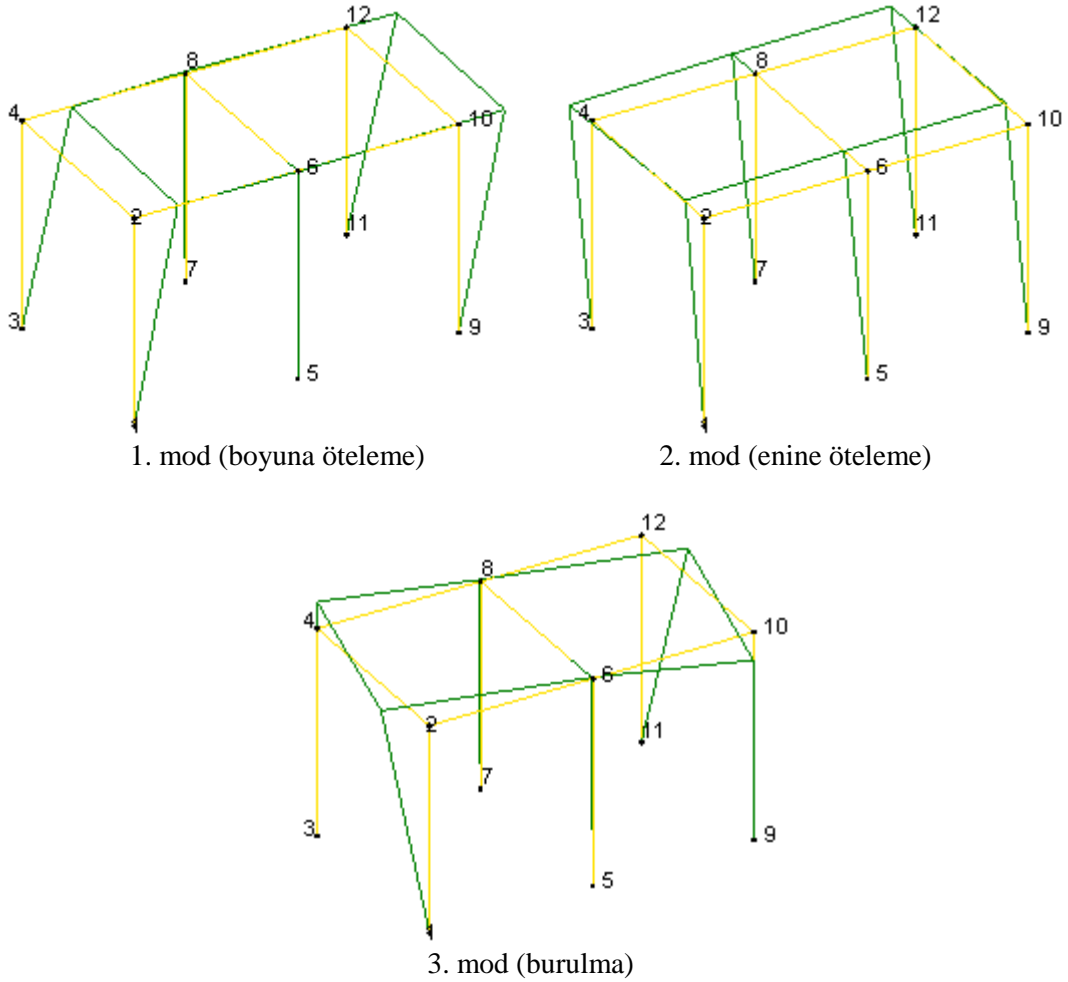
b. Spektral yoğunluk fonksiyonu

Şekil 2.43. Tek katlı betonarme bina modelde kolon alt uçlarında kabuk betonu hasarı için kararlılık ve spektral yoğunluk fonksiyonları

Tek katlı betonarme modelde kolon alt ucu kabuk betonu hasarı için SAB yöntemiyle elde edilen frekans ve modal sönüm oranı değerleri Tablo 2.19'da, mod şekilleri ise Şekil 2.44'te verilmektedir.

Tablo 2.19. Tek katlı betonarme binanın kolon alt ucu kabuk betonu hasarları için ölçülen doğal frekansları ve modal sönüm oranları

Mod Numarası	Doğal Frekans (Hz)	Modal Sönüm Oranı (%)
1	10.998	0.676
2	15.760	0.904
3	18.241	2.038



Şekil 2.44. Tek katlı betonarme modelin kolon alt uçları hasarlı durum için deneysel mod şekilleri

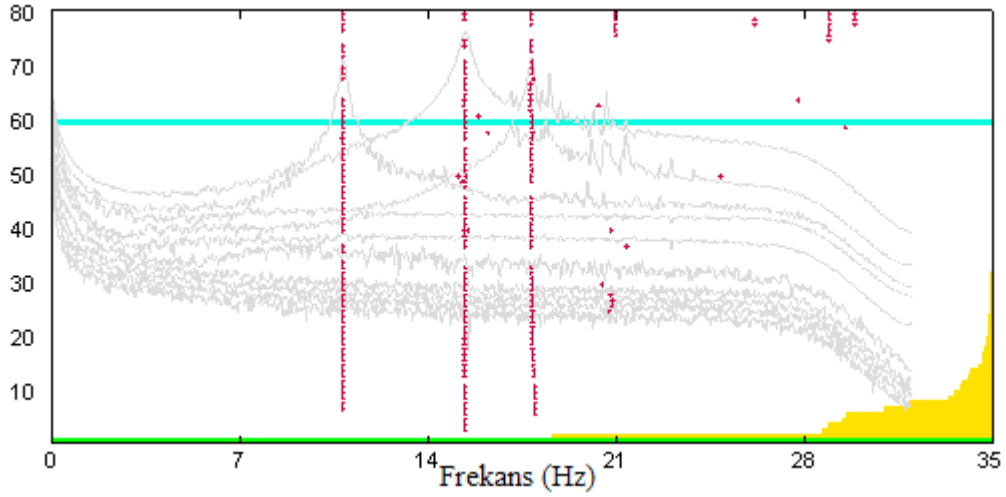
### 2.4.5.3. A-1 Kolonu Üst Ucu Göbek Betonunu Hasarı

Tek katlı betonarme modelde üçüncü hasar durumu olarak Şekil 2.27’de gösterilen A-1 kolonu üst ucunda donatılara zarar vermeyecek şekilde yaklaşık 4cm’lik bir uzunluk boyunca göbek betonu tamamen kırılmıştır. Şekil 2.45’te tek katlı betonarme modelde diğer hasar durumlarına ilave olarak kolon üst ucu göbek betonu hasarı verilmektedir.



Şekil 2.45. Tek katlı betonarme modelde A-1 kolonu üst ucu göbek betonu hasarı

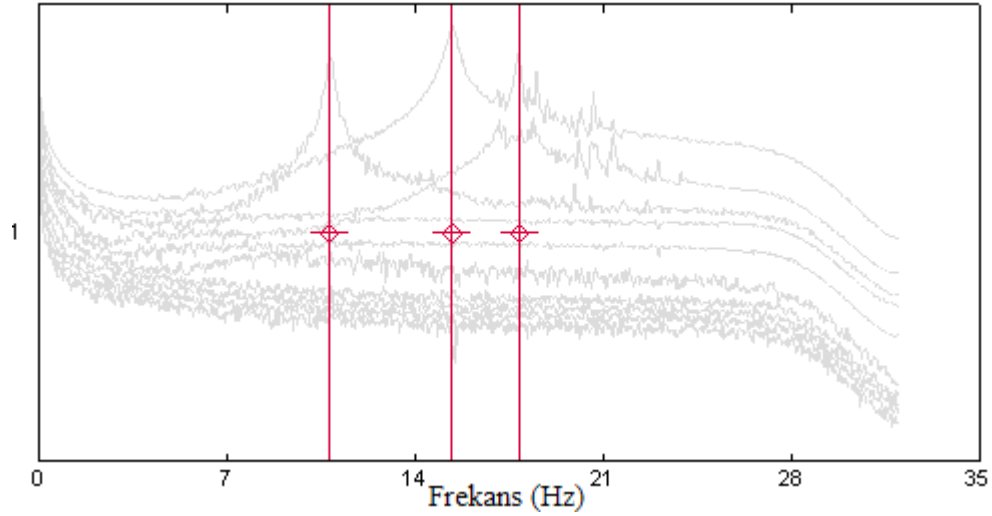
Bu hasar durumu için gerçekleştirilen ölçümden SAB yöntemiyle elde edilen kararlılık diyagramı ve spektral yoğunluk fonksiyonu Şekil 2.46’da verilmektedir.



a. Kararlılık diyagramı

Şekil 2.46. Tek katlı betonarme modelde A-1 kolonu üst ucu göbek betonu hasarı için kararlılık ve spektral yoğunluk fonksiyonları

Şekil 2.46'nın devamı

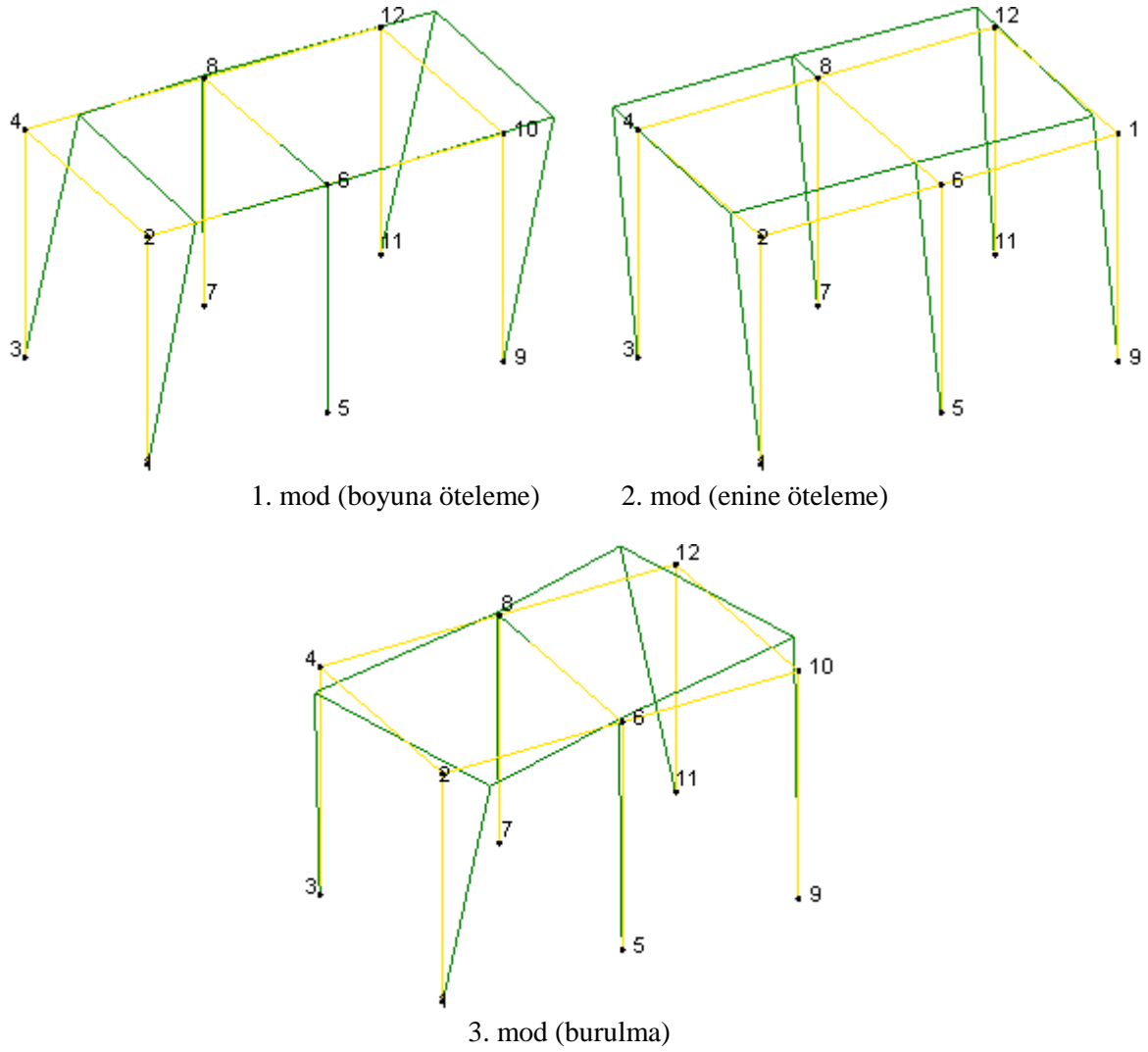


Tek katlı betonarme modelde kolon üst ucu göbek betonu hasarı için SAB yöntemiyle elde edilen frekans ve modal sönüm oranı değerleri Tablo 2.20'de, mod şekilleri ise Şekil 2.47'de verilmektedir.

Tablo 2.20. Tek katlı betonarme binanın kolon üst ucu göbek betonu hasarı için ölçülen doğal frekansları ve modal sönüm oranları

Mod Numarası	Doğal Frekans (Hz)	Modal Sönüm Oranı (%)
1	10.856	0.470
2	15.402	0.760
3	17.890	1.151



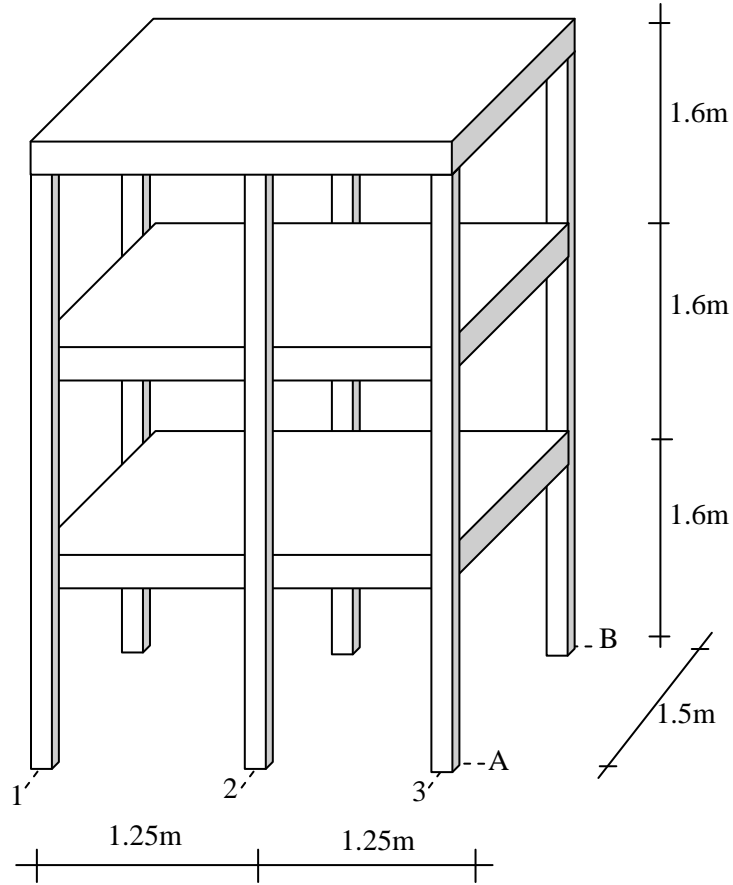


Şekil 2.47. Tek katlı betonarme modelin A-1 kolonu üst ucu göbek betonu hasarı için deneysel mod şekilleri

## 2.5. Üç Katlı Betonarme Bina Modeli Uygulaması

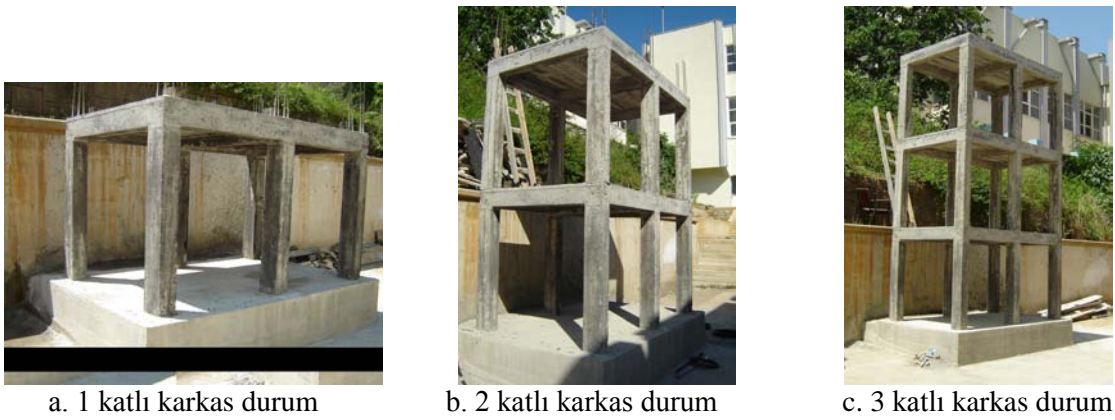
### 2.5.1. Modelin Özellikleri ve İnşası

Betonarme binalarda hasar etkilerini belirleyebilmek amacıyla incelenen bir diğer model ise 1/2 ölçekli üç katlı betonarme bina modelidir. Bu betonarme bina modeli, tek katlı bina modelinin tamamen yıkılmasından sonra aynı radye temel betonu üzerine inşa edilmiştir. Bu modelde kolonlar ve kirişler 15cm\*20cm boyutlarında, döşeme ise 7.5cm kalınlığındadır. Şekil 2.48’de üç katlı betonarme modele ait görünüm ve boyutlar verilmektedir.



Şekil 2.48. Üç katlı betonarme bina modeli ve boyutları

Oluşturulan betonarme bina modelinin bütün inşa aşamaları takip edilmiş ve bina modelinin dinamik karakteristikleri her bir aşama için ayrı ayrı belirlenmiştir. Betonarme binanın karkas kısmının inşasına ait görüntüler Şekil 2.49'da verilmektedir.



Şekil 2.49. Üç katlı betonarme binanın karkas durumuna ait inşa aşamaları

Karkas durumun inşası tamamlandıktan sonra bina modeline tuğla duvar örülmüş ve sonrasında tuğla duvarın dış yüzeyleri yaklaşık 2cm kalınlığında sıva ile kaplanmıştır. Tuğla duvarlar, 13.5cm\*19cm\*19cm boyutlarındaki yatay delikli tuğlalar kullanılarak oluşturulmuştur. Bina modelinin tuğla örülü ve sıvalı inşa aşamalarına ait görüntüler Şekil 2.50'de verilmektedir.



a. Tuğlalı durum



b. Sıvalı durum

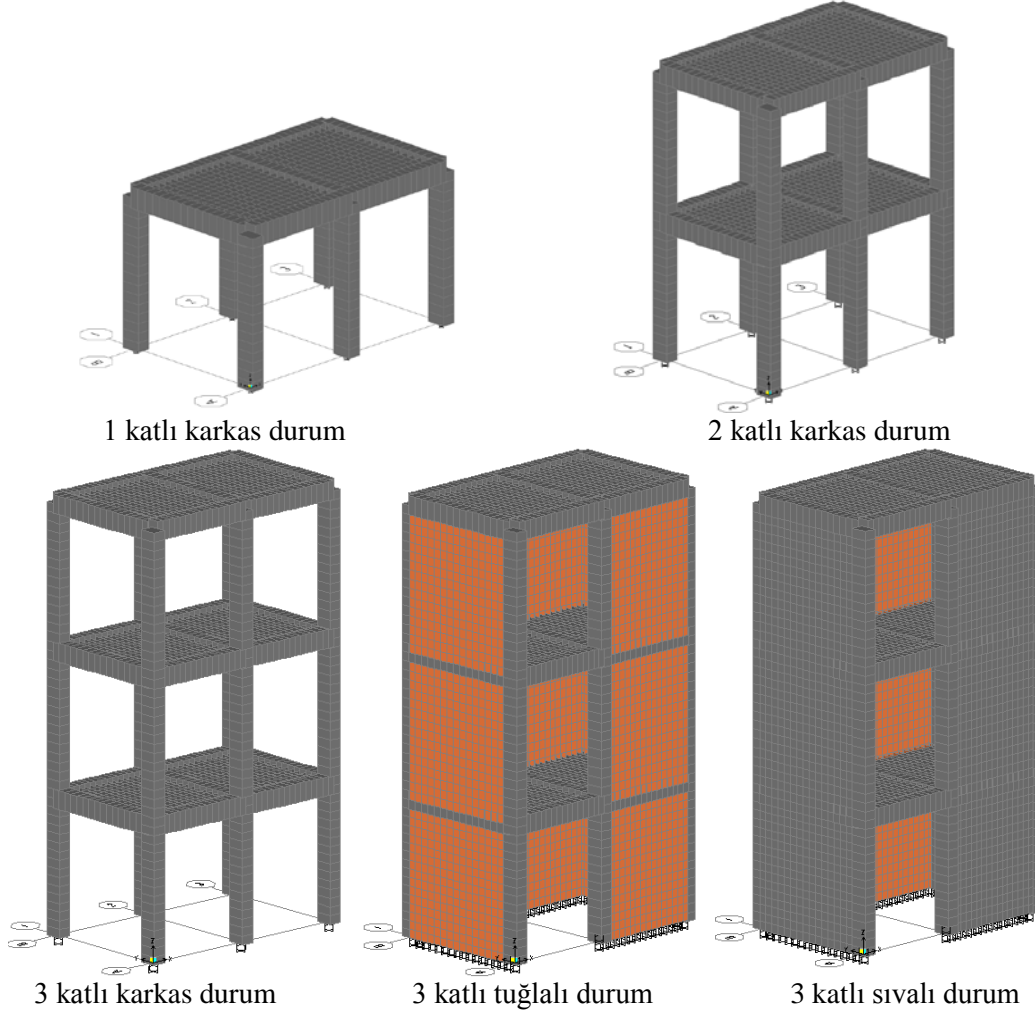
Şekil 2.50. Üç katlı betonarme bina modelinin tuğlalı ve sıvalı durumu

Betonarme modelin inşasında kullanılan betonun ortalama basınç dayanımının 20MPa olması istenmiş ve bu özelliklerdeki beton temin edilmiştir. Betonun analitik modellemesinde kullanılacak olan mekanik özelliklerini belirleyebilmek amacıyla beton dökümü sırasında numuneler alınmıştır. Numuneler üzerinde yapılan deneylerden betonun kütle yoğunluğu ve elastisite modülü değerleri belirlenmiştir. Yapılan deneylere göre, betonun ortalama kütle yoğunluğu  $2350\text{kg/m}^3$ , basınç dayanımı 20-24MPa ve yaklaşık elastisite değeri ise 28000MPa olarak belirlenmiştir.

### 2.5.2. Başlangıç Analitik Modellerin Oluşturulması

Üç katlı betonarme modelin her bir inşa aşaması için analitik model oluşturulmuştur. Başlangıç analitik modelin oluşturulmasında kolon ve kirişlerde kiriş elemanlardan, döşemelerde ise plak elemanlardan yararlanılmıştır. Analitik model oluşturulurken, laboratuvar modelin inşasında kullanılan kolon ve kiriş kesitleri, donatı düzenleri ve yapılan deneylerde beton için elde edilen malzeme özellikleri dikkate alınmıştır. SAP2000

programında oluşturulan analitik modellere ait görüntüler Şekil 2.51’de, malzeme özellikleri Tablo 2.21’de verilmektedir.



Şekil 2.51. Üç katlı betonarme binaya ait başlangıç analitik modellerden görünüşler

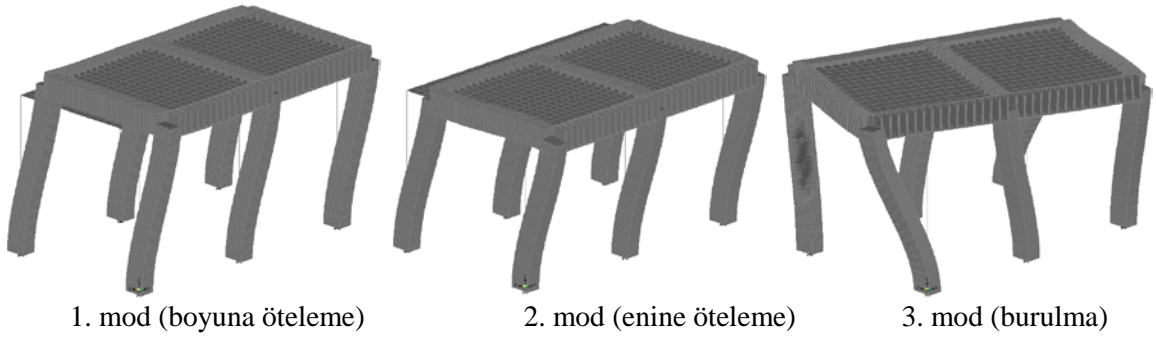
Tablo 2.21. Üç katlı betonarme modelin inşasında kullanılan malzemelerin özellikleri

Betonarme	Elastisite Modülü ( $N/m^2$ )	$2.8 \cdot 10^{10}$
	Birim Kütle ( $kg/m^3$ )	2350
Tuğla Duvar	Elastisite Modülü ( $N/m^2$ )	$1.5 \cdot 10^9$
	Birim Kütle ( $kg/m^3$ )	1220

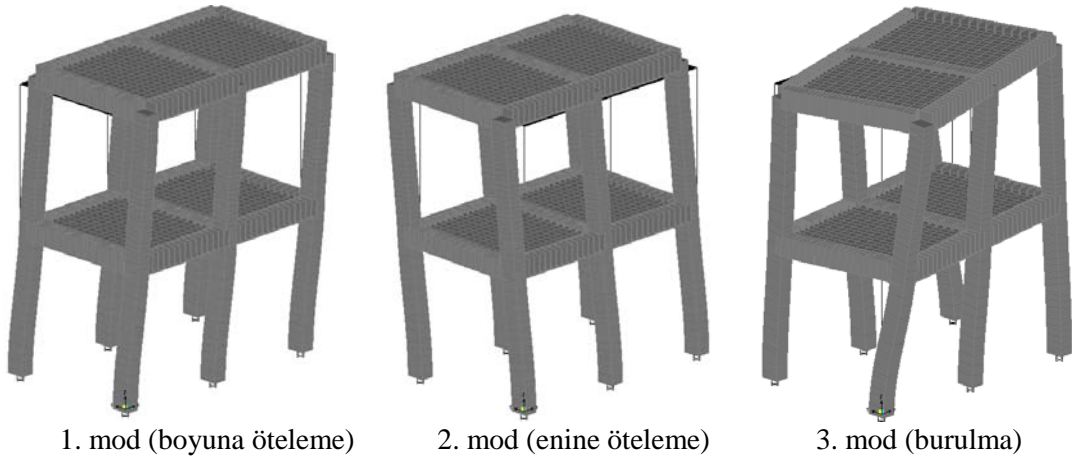
Her bir inşa aşaması için oluşturulan başlangıç analitik modelleri üzerinde gerçekleştirilen modal analizlerden elde edilen doğal frekanslar Tablo 2.22’de, mod şekilleri ise Şekil 2.52-56’da verilmektedir.

Tablo 2.22. Üç katlı betonarme modelin inşa aşamalarına bağlı başlangıç analitik modellerden elde edilen doğal frekansları

Mod Numarası	Doğal Frekansı (Hz)				
	1 katlı	2 katlı	3 katlı	Tuğlalı	Sıvalı
1	19.941	10.205	6.596	13.074	14.135
2	24.645	11.879	7.490	14.601	15.977
3	30.309	14.762	9.435	22.108	24.881
4	---	29.089	19.417	41.910	46.110
5	---	36.563	23.776	44.805	49.574



Şekil 2.52. Üç katlı betonarme bina modelin bir katlı karkas durum için mod şekilleri

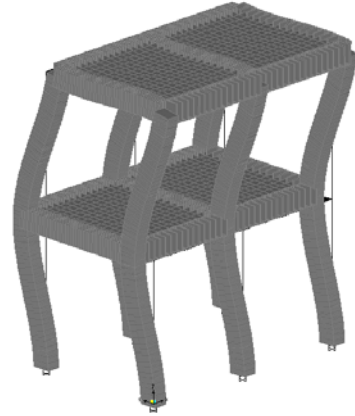


Şekil 2.53. Üç katlı betonarme bina modelin iki katlı karkas durum için mod şekilleri

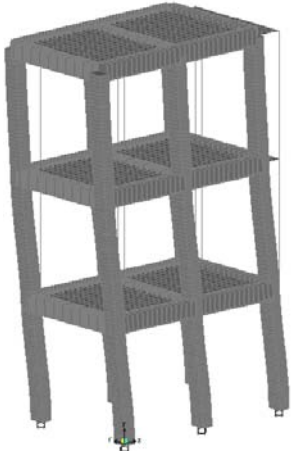
Şekil 2.53'ün devamı



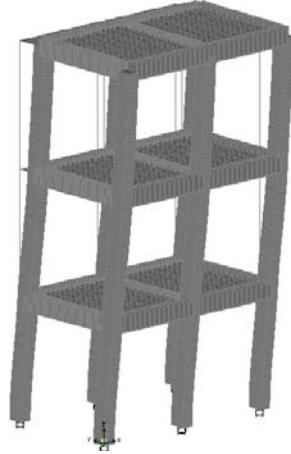
4. mod (boyuna öteleme)



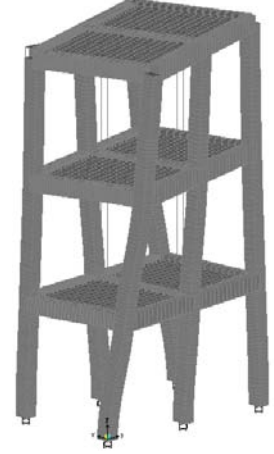
5. mod (enine öteleme)



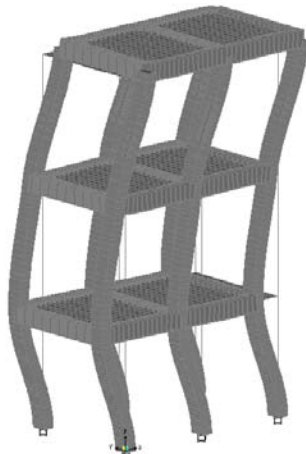
1. mod (boyuna öteleme)



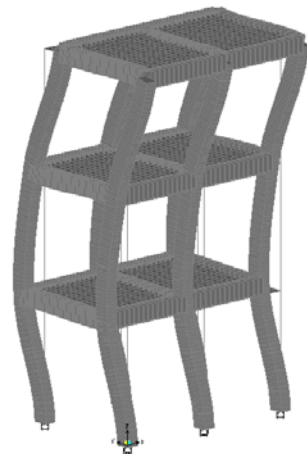
2. mod (enine öteleme)



3. mod (burulma)

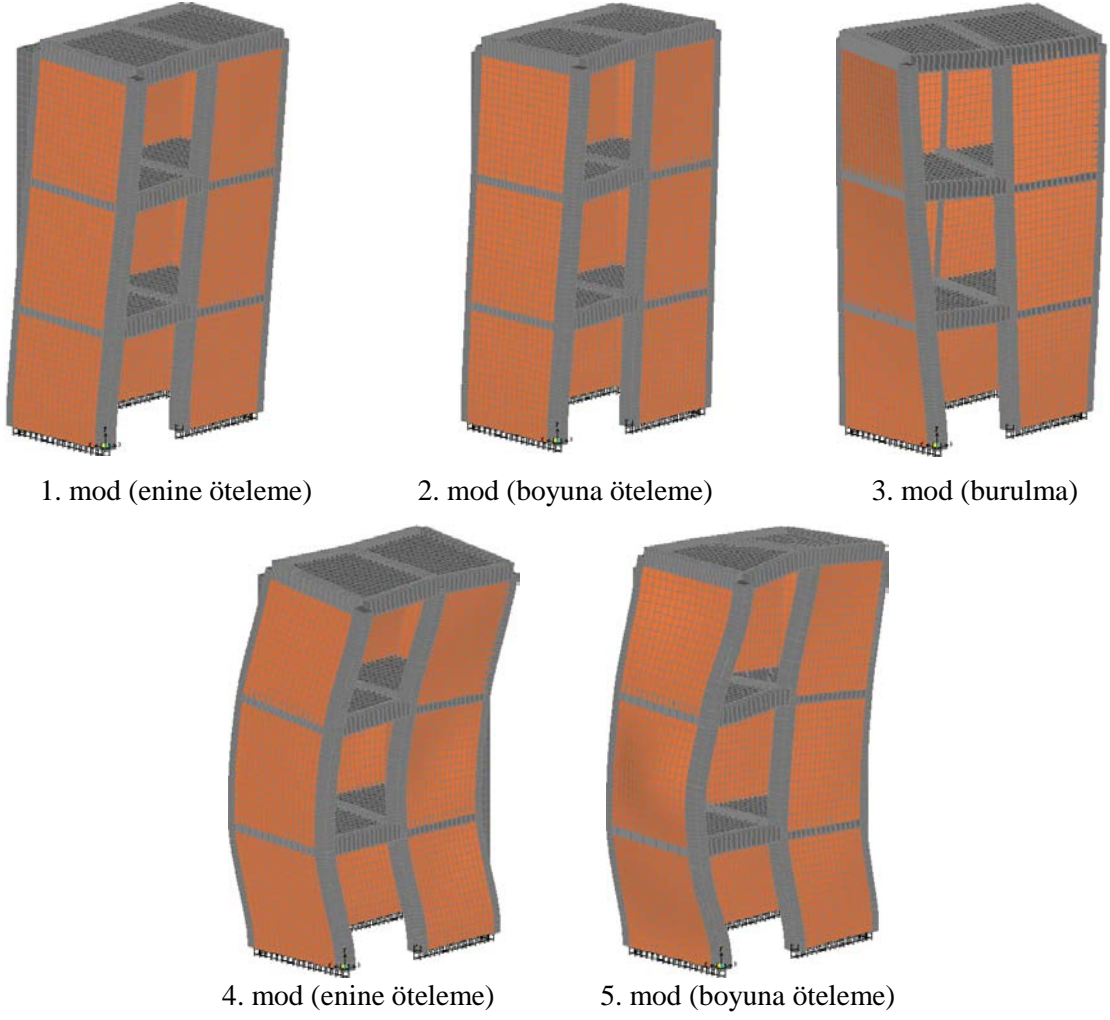


4. mod (boyuna öteleme)

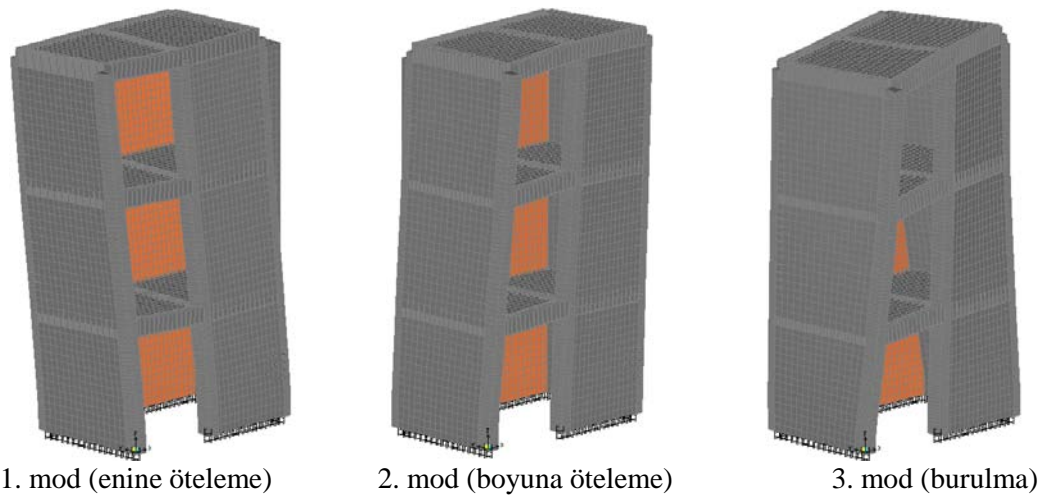


5. mod (enine öteleme)

Şekil 2.54. Üç katlı betonarme bina modelin üç katlı karkas durum için mod şekilleri

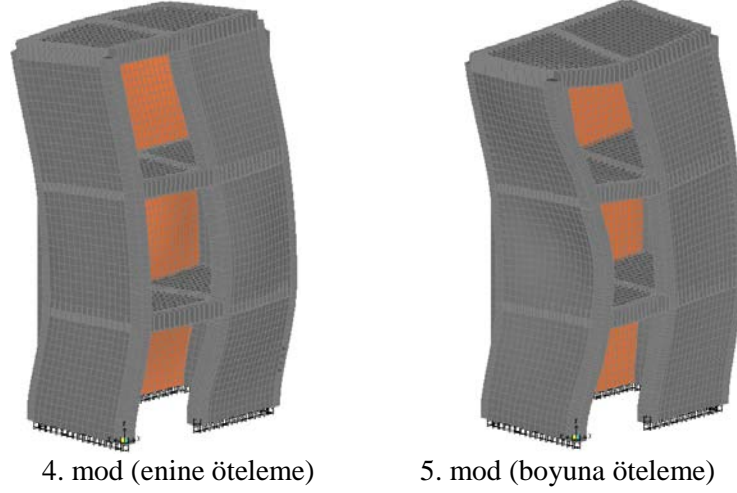


Şekil 2.55. Üç katlı betonarme bina modelin tuğlalı durum için mod şekilleri



Şekil 2.56. Üç katlı betonarme bina modelin sıvalı durum için mod şekilleri

Şekil 2.56'nın devamı



Üç katlı betonarme bina modelin karkas, tuğlalı ve sıvalı durumlara ait frekansları dikkate alındığında, karkas durumda kat yüksekliği arttıkça frekansların azaldığı, tuğlalı ve sıvalı durumlarda ise frekansların arttığı görülmektedir. Ayrıca mod şekilleri göz önüne alındığında, karkas durumda ilk üç mod sırasıyla boyuna öteleme, enine öteleme ve burulma modları iken tuğlalı ve sıvalı durumda ilk üç mod sırasıyla enine öteleme, boyuna öteleme ve burulma şeklinde oluşmaktadır. Bu durum tuğla duvarların bu bina modelinin modal davranışını oldukça değiştirdiğini göstermektedir. Tuğlalı durumda frekansların ve mod şekillerinin, kullanılan tuğla cinsine, kalınlığına ve duvarların yerlerine bağlı olarak değişim göstereceği açıktır.

### 2.5.3. Hasarsız Durum Ölçümünün Gerçekleştirilmesi

Üç katlı betonarme modelin inşası süresince bütün inşa adımlarında Operasyonel Modal Analiz (OMA) yöntemiyle titreşim testleri gerçekleştirilmiştir. İvmeölçerler dört köşe ve iki ara olmak üzere altı noktaya bağlanmıştır. Modelde ölçüm yapılan her noktaya enine ve boyuna doğrultuda ivmeölçer bağlayabilmek amacıyla bir bağlantı aparatı yapılmış ve ivmeölçerler bu aparata vidalanmıştır (Şekil 2.57). Ölçümler 0-50Hz frekans aralığında ve 10dk süreyle plastik uçlu balyozla radye temel bloğuna vurularak gerçekleştirilmiştir. Her bir inşa aşamasında gerçekleştirilen ölçümlere ait görüntüler Şekil 2.58'de verilmektedir.





Şekil 2.57. Üç katlı betonarme bina modelde ivmeölçer yerleşimi



Bir katlı karkas durum



İki katlı karkas durum



Üç katlı karkas durum



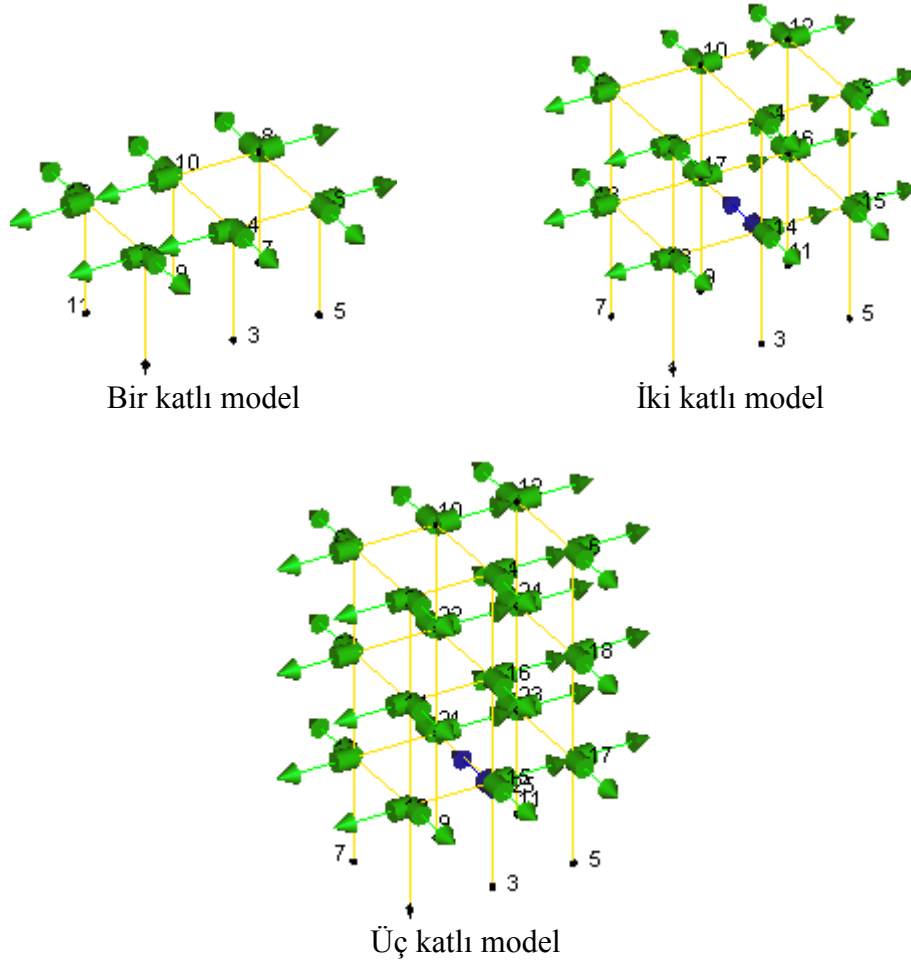
Tuğlalı durum



Sıvalı durum

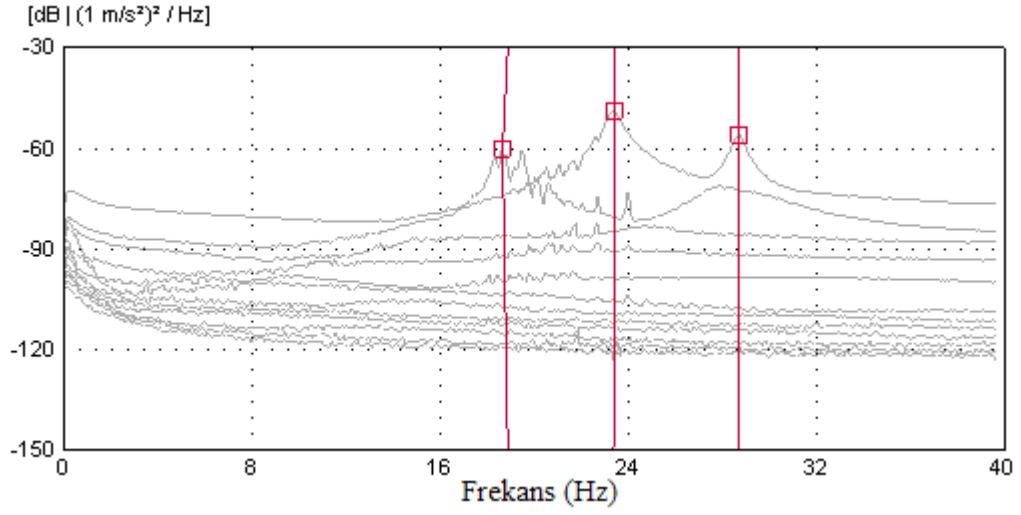
Şekil 2.58. Üç katlı betonarme bina modelin inşa aşamalarında yapılan deneysel ölçümlere ait görüntüler

Üç katlı betonarme bina model üzerindeki deneysel ölçümlerde, bir katlı durumda kullanılan ivmeölçer sayısı yeterli olsa da iki ve üç katlı durumlar için ivmeölçer sayısı yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle, iki ve üç katlı durumlar için referanslı ölçüm yöntemi kullanılarak ölçümler gerçekleştirilmiştir. Referanslı ölçüm yönteminde, ölçülecek yapı üzerine yerleştirilen ivmeölçerlerden birisi referans olarak tanımlanıp bütün ölçüm süresince aynı konumda tutulmakta, diğer ivmeölçerler ise katlar arasında taşınmaktadır. Üç katlı betonarme bina modeli üzerinde ölçüm yapılırken, her bir inşa aşaması için PULSE programında oluşturulan temsil model ve ivmeölçer düzeni için Şekil 2.59'da verilmektedir.

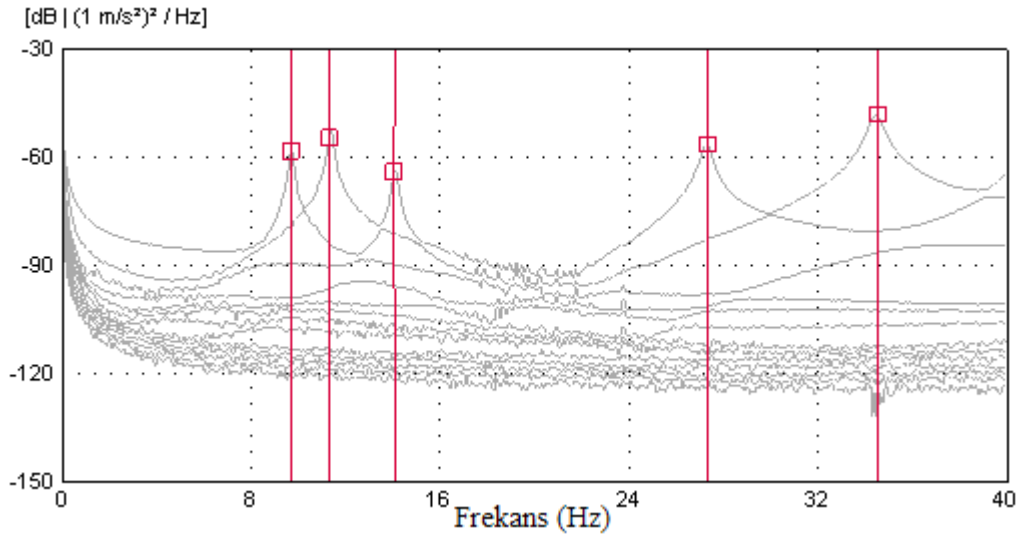


Şekil 2.59. Üç katlı betonarme bina modeli üzerinde oluşturulan deneysel ölçüm düzenleri ve ivmeölçer yönleri

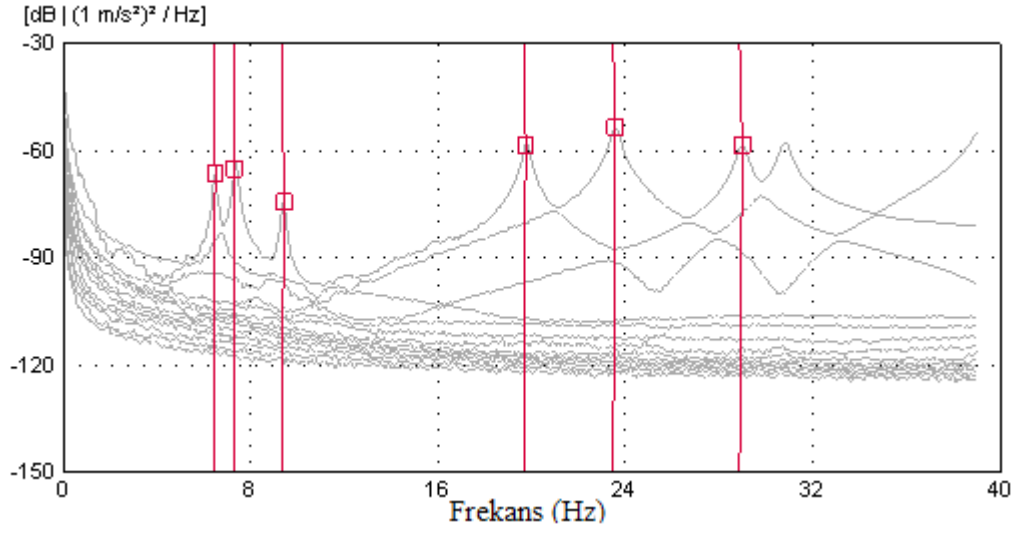
Betonarme binanın inşa aşamalarında gerçekleştirilen ölçümlerde elde edilen veriler GFTAA yöntemi kullanılarak analiz edilmiş ve modal parametreler belirlenmiştir. Bu yöntemle elde edilen spektral yoğunluk fonksiyonları, her bir inşa aşaması için Şekil 2.60-64'te verilmektedir.



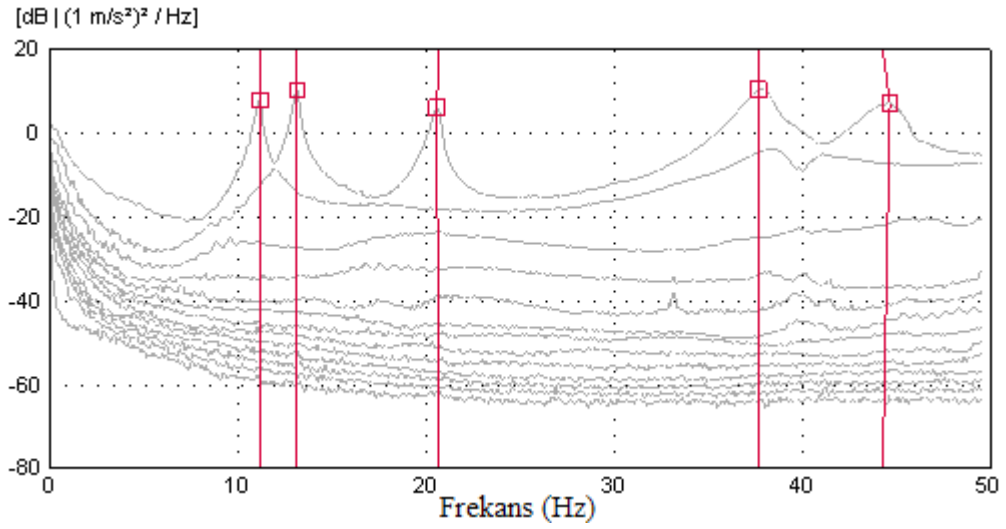
Şekil 2.60. Üç katlı betonarme modelin bir katlı karkas durumuna ait spektral yoğunluk fonksiyonu



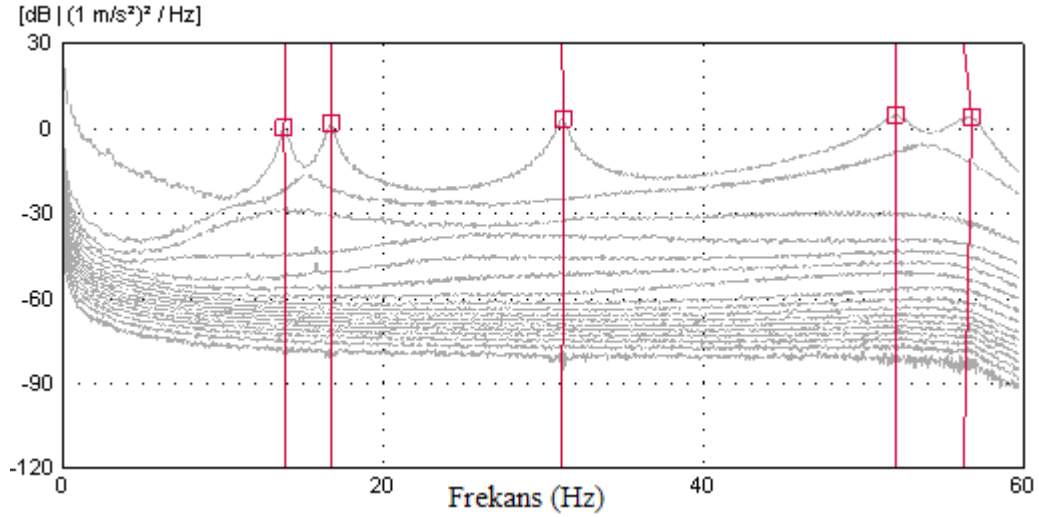
Şekil 2.61. Üç katlı betonarme modelin iki katlı karkas durumuna ait spektral yoğunluk fonksiyonu



Şekil 2.62. Üç katlı betonarme modelin üç katlı karkas durumuna ait spektral yoğunluk fonksiyonu



Şekil 2.63. Üç katlı betonarme modelin tuğlalı durumuna ait spektral yoğunluk fonksiyonu



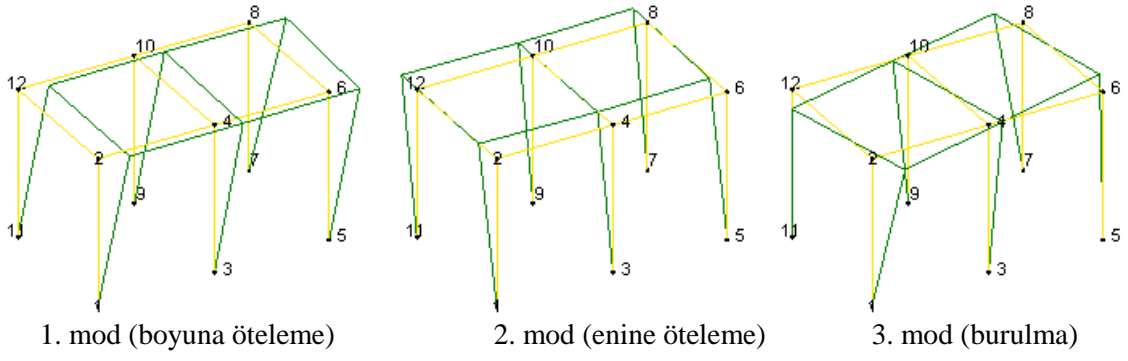
Şekil 2.64. Üç katlı betonarme modelin sıvalı durumuna ait spektral yoğunluk fonksiyonu

Üç katlı betonarme bina modelin her bir inşa aşaması için ölçülen spektrumlarından elde edilen frekans ve modal sönüm oranı değerleri Tablo 2.23'te, mod şekilleri ise Şekil 2.65-69'da verilmektedir. Elde edilen sonuçlardan, frekansların ve mod şekillerinin analitik duruma benzer şekilde değişim gösterdiği görülmektedir.

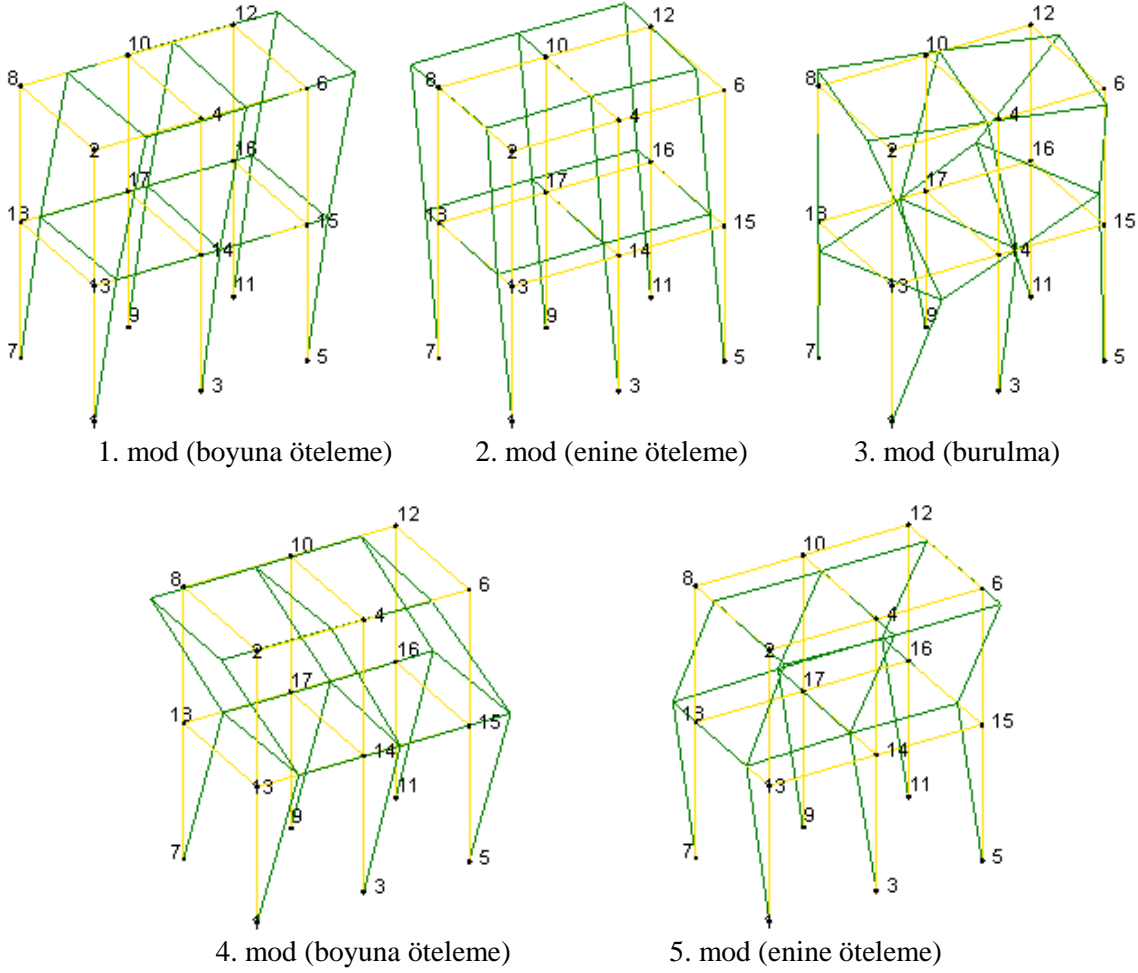
Tablo 2.23. Üç katlı betonarme modelin inşa aşamalarına bağlı deneysel doğal frekansları

Mod Numarası	1 katlı karkas		2 katlı karkas		3 katlı karkas		3 katlı tuğlalı		3 katlı sıvalı	
	f* (Hz)	$\zeta^*$	f (Hz)	$\zeta$	f (Hz)	$\zeta$	f (Hz)	$\zeta$	f (Hz)	$\zeta$
1	18.855	3.345	9.715	0.864	5.865	0.931	11.188	1.476	13.892	1.670
2	23.430	1.381	11.367	0.893	6.826	0.941	13.178	1.080	16.790	1.506
3	28.694	1.044	14.089	0.779	8.595	0.881	20.668	0.951	31.232	1.060
4	---	---	27.409	0.787	17.483	0.830	37.738	1.799	52.007	1.370
5	---	---	34.612	0.802	21.478	0.842	44.299	2.137	56.297	1.016

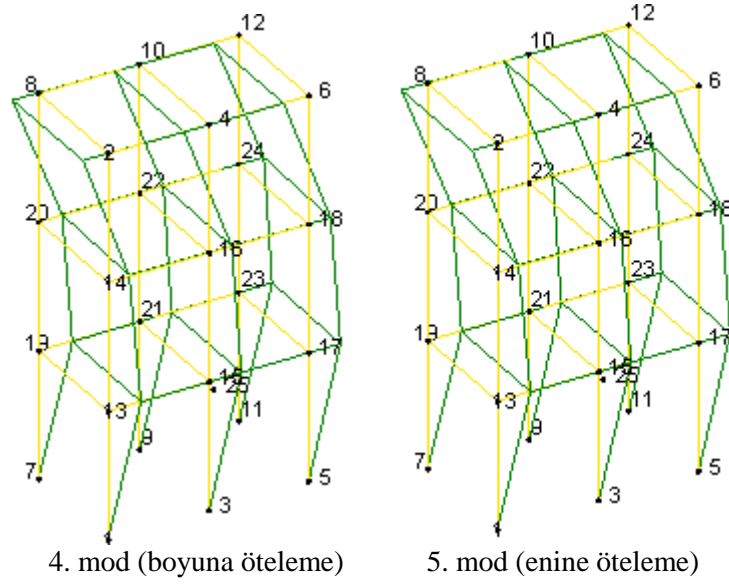
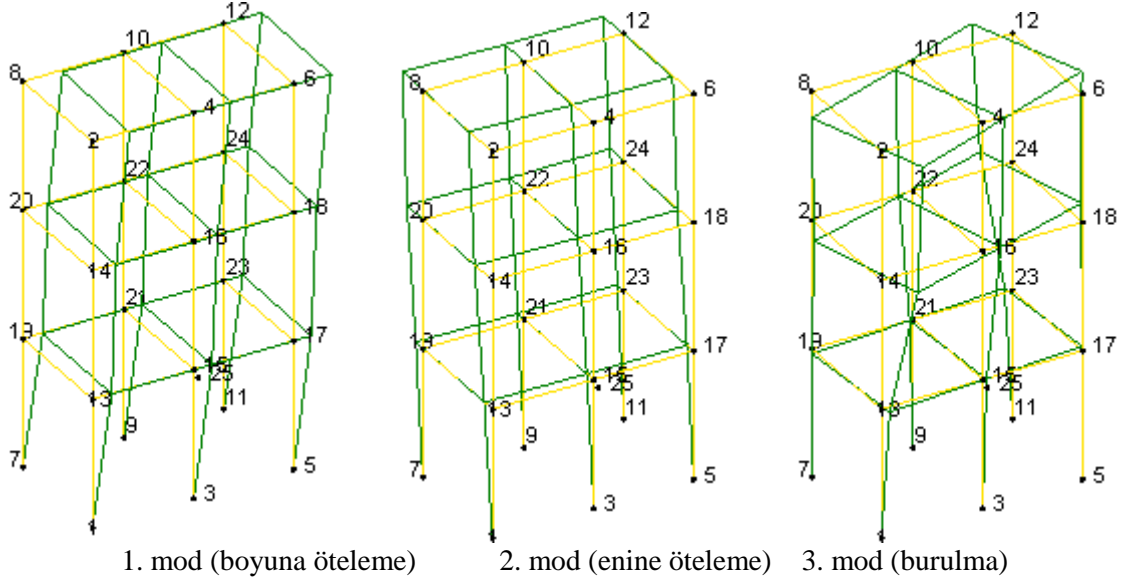
\*f frekans,  $\zeta$  sönüm değerlerini göstermektedir.



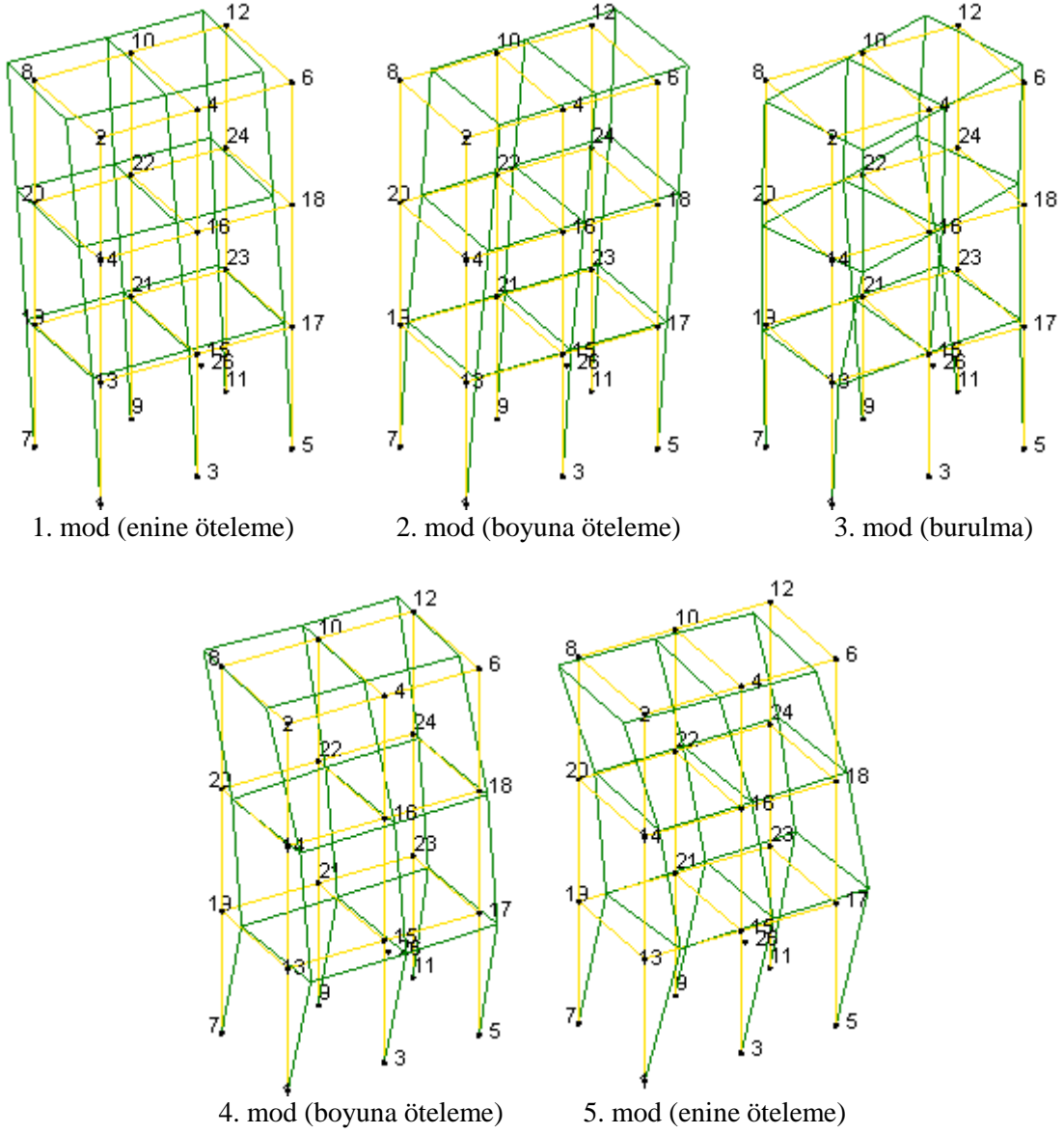
Şekil 2.65. Üç katlı betonarme bina modelin bir katlı karkas durumuna ait hasarsız deneysel mod şekilleri



Şekil 2.66. Üç katlı betonarme bina modelin iki katlı karkas durumuna ait hasarsız deneysel mod şekilleri

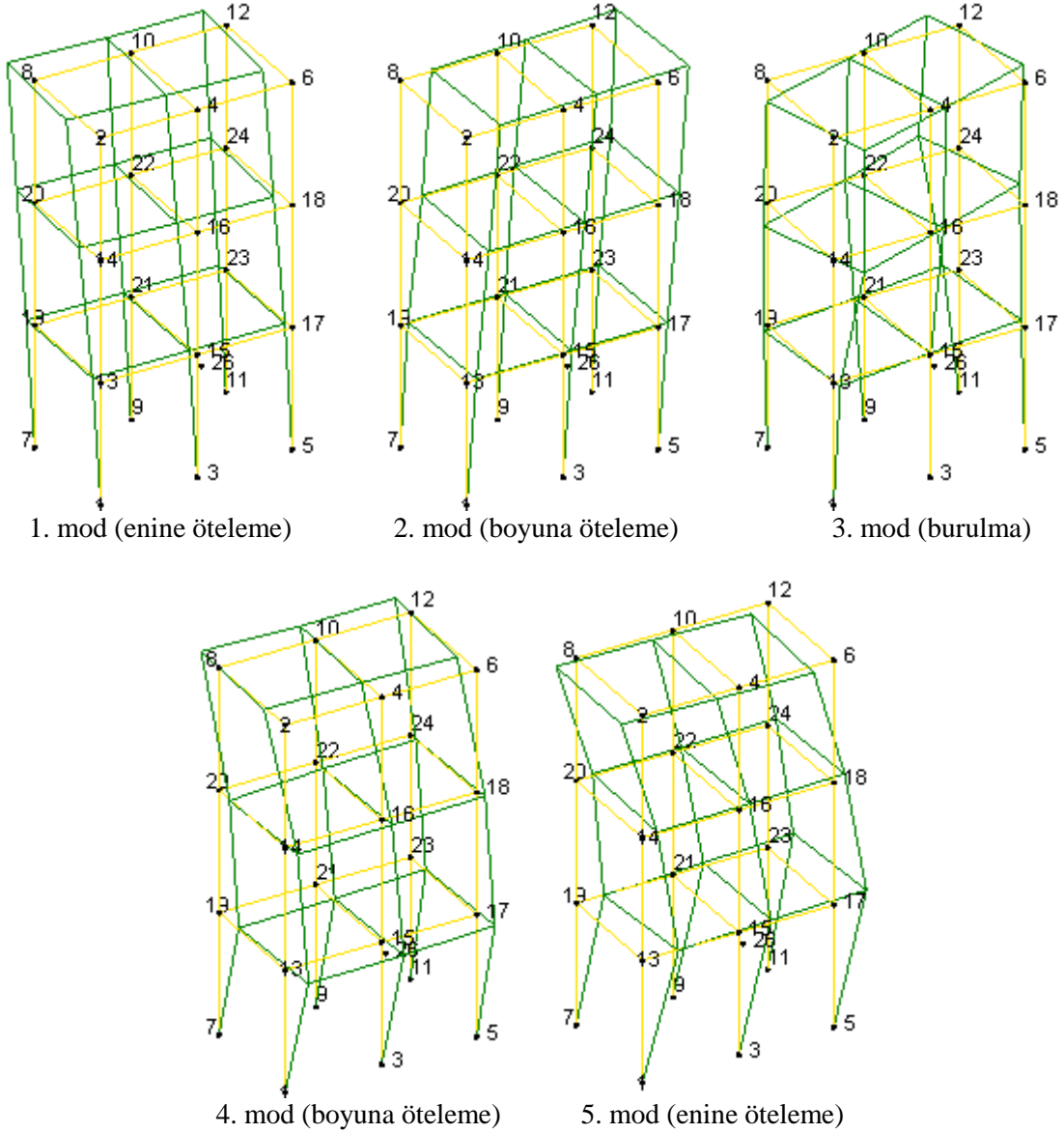


Şekil 2.67. Üç katlı betonarme bina modelin üç katlı karkas durumuna ait hasarsız deneysel mod şekilleri



Şekil 2.68. Üç katlı betonarme bina modelin tuğlalı durumuna ait hasarsız deneysel mod şekilleri





Şekil 2.69. Üç katlı betonarme bina modelin sıvalı durumuna ait hasarsız deneysel mod şekilleri

#### 2.5.4. Analitik Modelin Kalibre Edilmesi

Üç katlı betonarme bina modelin inşa aşamalarına bağlı olarak oluşturulan başlangıç analitik modellerinde mesnet birleşimleri ankastre olarak dikkate alınmıştır. Ayrıca kolonlar, kirişler ve döşemelerde kullanılan betonun aynı mekanik özelliklere sahip olduğu ve betonun elastisite değerinin beton dökümü sırasında alınan numunelerden  $2.8 \cdot 10^{10} \text{N/m}^2$  olarak belirlenmiştir. Tuğla duvarlarda da benzer şekilde, bütün duvarlar için tek elastisite değeri dikkate alınmıştır. Üç katlı betonarme bina modelde hasarsız durum için

gerçekleştirilen ölçümlerden ve başlangıç analitik modellerden elde edilen frekans değerleri ve MGK değerleri her bir inşa aşaması için Tablo 2.24-28’de verilmektedir.

Tablo 2.24. Üç katlı betonarme bina modelin bir katlı karkas durumu için hasarsız deneysel ve başlangıç analitik frekansları ile MGK değerleri

Mod Numarası	Doğal Frekans(Hz)			Modal Güvence Kriteri
	Deneysel Hasarsız	Analitik Başlangıç	Fark (%)	
1	18.855	19.941	5.76	0.998
2	23.430	24.645	5.19	0.996
3	28.694	30.309	5.63	0.988

Tablo 2.25. Üç katlı betonarme bina modelin iki katlı karkas durumu için hasarsız deneysel ve başlangıç analitik frekansları ile MGK değerleri

Mod Numarası	Doğal Frekans(Hz)			Modal Güvence Kriteri
	Deneysel Hasarsız	Analitik Başlangıç	Fark (%)	
1	9.715	10.205	5.04	0.995
2	11.367	11.879	4.51	0.997
3	14.089	14.762	4.78	0.984
4	27.409	29.089	6.13	0.989
5	34.612	36.563	5.64	0.990

Tablo 2.26. Üç katlı betonarme bina modelin üç katlı karkas durumu için hasarsız deneysel ve başlangıç analitik frekansları ile MGK değerleri

Mod Numarası	Doğal Frekans(Hz)			Modal Güvence Kriteri
	Deneysel Hasarsız	Analitik Başlangıç	Fark (%)	
1	5.865	6.596	12.48	0.922
2	6.826	7.490	9.73	0.997
3	8.595	9.435	9.78	0.858
4	17.483	19.417	11.07	0.956
5	21.478	23.776	10.7	0.995

Tablo 2.27. Üç katlı betonarme bina modelin tuğlalı durumu için hasarsız deneysel ve başlangıç analitik frekansları ile MGK değerleri

Mod Numarası	Doğal Frekans(Hz)			Modal Güvence Kriteri
	Deneysel Hasarsız	Analitik Başlangıç	Fark (%)	
1	11.188	13.074	16.86	0.988
2	13.178	14.601	10.80	0.947
3	20.668	22.108	6.97	0.958
4	37.738	41.910	11.06	0.976
5	44.299	44.805	1.14	0.924

Tablo 2.28. Üç katlı betonarme bina modelin sıvalı durumu için hasarsız deneysel ve başlangıç analitik frekansları ile MGK değerleri

Mod Numarası	Doğal Frekans(Hz)			Modal Güvence Kriteri
	Deneysel Hasarsız	Analitik Başlangıç	Fark (%)	
1	13.892	14.135	1.75	0.993
2	16.790	15.977	4.85	0.978
3	31.232	24.881	20.34	0.934
4	52.007	46.110	11.34	0.947
5	56.297	49.574	11.94	0.911

Her bir inşa aşaması için gerçekleştirilen ölçümlerden ve analizlerden elde edilen sonuçlar arasında farklılıklar olduğu görülmektedir. Oluşturulan laboratuvar modellerinin hasarsız olduğu varsayıldığı için her bir aşamada kullanılan malzemenin elastisite değerlerindeki değişimler dikkate alınarak bu farklılıklar en aza indirgenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla, her katta kolonlara, kirişlere, döşemelere ve duvarlara ayrı ayrı malzeme özellikleri atanmış ve bu değerlere değişim verilmiştir. Doğal frekans, mod şekli ve MGK değerlerinde en fazla %1 farklılık sağlanacak şekilde kriterler ortaya konulmuştur. Seçilen hedef doğrultusunda, elastisite değerlerinde %10'luk bir değişim olabileceği varsayılarak çözüm elde edilmiştir. Yakınsamayı sağlayan elastisite değeri için doğal frekanslar ve mod şekilleri hesaplanmıştır. Her bir inşa aşaması için başlangıç analitik modellerin kalibre edilmesi sonucunda elde edilen frekans ve fark değerleri Tablo 2.29-33'te verilmektedir.

Tablo 2.29. Üç katlı betonarme bina modelin bir katlı karkas durum için hasarsız deneysel ve kalibre analitik frekansları ile MGK değerleri

Mod Numarası	Doğal Frekansı(Hz)			Modal Güvence Kriteri
	Deneysel Hasarsız	Analitik Kalibre	Fark (%)	
1	18.855	18.855	0.00	0.998
2	23.430	23.430	0.00	0.996
3	28.694	28.694	0.00	0.988

Bir katlı karkas durum için gerçekleştirilen analizlerden, elastisite değerleri kolonlarda  $2.47 \cdot 10^{10} \text{N/m}^2$ , kirişlerde  $2.59 \cdot 10^{10} \text{N/m}^2$  ve döşemede  $3.66 \cdot 10^{10} \text{N/m}^2$  olarak elde edilmiştir. Kalibre edilmiş durumda bu elastisite değerleri kullanılarak frekanslar arasındaki farklılıklar tamamen ortadan kaldırılabilmiştir.

Tablo 2.30. Üç katlı betonarme bina modelin iki katlı karkas durum için hasarsız deneysel ve kalibre analitik frekansları ile MGK değerleri

Mod Numarası	Doğal Frekansı(Hz)			Modal Güvence Kriteri
	Deneysel Hasarsız	Analitik Kalibre	Fark (%)	
1	9.715	9.715	0.00	0.995
2	11.367	11.366	0.00	0.997
3	14.089	14.089	0.00	0.984
4	27.409	27.476	0.24	0.989
5	34.612	34.612	0.00	0.990

İki katlı karkas duruma ait analitik modelin kalibre edilmesi sonucunda elastisite değerleri 1. kat kolonlarında  $2.22 \cdot 10^{10} \text{N/m}^2$ , kirişlerinde  $2.51 \cdot 10^{10} \text{N/m}^2$  ve döşemesinde  $3.56 \cdot 10^{10} \text{N/m}^2$  olarak; 2. kat kolonlarında  $2.47 \cdot 10^{10} \text{N/m}^2$ , kirişlerinde  $2.65 \cdot 10^{10} \text{N/m}^2$  ve döşemesinde  $2.68 \cdot 10^{10} \text{N/m}^2$  olarak belirlenmiştir. Bu elastisite değerlerine göre analitik frekanslarla deneysel frekanslar arasındaki fark maksimum %0.24'e kadar azaltılabilmiştir.

Tablo 2.31. Üç katlı betonarme bina modelin üç katlı karkas durumu için hasarsız deneysel ve kalibre analitik frekansları ile MGK değerleri

Mod Numarası	Doğal Frekansı(Hz)			Modal Güvence Kriteri
	Deneysel Hasarsız	Analitik Kalibre	Fark (%)	
1	5.865	5.920	0.95	0.917
2	6.826	6.811	0.21	0.996
3	8.595	8.529	0.76	0.852
4	17.483	17.451	0.18	0.965
5	21.478	21.486	0.03	0.994

Üç katlı karkas durum için gerçekleştirilen kalibrasyon işleminden elastisite değerleri 1. kat kolonlarında  $1.63 \cdot 10^{10} \text{N/m}^2$ , kirişlerinde  $2.32 \cdot 10^{10} \text{N/m}^2$  ve döşemesinde  $3.43 \cdot 10^{10} \text{N/m}^2$  olarak; 2. kat kolonlarında  $2.01 \cdot 10^{10} \text{N/m}^2$ , kirişlerinde  $2.54 \cdot 10^{10} \text{N/m}^2$  ve döşemesinde  $2.63 \cdot 10^{10} \text{N/m}^2$  olarak; 3. kat kolonlarında  $2.31 \cdot 10^{10} \text{N/m}^2$ , kirişlerinde  $2.65 \cdot 10^{10} \text{N/m}^2$  ve döşemesinde  $2.77 \cdot 10^{10} \text{N/m}^2$  olarak hesaplanmıştır. Bu elastisite değerlerine göre deneysel ve analitik frekanslar arasındaki fark maksimum %0.95'e kadar azaltılabilmektedir.

Tablo 2.32. Üç katlı betonarme bina modelin tuğlalı durumu için hasarsız deneysel ve kalibre analitik frekansları ile MGK değerleri

Mod Numarası	Doğal Frekansı(Hz)			Modal Güvence Kriteri
	Deneysel Hasarsız	Analitik Kalibre	Fark (%)	
1	11.188	11.188	0.00	0.997
2	13.178	13.178	0.00	0.941
3	20.668	20.668	0.00	0.950
4	37.738	37.738	0.00	0.965
5	44.299	44.299	0.00	0.889

Üç katlı tuğlalı durum için kalibre edilmiş durumda elastisite değerleri 1. kat kolonlarında  $1.60 \cdot 10^{10} \text{N/m}^2$ , kirişlerinde  $2.29 \cdot 10^{10} \text{N/m}^2$  ve döşemesinde  $3.41 \cdot 10^{10} \text{N/m}^2$  olarak; 2. kat kolonlarında  $2.0 \cdot 10^{10} \text{N/m}^2$ , kirişlerinde  $2.52 \cdot 10^{10} \text{N/m}^2$  ve döşemesinde  $2.63 \cdot 10^{10} \text{N/m}^2$  olarak; 3. kat kolonlarında  $2.31 \cdot 10^{10} \text{N/m}^2$ , kirişlerinde  $2.65 \cdot 10^{10} \text{N/m}^2$ , döşemesinde  $2.77 \cdot 10^{10} \text{N/m}^2$  ve duvarlarda  $1.0-1.7 \cdot 10^{10} \text{N/m}^2$  aralığında değişen değerler olarak dikkate alınmış ve frekanslar arasında en iyi uyum elde edilmiştir.

Tablo 2.33. Üç katlı betonarme bina modelin sıvalı durumu için hasarsız deneysel ve başlangıç analitik frekansları ile MGK değerleri

Mod Numarası	Doğal Frekansı(Hz)			Modal Güvence Kriteri
	Deneysel Hasarsız	Analitik Kalibre	Fark (%)	
1	13.892	13.889	0.02	0.953
2	16.790	16.788	0.02	0.945
3	31.232	31.221	0.04	0.904
4	52.007	51.974	0.06	0.932
5	56.297	56.293	0.01	0.924

Sıvalı durumda duvarlardaki elastisite değerleri değişken olarak dikkate alınmış ve deneysel ile analitik frekanslar arasındaki fark en aza indirilebilmiştir.

### 2.5.5. Hasarlı Durum Ölçümlerinin Gerçekleştirilmesi

Üç katlı betonarme bina modelde, yeri ve büyüklüğü yaklaşık olarak ölçülmüş hasar etkileri oluşturulmuş ve deneysel ölçümler aynı çevresel şartlar altında tekrarlanmıştır. Hasar etkileri birbirini takiben oluşturulmuştur. Üç katlı betonarme bina modelde hasar etkileri birinci katta oluşturulmuştur. Bu hasar durumları,

- ✓ Hasar 1: 1 aksı üzerindeki duvarda çatlaklar oluşması
- ✓ Hasar 2: 1 aksı üzerindeki duvarın tamamen göçmesi
- ✓ Hasar 3: A aksı üzerinde 2 ve 3 aksları arasındaki duvarın tamamen göçmesi
- ✓ Hasar 4: Bütün duvarların göçmesi
- ✓ Hasar 5: A-1 kolonu üst ucunda kabuk betonu hasarı
- ✓ Hasar 6: B-1 kolonu üst ucunda kabuk betonu hasarı
- ✓ Hasar 7: A-1 kolonu üst ucu göbek betonu hasarı

olarak dikkate alınmıştır.

#### 2.5.5.1. Hasar 1: 1 Aksı Üzerindeki Duvarda Çatlaklar Oluşması

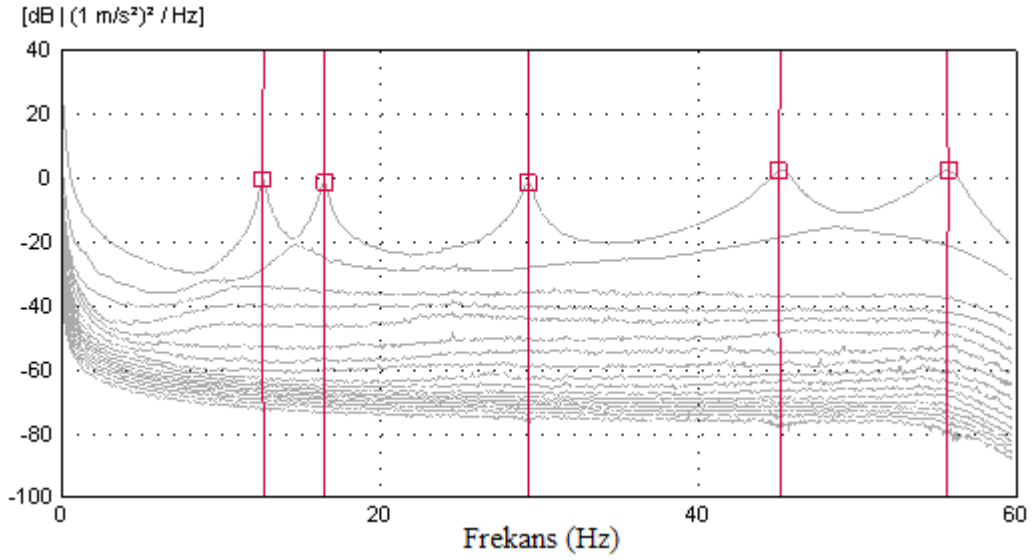
Üç katlı betonarme bina modelinde ilk hasar durumu olarak 1. katta enine doğrultudaki duvarlardan birinin (1 aksı üzerindeki) diyagonaller doğrultusunda çatlama şeklinde düşünülmüştür. Bu amaçla, duvar diyagonaller doğrultusunda kırıcı matkap

yardımla Şekil 2.70'te görüldüğü gibi hasara uğratılmıştır. Daha önce kullanılan ölçüm yöntemiyle hasarlı duvara sahip model üzerinde ölçümler tekrarlanmıştır.



Şekil 2.70. Üç katlı betonarme bina modelde Hasar 1 durumu

Bu hasar durumu için gerçekleştirilen ölçümlerden, GFTAA yöntemi kullanılarak elde edilen spektral yoğunluk fonksiyonu Şekil 2.71'de verilmektedir.

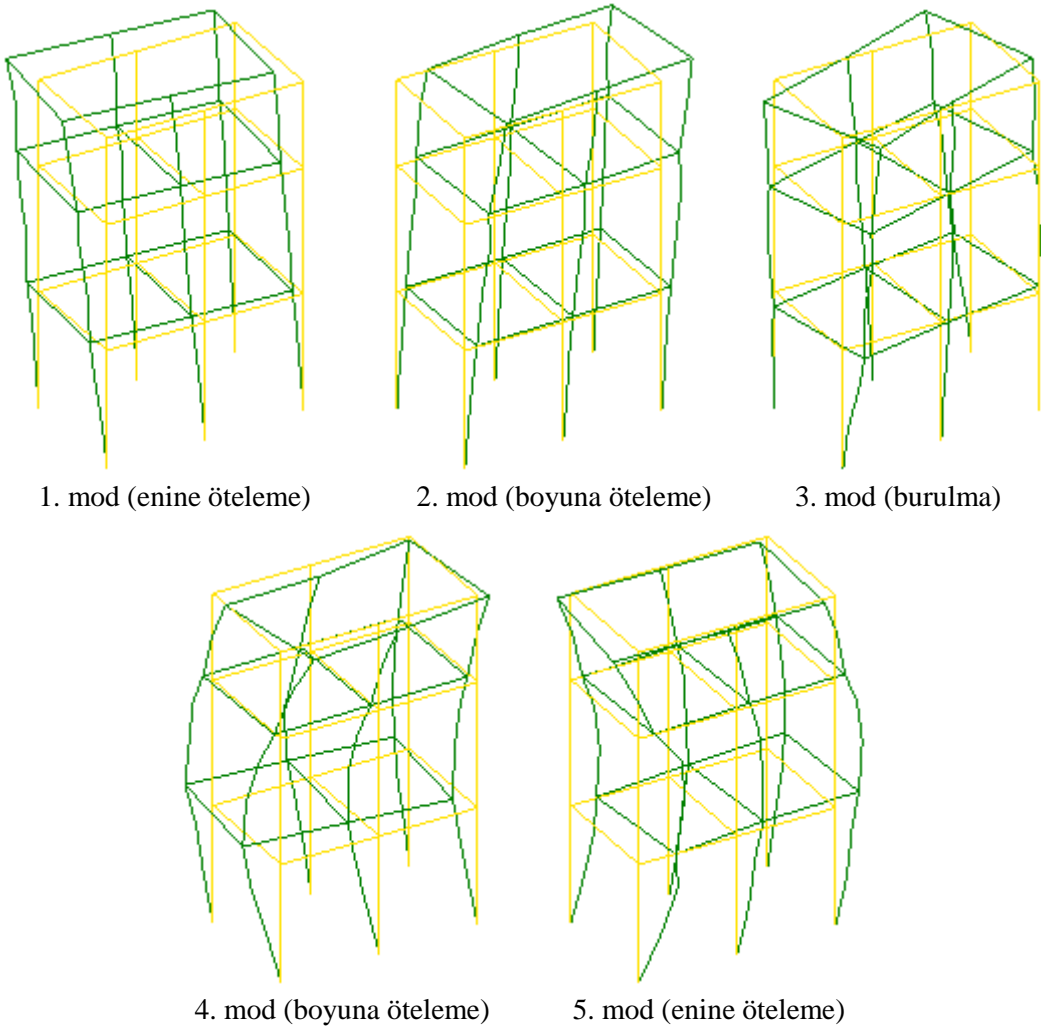


Şekil 2.71. Üç katlı betonarme bina modelde Hasar 1 duruma ait spektral yoğunluk fonksiyonu

Spektral yoğunluk fonksiyonu kullanılarak belirlenen doğal frekanslar ve modal sönüm oranları Tablo 2.34'te, mod şekilleri ise Şekil 2.72'de verilmektedir.

Tablo 2.34. Üç katlı betonarme bina modelin Hasar 1 durumu için ölçülen doğal frekansları ve modal sönüm oranları

Mod Numarası	Doğal Frekans (Hz)	Modal Sönüm Oranı (%)
1	12.712	1.472
2	16.526	1.402
3	29.350	1.161
4	45.242	1.650
5	55.603	1.343



Şekil 2.72. Üç katlı betonarme bina modelde Hasar 1 durumuna ait deneysel mod şekilleri



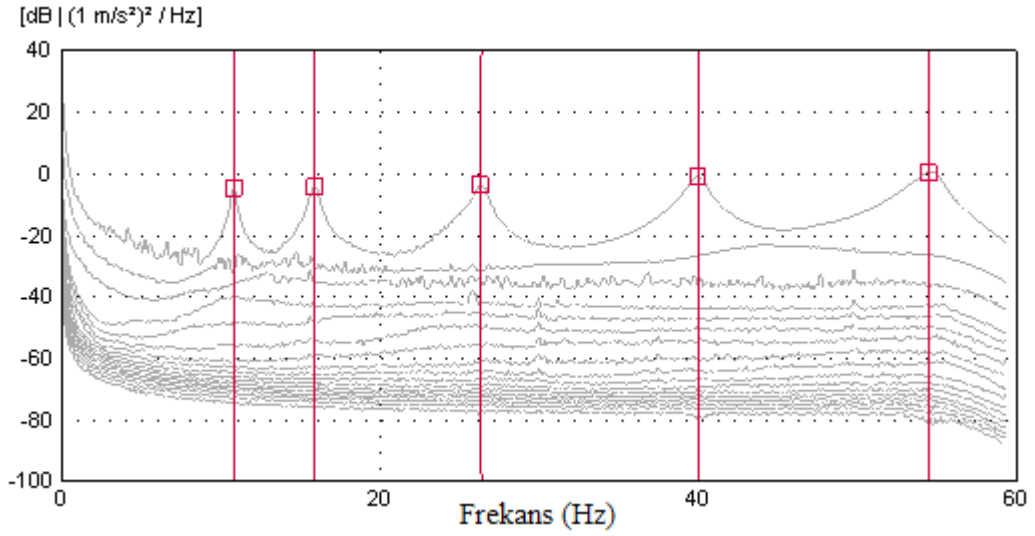
### 2.5.5.2. Hasar 2: 1 Aksı Üzerindeki Duvarın Tamamen Göçmesi

Üç katlı betonarme bina modelinde ikinci hasar durumu olarak hasar gören duvarın tamamen yıkılması durumu dikkate alınmıştır. Şekil 2.73'te hasar gören duvarın tamamen yıkıldığı duruma ait görüntüler verilmektedir. Daha önce kullanılan ölçüm düzeneğiyle bu hasar durumu için model üzerinde ölçümler tekrarlanmıştır.



Şekil 2.73. Üç katlı betonarme bina modelde Hasar 2 durumu

Gerçekleştirilen ölçümlerden GFTAA yöntemiyle elde edilen hasarlı duruma ait spektral yoğunluk fonksiyonu Şekil 2.74'te verilmektedir.

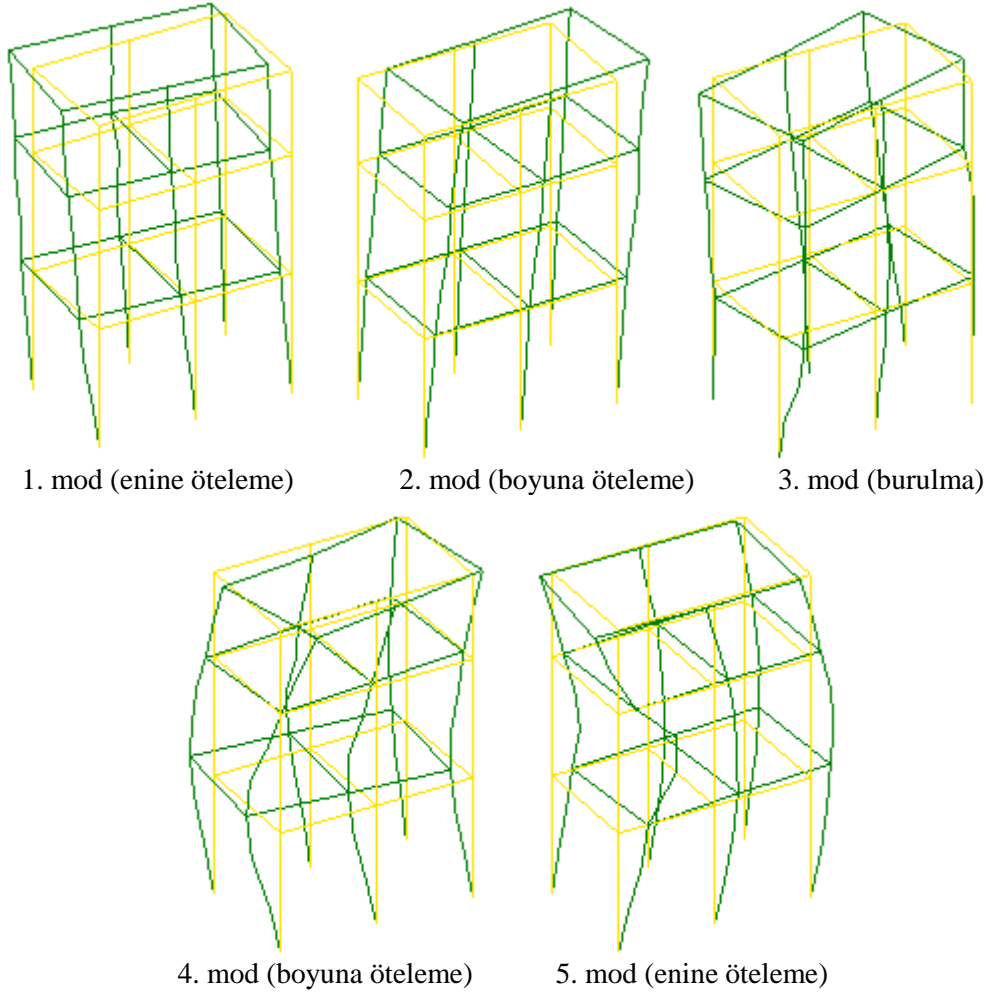


Şekil 2.74. Üç katlı betonarme bina modelde Hasar 2 durumu için spektral yoğunluk fonksiyonu

Spektral yoğunluk fonksiyonundan bu hasar durumu için belirlenen doğal frekanslar ve modal sönüm oranları Tablo 2.35'te, mod şekilleri ise Şekil 2.75'te verilmektedir.

Tablo 2.35. Üç katlı betonarme bina modelin Hasar 2 durumu için ölçülen doğal frekansları ve modal sönüm oranları

Mod Numarası	Doğal Frekans (Hz)	Modal Sönüm Oranı (%)
1	10.863	1.274
2	15.954	1.525
3	26.417	1.617
4	40.011	1.331
5	54.545	1.307



Şekil 2.75. Üç katlı betonarme bina modelde Hasar 2 durumuna ait deneysel mod şekilleri

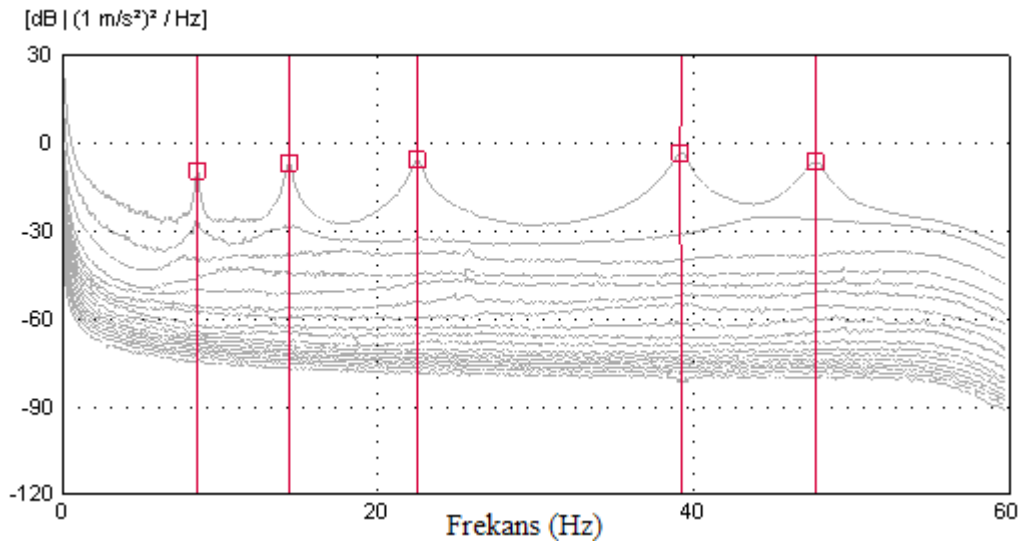
### 2.5.5.3. Hasar 3: A Aksı Üzerinde 2 ve 3 Aksları Arasındaki Duvarın Tamamen Göçmesi

Üç katlı betonarme bina modelde üçüncü hasar etkisi olarak boyuna doğrultudaki bir duvarın hasar gördüğü durum dikkate alınmıştır. Bu amaçla A aksı üzerinde 2 ve 3 aksları arasındaki duvar tamamen yıkılmıştır. Şekil 2.76'da bu hasar durumuna ve gerçekleştirilen ölçüme ait görüntüler verilmektedir.



Şekil 2.76. Üç katlı betonarme bina modelde Hasar 3 durumu

Bu hasar durumu için gerçekleştirilen ölçümlerden GFTAA yöntemiyle elde edilen spektral yoğunluk fonksiyonu Şekil 2.77'de verilmektedir.

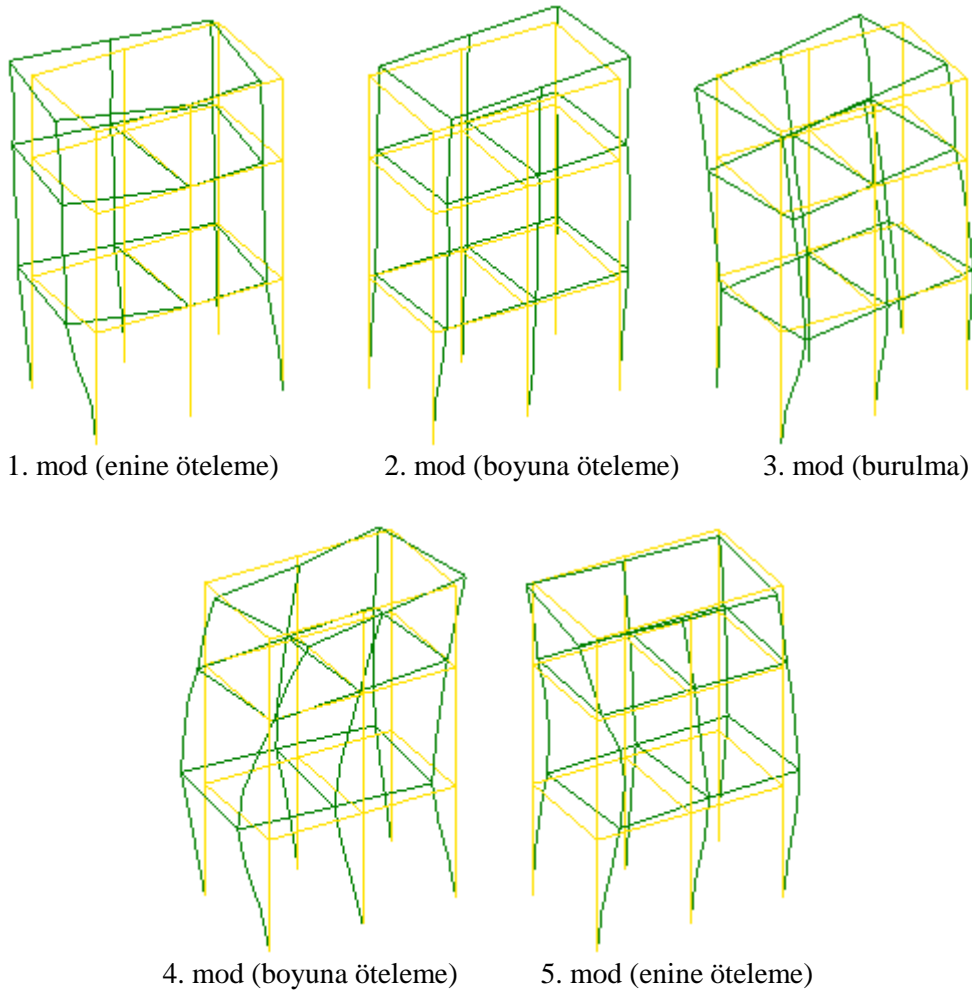


Şekil 2.77. Üç katlı betonarme bina modelde Hasar 3 durumuna ait spektral yoğunluk fonksiyonu

Spektral yoğunluk fonksiyonundan Hasar 3 durumu için belirlenen doğal frekanslar ve modal sönüm oranları Tablo 2.36'da, mod şekilleri ise Şekil 2.78'de verilmektedir.

Tablo 2.36. Üç katlı betonarme bina modelin Hasar 3 durumu için ölçülen doğal frekansları ve modal sönüm oranları

Mod Numarası	Doğal Frekans (Hz)	Modal Sönüm Oranı (%)
1	8.584	1.076
2	14.387	1.283
3	22.516	1.440
4	39.223	1.171
5	47.743	1.308



Şekil 2.78. Üç katlı betonarme bina modelde Hasar 3 durumuna ait deneysel mod şekilleri

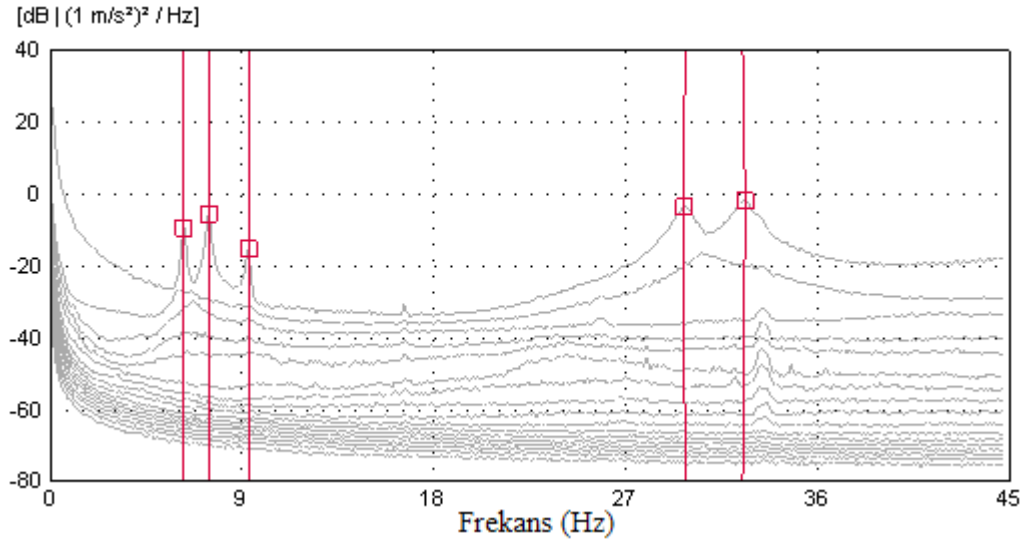
#### 2.5.5.4. Hasar 4: 1. Kattaki Bütün Duvarların Göçmesi

Üç katlı bina modelinde dördüncü hasar durumu olarak 1. kattaki bütün duvarların hasar gördüğü ve yıkıldığı durum dikkate alınmıştır. Şekil 2.79’da bu hasar durumuna ve gerçekleştirilen ölçüme ait görüntüler verilmektedir.



Şekil 2.79. Üç katlı betonarme bina modelde Hasar 4 durumu

Bu hasar durumu için gerçekleştirilen ölçümlerden GFTAA yöntemiyle elde edilen hasarlı duruma ait spektral yoğunluk fonksiyonu Şekil 2.80’de verilmektedir.

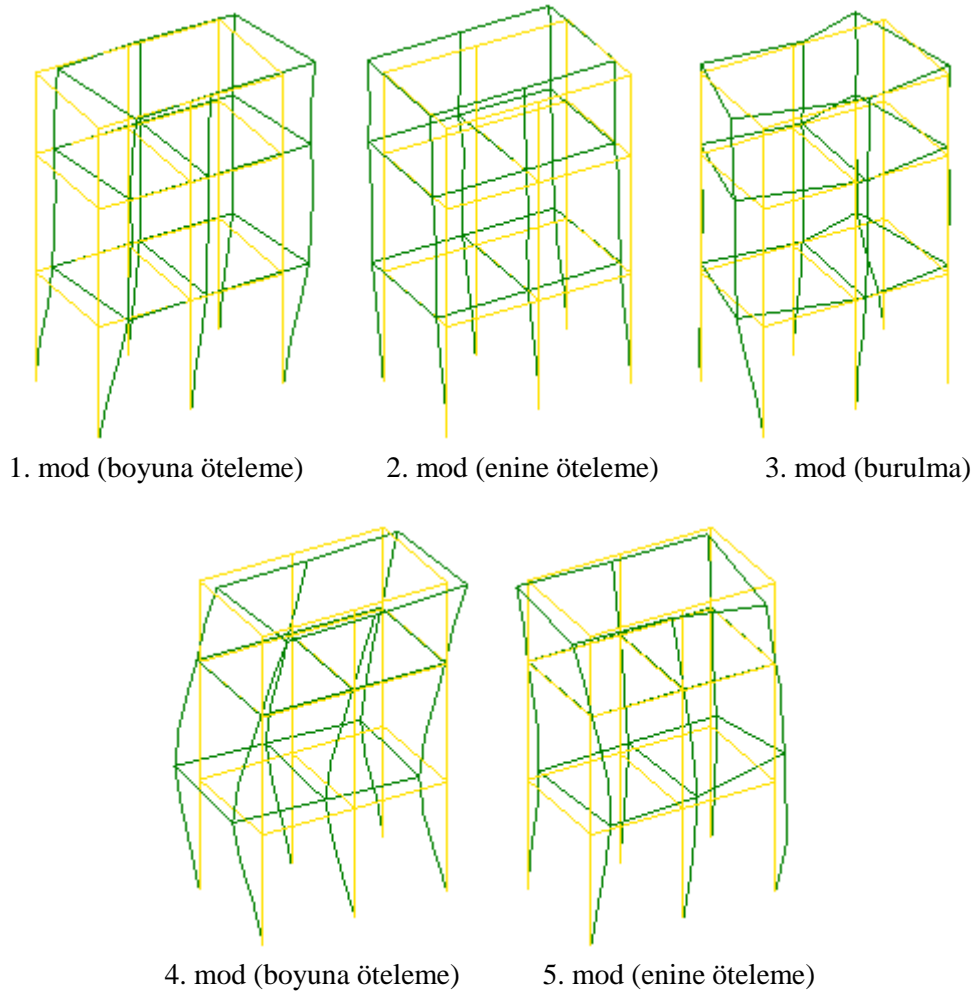


Şekil 2.80. Üç katlı betonarme bina modelde Hasar 4 durumuna ait spektral yoğunluk fonksiyonu

Bu hasar durumu için elde edilen spektral yoğunluk fonksiyonu kullanılarak belirlenen doğal frekanslar ve modal sönüm oranları Tablo 2.37’de, mod şekilleri ise Şekil 2.81’de verilmektedir.

Tablo 2.37. Üç katlı betonarme bina modelin Hasar 4 durumu için ölçülen doğal frekansları ve modal sönüm oranları

Mod Numarası	Doğal Frekans (Hz)	Modal Sönüm Oranı (%)
1	6.283	1.025
2	7.440	0.947
3	9.303	0.851
4	29.791	1.343
5	32.449	1.557



Şekil 2.81. Üç katlı betonarme bina modelde Hasar 4 durumuna ait deneysel mod şekilleri

Bu hasar durumundan sonra betonarme bina modelin modal davranışında değişiklik meydana gelmiş ve ilk mod boyuna doğrultuda oluşmuştur.

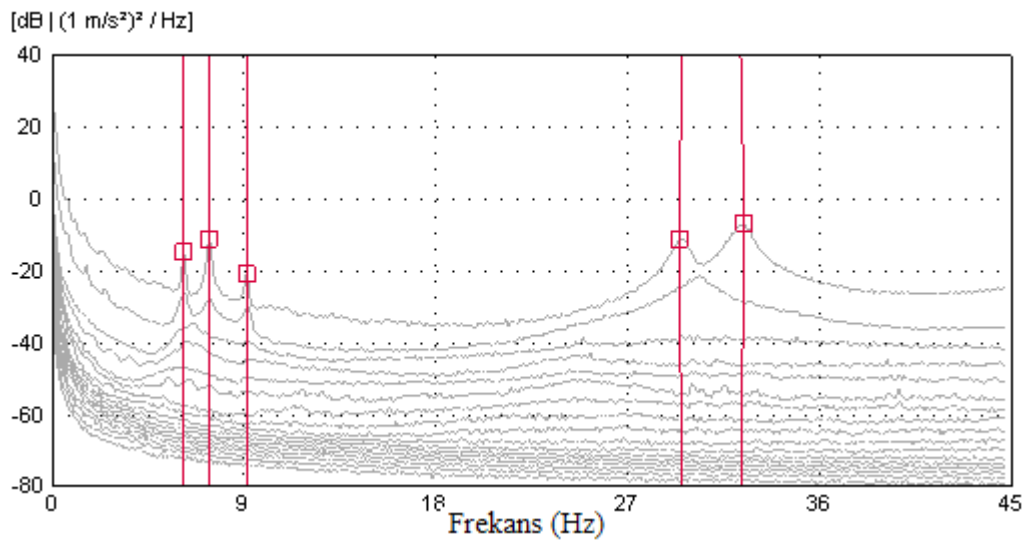
### 2.5.5.5. Hasar 5: A-1 Kolonu Üst Ucunda Kabuk Betonu Hasarı

Üç katlı bina modelinde beşinci hasar durumu olarak 1. kattaki A-1 kolonunun üst ucunda kabuk betonu hasarı dikkate alınmıştır. Şekil 2.82’de bu hasar durumuna ve gerçekleştirilen ölçüme ait görüntüler verilmektedir.



Şekil 2.82. Üç katlı betonarme bina modelde Hasar 5 durumu

Bu hasar durumu için gerçekleştirilen ölçümlerden GFTAA yöntemiyle elde edilen hasarlı duruma ait spektral yoğunluk fonksiyonu Şekil 2.83’te verilmektedir.

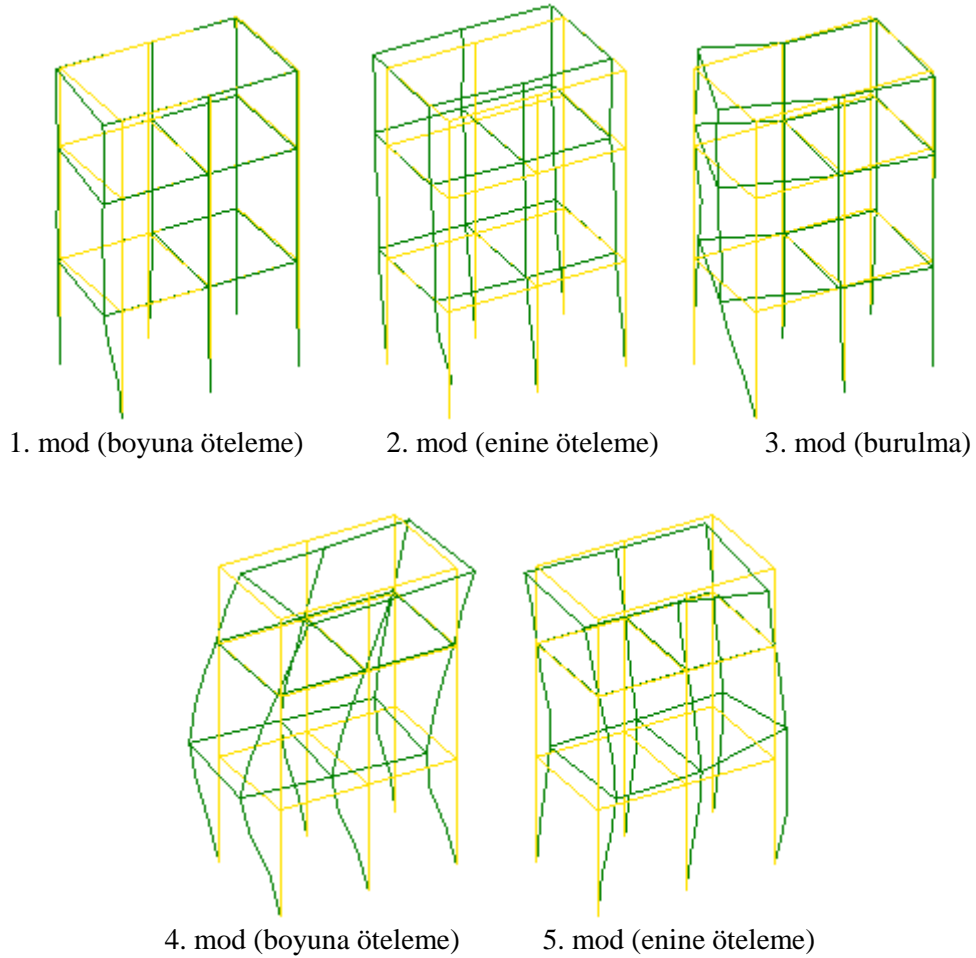


Şekil 2.83. Üç katlı betonarme bina modelde Hasar 5 durumuna ait spektral yoğunluk fonksiyonu

Spektral yoğunluk fonksiyonu kullanılarak belirlenen doğal frekanslar ve modal sönüm oranları Tablo 2.38’de, mod şekilleri ise Şekil 2.84’te verilmektedir.

Tablo 2.38. Üç katlı betonarme bina modelin Hasar 5 durumu için ölçülen doğal frekansları ve modal sönüm oranları

Mod Numarası	Doğal Frekans (Hz)	Modal Sönüm Oranı (%)
1	6.190	1.012
2	7.389	1.062
3	9.161	0.723
4	29.550	1.288
5	32.312	1.688



Şekil 2.84. Üç katlı betonarme bina modelde Hasar 5 durumuna ait deneysel mod şekilleri



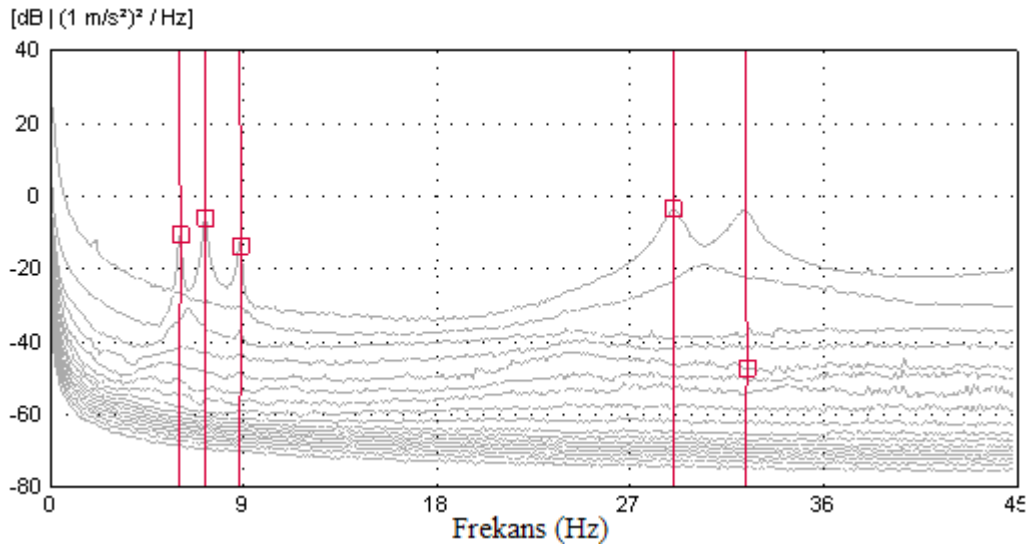
### 2.5.5.6. Hasar 6: B-1 Kolonu Üst Ucunda Kabuk Betonu Hasarı

Üç katlı bina modelinde altıncı hasar durumu olarak 1. kattaki B-1 kolonu üst ucu kabuk betonu hasarı dikkate alınmıştır. Şekil 2.85'te bu hasar durumuna ve gerçekleştirilen ölçüme ait görüntüler verilmektedir.



Şekil 2.85. Üç katlı betonarme bina modelin Hasar 6 durumu

Gerçekleştirilen ölçümlerden GFTAA yöntemiyle elde edilen hasarlı duruma ait spektral yoğunluk fonksiyonu Şekil 2.86'da verilmektedir.

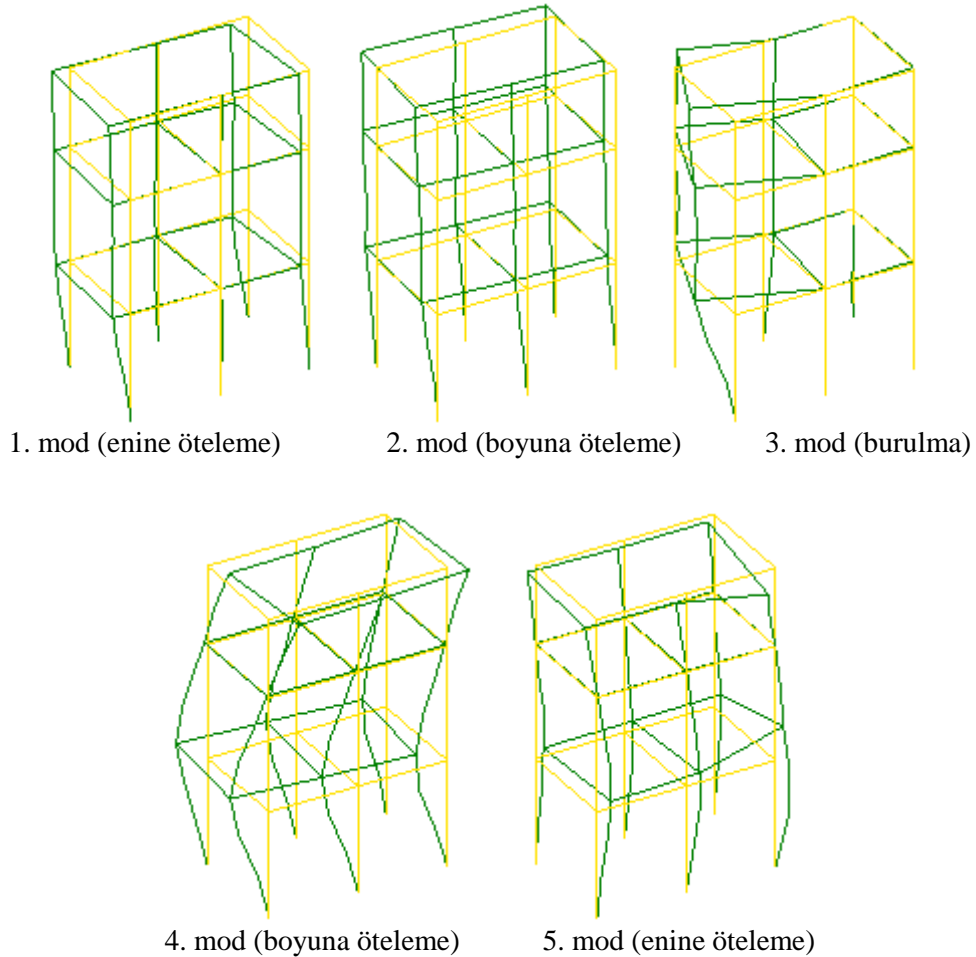


Şekil 2.86. Üç katlı betonarme bina modelin Hasar 6 durumuna ait spektral yoğunluk fonksiyonu

Spektral yoğunluk fonksiyonu kullanılarak belirlenen doğal frekanslar ve modal sönüm oranları Tablo 2.39'da, mod şekilleri ise Şekil 2.87'de verilmektedir.

Tablo 2.39. Üç katlı betonarme bina modelin Hasar 6 durumu için ölçülen doğal frekansları ve modal sönüm oranları

Mod Numarası	Doğal Frekans (Hz)	Modal Sönüm Oranı (%)
1	6.041	1.047
2	7.226	0.969
3	8.837	0.778
4	29.030	1.471
5	36.276	1.668



Şekil 2.87. Üç katlı betonarme bina modelde Hasar 6 durumuna ait deneysel mod şekilleri

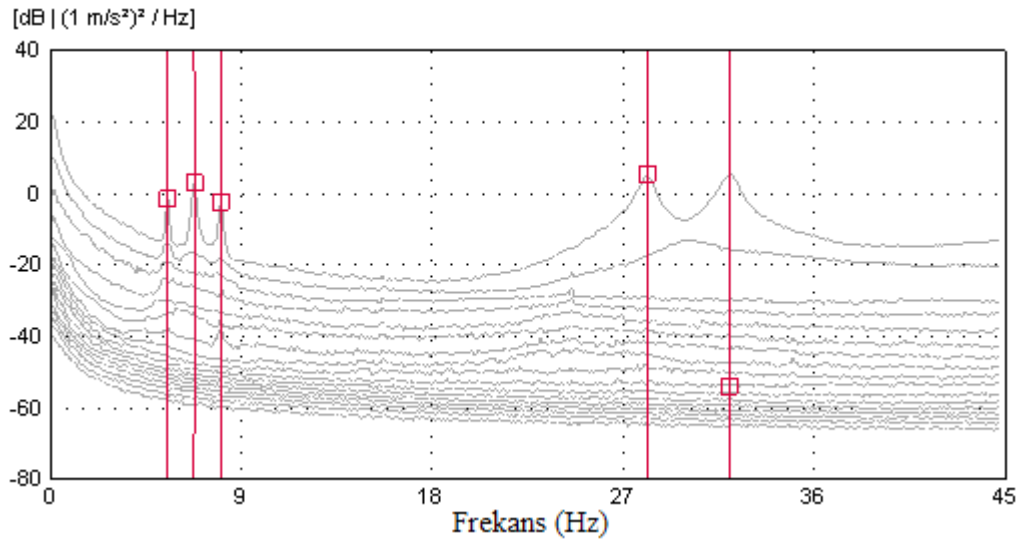
### 2.5.5.7. Hasar 7: A-1 Kolonu Üst Ucu Göbek Betonu Hasarı

Üç katlı bina modelinde son hasar durumu olarak 1. kattaki A-1 kolonu üst ucu göbek betonu hasarı dikkate alınmıştır. Şekil 2.88’de bu hasar durumuna ve gerçekleştirilen ölçüme ait görüntüler verilmektedir.



Şekil 2.88. Üç katlı betonarme bina modelde Hasar 7 durumu

Bu hasar durumu için gerçekleştirilen ölçümlerden GFTAA yöntemiyle elde edilen hasarlı duruma ait spektral yoğunluk fonksiyonu Şekil 2.89’da verilmektedir.

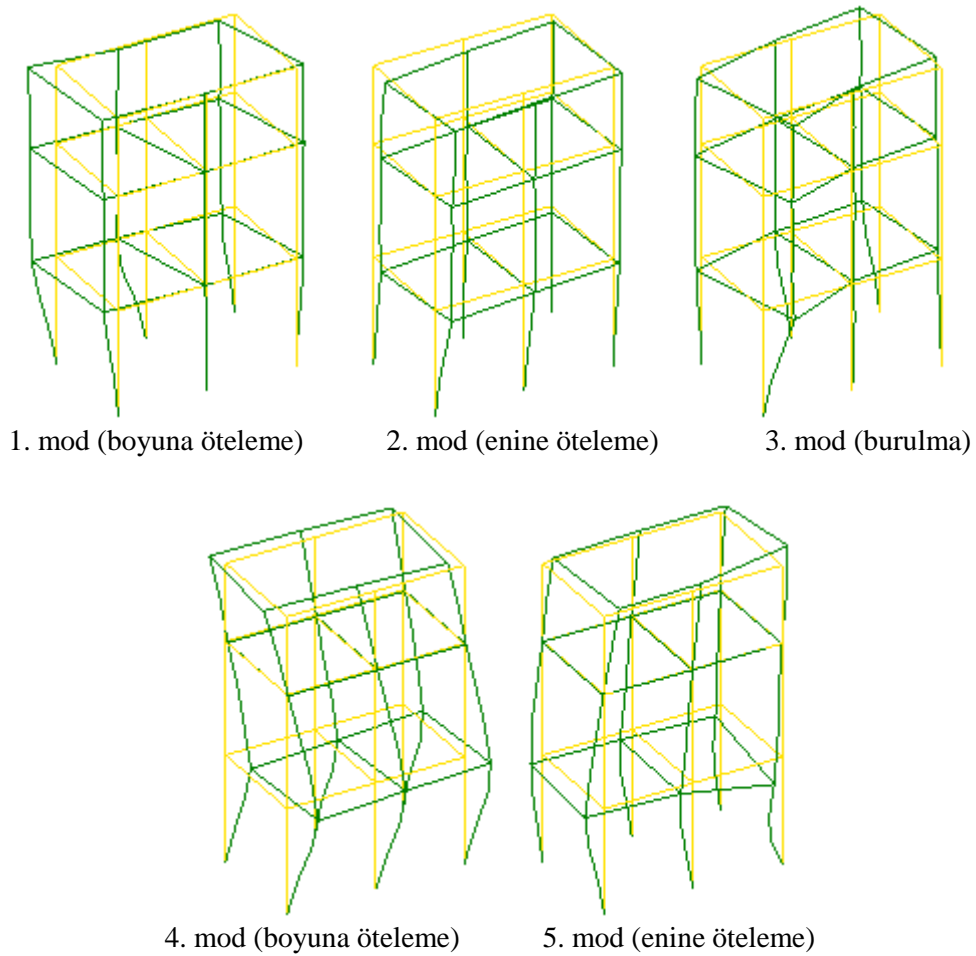


Şekil 2.89. Üç katlı betonarme bina modelin Hasar 7 durumuna ait spektral yoğunluk fonksiyonu

Hasarlı durum için elde edilen spektral yoğunluk fonksiyonu kullanılarak belirlenen doğal frekanslar ve modal sönüm oranları Tablo 2.40'da, mod şekilleri ise Şekil 2.90'da verilmektedir.

Tablo 2.40. Üç katlı betonarme bina modelin Hasar 7 durumu için ölçülen doğal frekansları ve modal sönüm oranları

Mod Numarası	Doğal Frekansı (Hz)	Modal Sönüm Oranı (%)
1	5.545	1.005
2	6.790	0.960
3	8.055	0.834
4	28.136	1.373
5	35.924	1.231

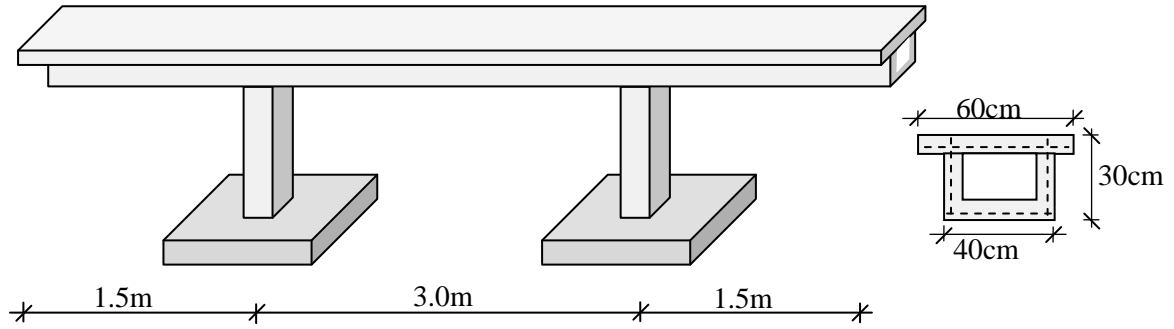


Şekil 2.90. Üç katlı betonarme bina modelde Hasar 7 durumuna ait deneysel mod şekilleri

## 2.6. Köprü Model Uygulaması

### 2.6.1. Modelin Özellikleri ve İnşası

Betonarme köprüler üzerinde hasar etkileri, bölümümüzdeki çalışma grubumuzda içi boş kesitli köprülerin dinamik davranışının belirlenmesi konusunda gerçekleştirilen doktora tez çalışması kapsamında oluşturulan köprü modeli üzerinde incelenmiştir (Altunışık, 2010). Bu köprü modeli laboratuvar ortamında oluşturulmuş olup, içi boş kesitli ve 6m uzunluğundadır. Köprü modeli sağ ve sol uçlardan 1.5m mesafede iki kolon (köprü ayağı) yardımıyla zemine bağlanmıştır. Köprü tabliyesi içi boş kesitli dikdörtgen kesite sahip olup, çeper kalınlığı 8cm'dir. Şekil 2.91'de betonarme köprü modele ait üç boyutlu görünüm ve kesit özellikleri verilmektedir.



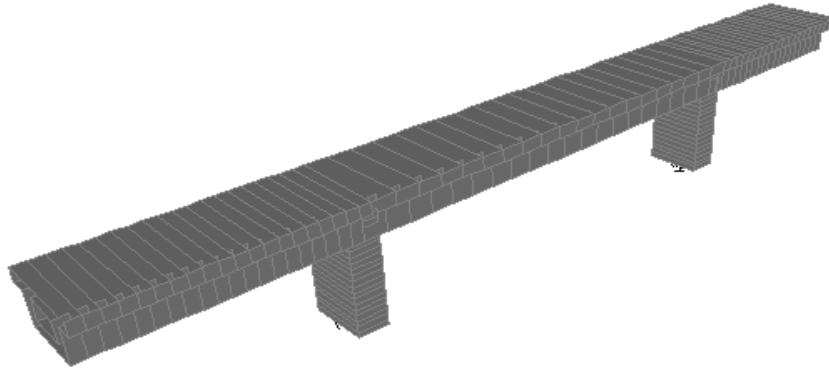
Şekil 2.91. Köprü modelinin üç boyutlu görünümü ve kesit özellikleri

### 2.6.2. Başlangıç Analitik Modelin Oluşturulması

Köprü modeli SE yöntemiyle analitik olarak modellenmiş ve modal analizi gerçekleştirilmiştir. Sistemin modellenmesinde SAP2000 programından yararlanılmıştır. Köprünün modellenmesinde, her noktasında altı serbestliği olan kiriş elemanlar kullanılmıştır. Modelin kolon ayaklarının zemine yarı rijit bağlı olduğu varsayılarak; analitik modellemede mesnetler yay elemanlar kullanılarak oluşturulmuştur. Tablo 2.41'de mesnetler için başlangıç analitik modelde tanımlanan yay sabitleri verilmektedir. Köprü modelini temsil etmek amacıyla oluşturulan analitik model Şekil 2.92'de verilmektedir.

Tablo 2.41. Köprünün başlangıç analitik modeli için yay sabitleri

		Yay Sabitleri (N/m)			
Sol Mesnet	$k_x=$	$2.0*10^9$	$r_x=$	$2.0*10^7$	
	$k_y=$	$2.0*10^9$	$r_y=$	$4.0*10^{11}$	
	$k_z=$	$4.0*10^{11}$	$r_z=$	$2.0*10^9$	
Sağ Mesnet	$k_x=$	$2.0*10^9$	$r_x=$	$2.0*10^7$	
	$k_y=$	$2.0*10^9$	$r_y=$	$4.0*10^{11}$	
	$k_z=$	$4.0*10^{11}$	$r_z=$	$2.0*10^9$	



Şekil 2.92. Köprüye ait başlangıç analitik model

Analitik modelin köprünün gerçek davranışını temsil edebilmesi amacıyla model farklı sayıda elemanlara bölünmüş ve ağ yakınsaması kontrolü yapılmıştır. Köprüye ait başlangıç analitik modelin oluşturulmasında dikkate alınan malzeme ve kesit özellikleri Tablo 2.42’de verilmektedir.

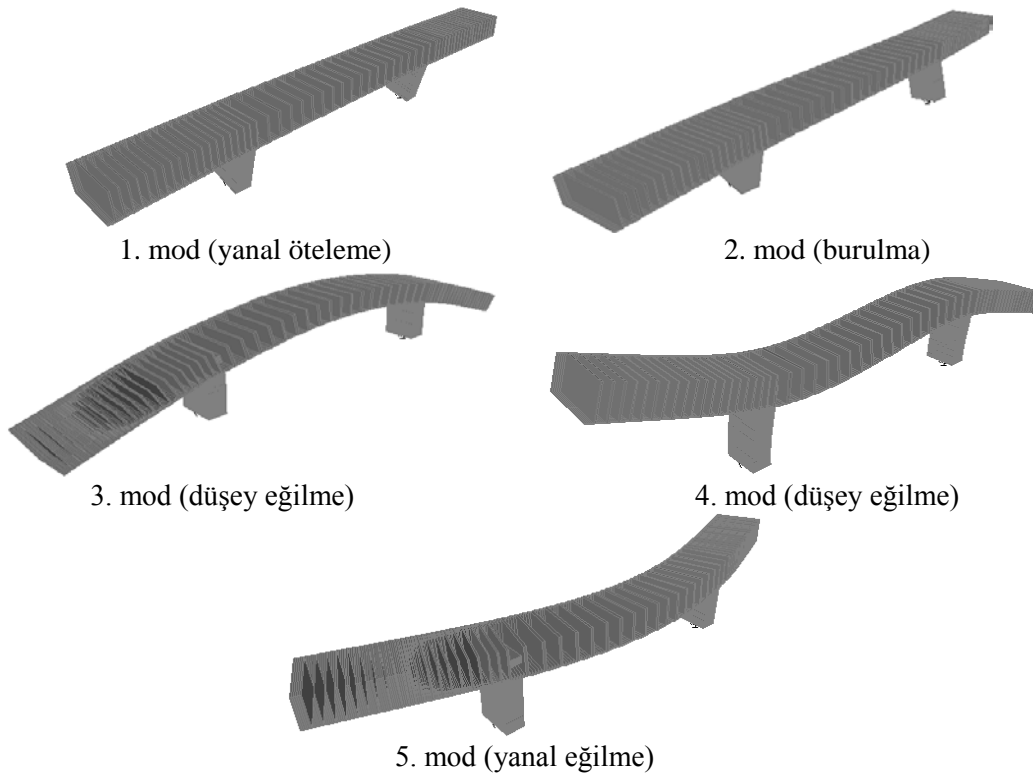
Tablo 2.42. Köprü modelin malzeme ve kesit özellikleri

		Kolonlar	Tabliye
Elastisite Modülü (N/m <sup>2</sup> )		$2.5*10^{10}$	$2.5*10^{10}$
Birim Kütle (kg/m <sup>3</sup> )		2550	2550
Kesit Alanı (m <sup>2</sup> )		$8.0*10^{-2}$	$10.38*10^{-2}$
Kesit Atalet Momenti (m <sup>4</sup> )	Birincil	$2.667*10^{-4}$	$1.023*10^{-3}$
	İkincil	$1.067*10^{-3}$	$2.519*10^{-3}$
Kayma Alanı (m <sup>2</sup> )	Birincil	$6.67*10^{-2}$	$5.12*10^{-2}$
	İkincil	$6.67*10^{-2}$	$7.85*10^{-2}$

Köprünün başlangıç analitik modeli üzerinde gerçekleştirilen modal analizden elde edilen doğal frekans değerleri Tablo 2.43’te, mod şekilleri ise Şekil 2.93’te verilmektedir.

Tablo 2.43. Köprünün başlangıç analitik modelinden elde edilen doğal frekanslar

Mod Numarası	Doğal Frekans (Hz)
1	26.035
2	31.037
3	43.050
4	43.197
5	51.399



Şekil 2.93. Köprünün başlangıç analitik modelinde elde edilen mod şekilleri

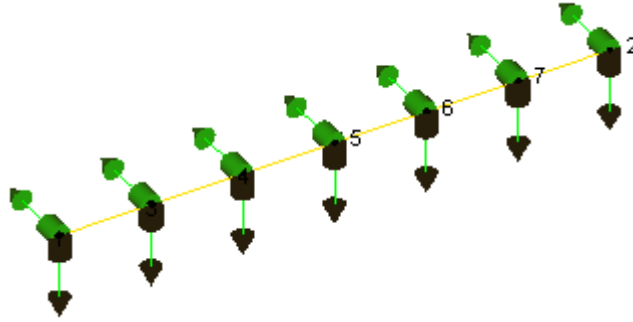
### 2.6.3. Hasarsız Durum Ölçümünün Gerçekleştirilmesi

Köprü modeli üzerindeki ölçümler çevresel titreşim şartları altında gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde toplam on dört adet tek eksenli sismik ivmeölçer kullanılmıştır. İvmeölçerler köprü tabliyesi üzerine yatay ve düşey doğrultulardaki titreşimleri ölçecek şekilde yerleştirilmiştir. İvmeölçerlerin tabliyeye bağlanmasında daha önce üç katlı betonarme modelde kullanılan bağlantı aparatlarından yararlanılmıştır. Şekil 2.94'te ivmeölçer bağlantıları ve ölçüm düzeni gösterilmektedir.



Şekil 2.94. Köprü model üzerinde ivmeölçer yerleşimi ve ölçüm düzeni

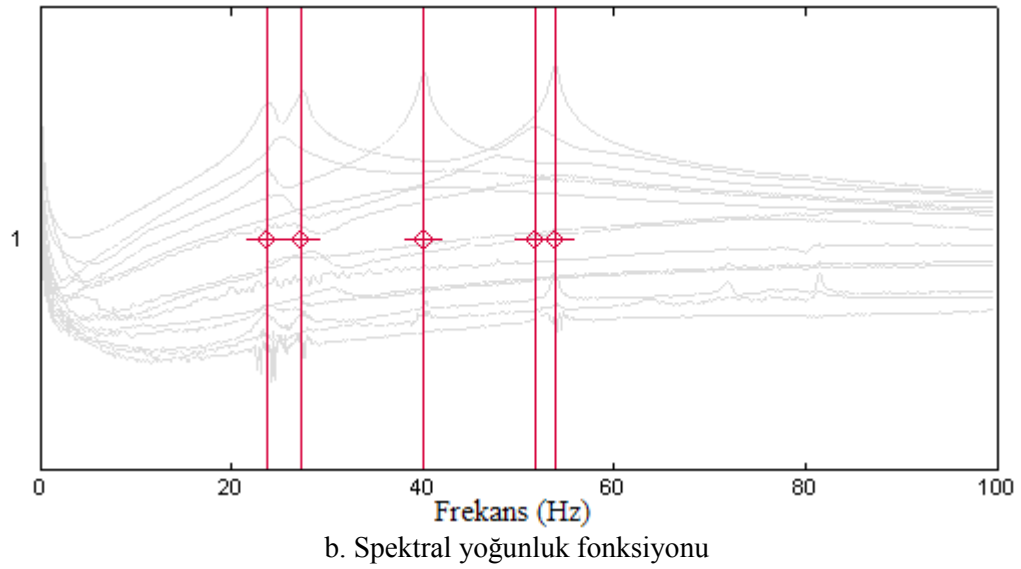
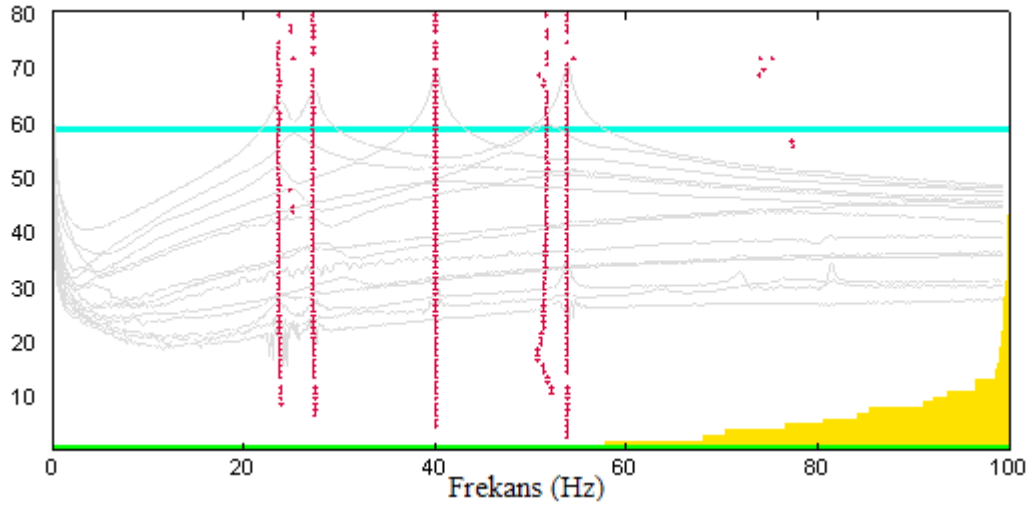
Ölçümde köprü modelin ilk beş doğal frekansının ve mod şekillerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, frekans aralığı 0-100Hz olarak seçilerek model üzerinde 10dk'lık ölçüm alınmıştır. Köprü modeli üzerindeki ölçümler için PULSE programında oluşturulan ölçüm düzeni Şekil 2.95'te verilmektedir.



Şekil 2.95. Köprü modeli üzerindeki ölçümlerde deneysel ölçüm düzeni ve ivmeölçer yönleri

Modal parametreler, köprü modeli üzerindeki ölçümde toplanan sinyallerden SAB yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Köprü modelin hasarsız durumu için elde edilen kararlılık diyagramı ve spektral yoğunluk fonksiyonu Şekil 2.96'da verilmektedir.





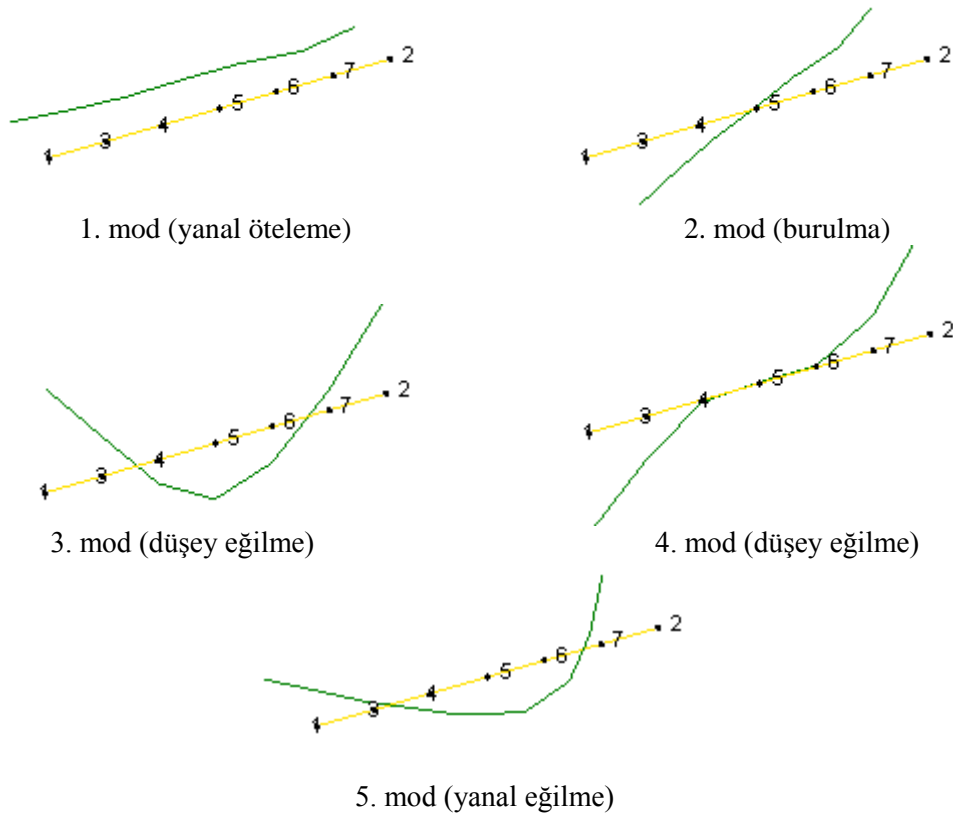
Şekil 2.96. Köprü modelin hasarsız durum için kararlılık diyagramı ve spektral yoğunluk fonksiyonu

Spektral yoğunluk fonksiyonu kullanılarak doğal frekanslar ve modal sönüm oranları belirlenmiştir. Köprü modelin hasarsız durumu için gerçekleştirilen ölçümünden elde edilen ilk beş doğal frekans değerleri ve modal sönüm oranları Tablo 2.44'te verilmektedir.

Tablo 2.44. Köprü modelin hasarsız durum için ölçülen doğal frekansları ve modal sönüm oranları

Mod Numarası	Doğal Frekans (Hz)	Modal Sönüm Oranı (%)
1	23.637	2.386
2	27.238	1.954
3	40.086	0.766
4	51.655	3.640
5	53.809	0.582

Köprü model üzerinde hasarsız durum için gerçekleştirilen ölçümlerden elde edilen ilk beş mod şekli Şekil 2.97’de verilmektedir.



Şekil 2.97. Köprü modelin hasarsız duruma ait deneysel mod şekilleri

#### 2.6.4. Analitik Modelin Kalibre Edilmesi

Köprüye ait başlangıç analitik modelin oluşturulmasında kolon ayaklarının zeminle olan bağlantısı yay elemanlar kullanılarak sağlanmıştır. Ayrıca kullanılan beton

malzemenin elastisite değerinin  $2.5 \cdot 10^{10} \text{N/m}^2$  olduğu ve malzemenin birim kütlesinin ise inşa aşamasında alınan numunelerden hesaplanan  $2550 \text{kg/m}^3$  değerinde olduğu kabul edilmiştir. Köprü modelin hasarsız durum için geręekleřtirilen ölçümünden ve başlangıç analitik modelinden elde edilen frekans değerleri ve MGK değerleri Tablo 2.45'te verilmektedir.

Tablo 2.45. Köprü modelin hasarsız durum için deneysel ve başlangıç analitik frekansları ile MGK değerleri

Mod Numarası	Doğal Frekans(Hz)			Modal Güvence Kriteri
	Deneysel Hasarsız	Analitik Başlangıç	Fark (%)	
1	23.637	26.035	10.14	0.992
2	27.238	31.037	13.95	0.995
3	40.086	43.050	7.40	0.945
4	51.655	43.197	16.37	0.950
5	53.809	51.399	4.48	0.900

Tablo 2.45'teki fark değerleri dikkate alındığında doğal frekanslarda %4.48'den %16.37'ye varan farklılıklar olduğu görülmektedir. Farklılığın bu şekilde değişim göstermesinin nedeninin mesnet birleşiminde tanımlanan yay sabitlerine bağlı olduğu varsayılarak analitik model kalibre edilmiştir. Kalibrasyon işleminde daha önceki modellere benzer şekilde doğal frekans, mod şekli ve MGK değerlerinde en fazla %1 farklılık sağlanacak şekilde kriterler ortaya konulmuştur. Bu amaç doğrultusunda mesnetler için tanımlanan yay değerlerinde %10'luk bir değişim olabileceği varsayılarak başlatılan iterasyonlar neticesinde verilen yakınsama kriteri sağlanmıştır. Başlangıç analitik modelde mesnet yaylarındaki değişim dikkate alınarak geręekleřtirilen kalibrasyon neticesinde elde edilen frekans değerleri Tablo 2.46'da verilmektedir.

Tablo 2.46. Köprü modelin deneysel ve kalibre edilmiş durum için analitik frekansları ile MGK değerleri

Mod Numarası	Doğal Frekans(Hz)			Modal Güvence Kriteri
	Deneysel Hasarsız	Analitik Kalibre	Fark (%)	
1	23.637	23.621	0.07	0.996
2	27.238	27.246	0.03	0.993
3	40.086	40.087	0.00	0.972
4	51.655	---	---	---
5	53.089	53.805	0.01	0.987

Başlangıç analitik modelin mesnetlerindeki yay sabitleri dikkate alınarak yapılan kalibrasyon işlemi sonucunda doğal frekanslar arasındaki farklılık maksimum %0.07'e kadar indirilebilmiştir. Bu durum için belirlenen yay sabitleri her iki mesnet için ayrı ayrı belirlenmiş ve Tablo 2.47'de verilmiştir.

Tablo 2.47. Köprü modelin kalibre edilmiş durum için mesnetlerdeki yay sabitleri

Yay Sabitleri (N/m)				
Sol Mesnet	$k_x=$	$2.756*10^8$	$r_x=$	$1.956*10^7$
	$k_y=$	$2.756*10^8$	$r_y=$	$3.913*10^{11}$
	$k_z=$	$3.975*10^{11}$	$r_z=$	$1.987*10^9$
Sağ Mesnet	$k_x=$	$7.606*10^7$	$r_x=$	$2.320*10^7$
	$k_y=$	$7.606*10^7$	$r_y=$	$4.640*10^{11}$
	$k_z=$	$3.905*10^{11}$	$r_z=$	$1.953*10^9$

### 2.6.5. Hasarlı Durum Ölçümlerinin Gerçekleştirilmesi

Köprü model üzerinde yeri ve yaklaşık büyüklüğü belli olan iki hasar durumu oluşturulmuştur. Bu hasar durumları,

- ✓ Kolon üst ucu hasarı
- ✓ Tabliye hasarı

olarak dikkate alınmıştır.

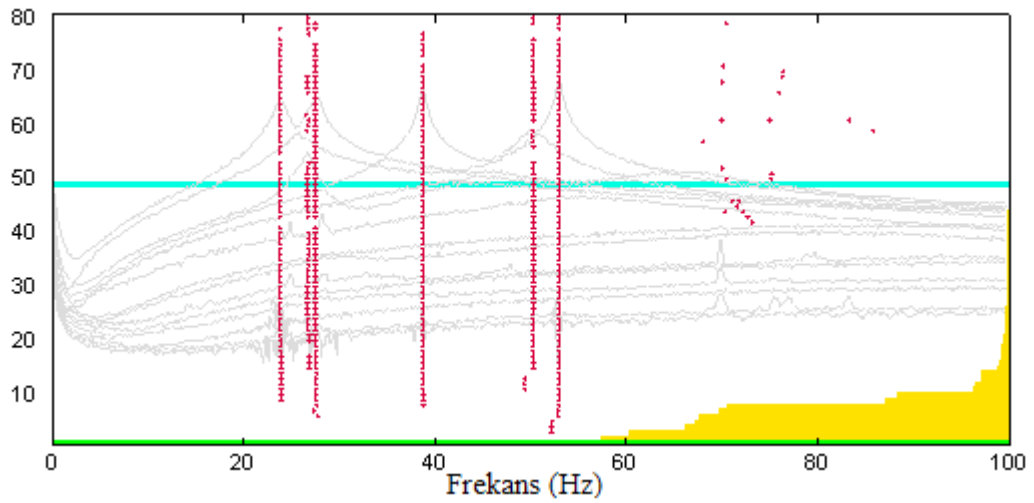
### 2.6.5.1. Kolon Üst Ucu Hasarı

Köprü modelde ilk hasar etkisi sol taraftaki kolonun üst ucunda oluşturulmuştur. Hasar etkisi olarak kolon üst ucunda kesit azalması durumu dikkate alınmış ve bu kesit kırıcı matkap yardımıyla zayıflatılmıştır. Şekil 2.98’de bu hasar durumuna ait görüntüler verilmektedir.



Şekil 2.98. Köprü modelde kolon üst ucu hasarı

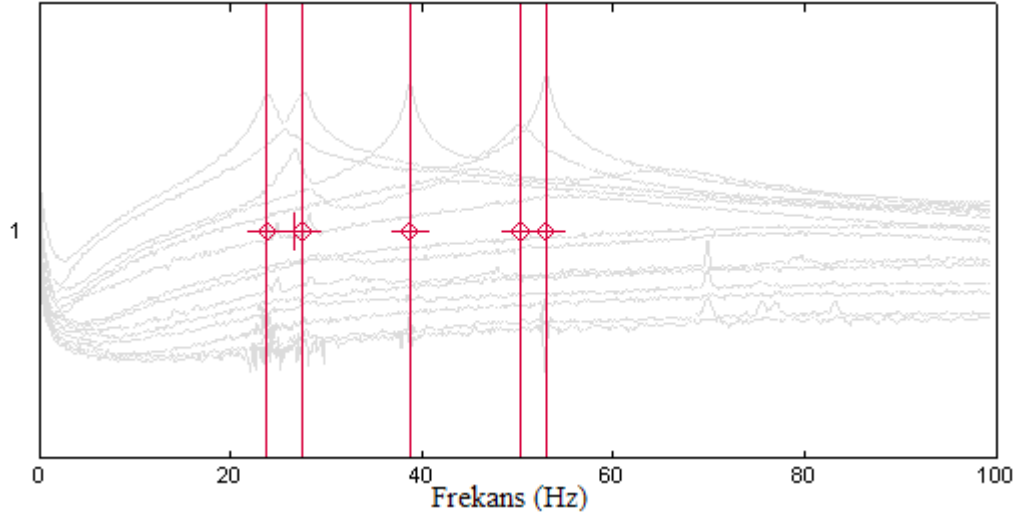
Çevresel titreşim şartları altında gerçekleştirilen ölçümden bu hasar durumu için elde edilen veriler SAB yöntemiyle değerlendirilmiştir. Bu hasar durumuna ait kararlılık diyagramı ile spektral yoğunluk fonksiyonları Şekil 2.99’da verilmektedir.



a. Kararlılık diyagramı

Şekil 2.99. Köprü modelde kolon üst ucu hasarı için kararlılık diyagramı ve spektral yoğunluk fonksiyonları

Şekil 2.99'un devamı

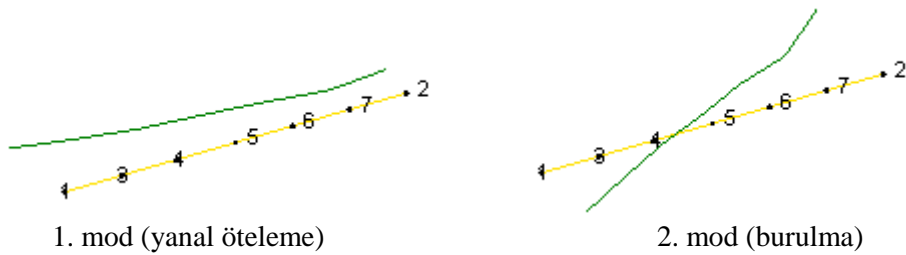


b. Spektral yoğunluk fonksiyonları

Köprü modelde kolon üst ucu hasarı için elde edilen doğal frekanslar ve modal sönüm oranı değerleri Tablo 2.48'de ve bu modlara ait mod şekilleri Şekil 2.100'de verilmektedir.

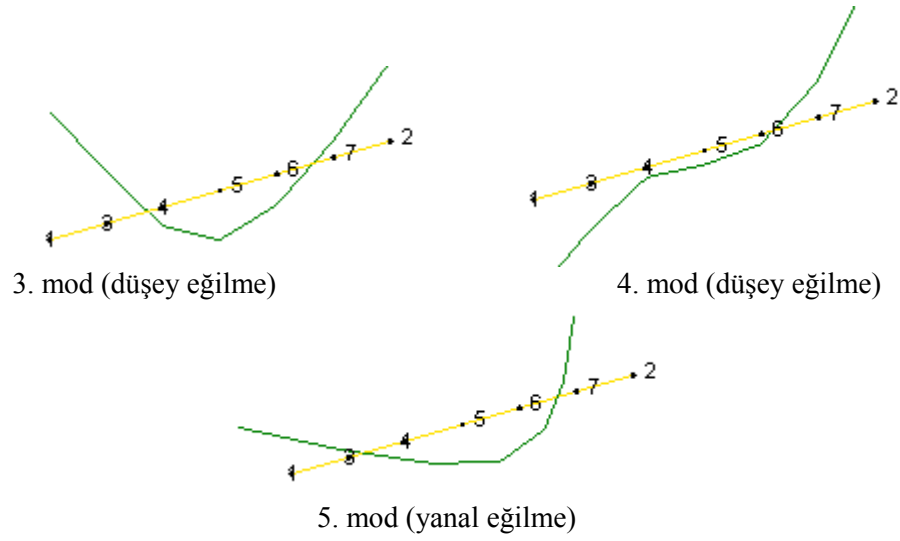
Tablo 2.48. Köprü modelin kolon üst ucu hasarı için ölçülen doğal frekansları ve modal sönüm oranları

Mod Numarası	Doğal Frekans (Hz)	Modal Sönüm Oranı (%)
1	23.809	2.248
2	27.502	1.880
3	38.727	0.705
4	50.304	2.821
5	52.972	0.558



Şekil 2.100. Köprü modelin kolon üst ucu hasarı durumu için mod şekilleri

Şekil 2.100'ün devamı



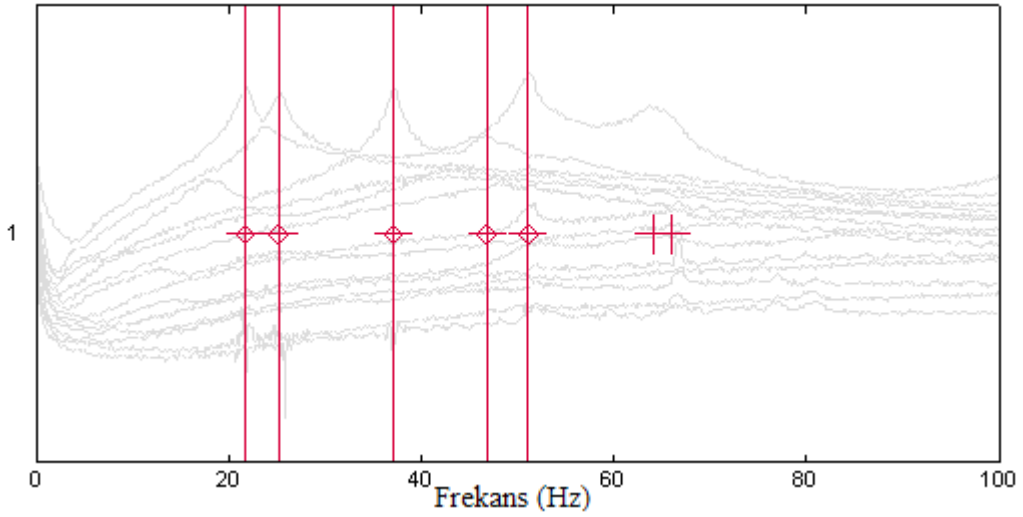
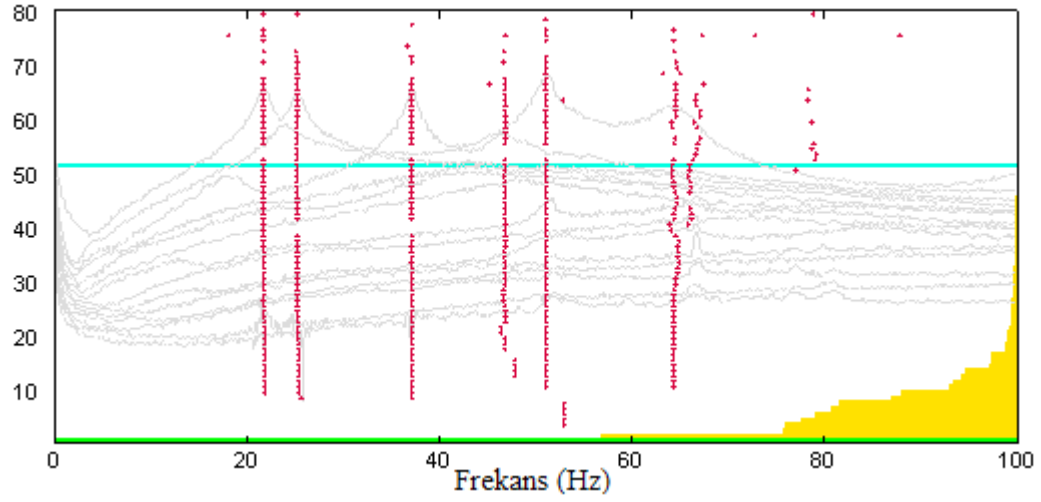
### 2.6.5.2. Tabliye Hasarı

Köprü modelinde ikinci hasar etkisi olarak hasar verilen kolonun tabliye ile birleştiği bölgede tabliyenin enine doğrultuda tamamen çatladığı varsayılmıştır. Bu hasar etkisini oluşturabilmek için tabliye bu kesit boyunca belirli aralıklarla matkap yardımıyla delinmiş ve çelik balyozla konsol kısma vurularak hasar oluşturulmuştur. Şekil 2.101'de tabliye hasarına ait görüntüler verilmektedir.



Şekil 2.101. Köprü modelde tabliye hasarı durumu

Bu hasar durumu için gerçekleştirilen ölçümden SAB yöntemiyle elde edilen kararlılık diyagramı ve spektral yoğunluk fonksiyonları Şekil 2.102'de verilmektedir.



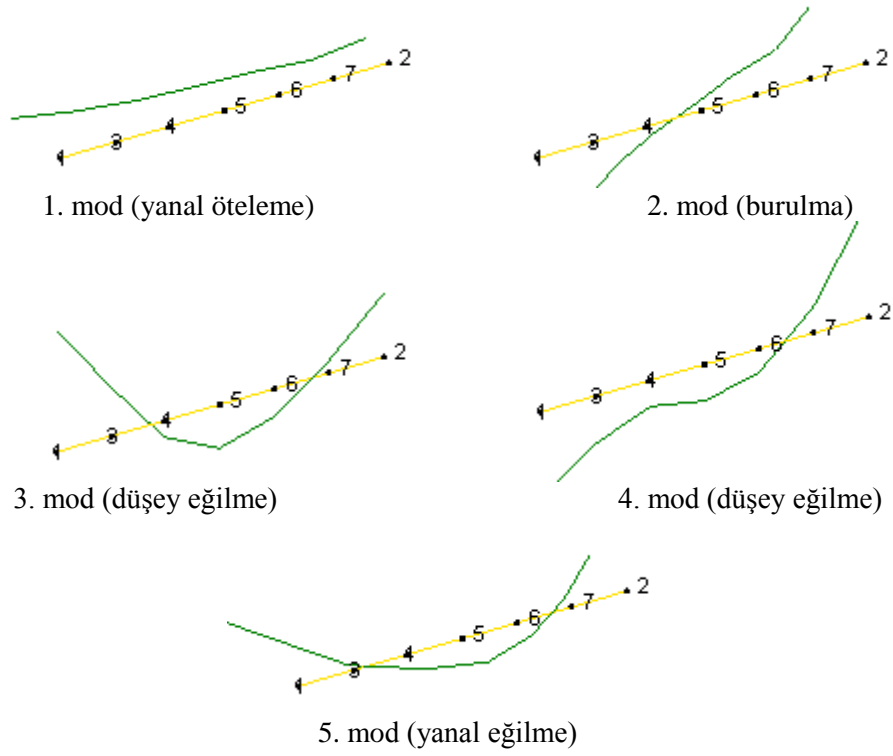
Şekil 2.102. Köprü modelin tabliye hasarlı durumuna ait kararlılık diyagramı ve spektral yoğunluk fonksiyonları

Köprü tabliyesi hasarı için elde edilen doğal frekans değerleri ve modal sönüm oranları Tablo 2.49'da ve bu modlara ait mod şekilleri Şekil 2.103'te verilmektedir.

Tablo 2.49. Köprü modelde tabliye hasarı için doğal frekanslar ve modal sönüm oranları

Mod Numarası	Doğal Frekans (Hz)	Modal Sönüm Oranı (%)
1	21.716	2.363
2	25.181	2.232
3	37.127	0.967
4	46.830	4.353
5	51.091	1.071



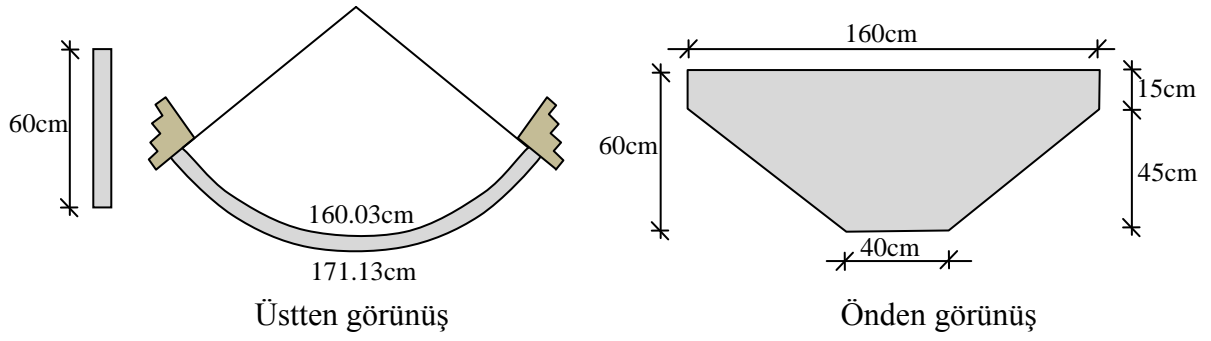


Şekil 2.103. Köprü modelde tabliye hasarı için mod şekilleri

## 2.7. Baraj Model Uygulaması

### 2.7.1. Modelin Özellikleri ve İnşası

Beton barajlar üzerinde hasar etkileri, bölümümüzdeki çalışma grubumuzda kemer barajların dinamik davranışının belirlenmesi konusunda gerçekleştirilen doktora tez çalışması kapsamında oluşturulan kemer baraj modeli üzerinde incelenmiştir (Sevim, 2010). Laboratuvar ortamında ölçekli olarak oluşturulan model tek eğriliklidir. Bu baraj modeli üzerinde hasarsız ve hasarlı durumlar için ölçümler gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.104'te oluşturulan baraj modele ait boyut bilgileri verilmektedir.



Şekil 2.104. Baraj modelinin üstten ve önden görünüşleri ile boyutları

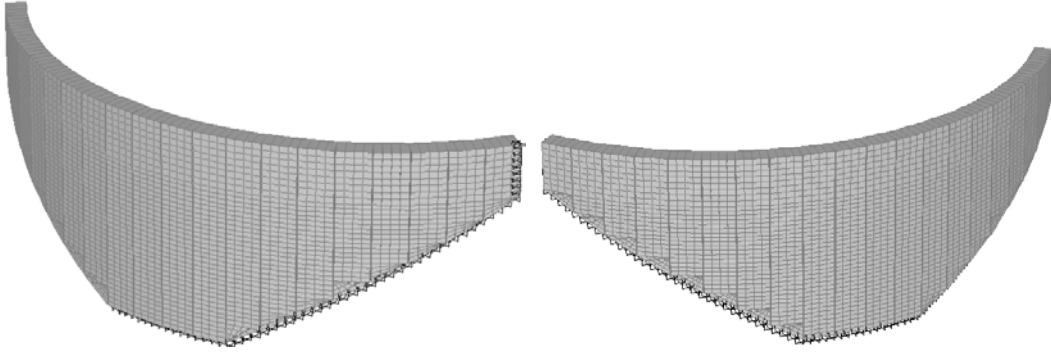
Gövde kalınlığı 6cm olarak seçilen baraj modelin inşa edilmiş durumuna ait görüntüler Şekil 2.105’te verilmektedir.



Şekil 2.105. Laboratuarda oluşturulan baraj modelinin üstten ve önden görünüşleri

### 2.7.2. Başlangıç Analitik Modelin Oluşturulması

Baraj modeli SAP2000 programı kullanılarak SE yöntemiyle analitik olarak modellenmiş ve modal analizi gerçekleştirilmiştir. Baraj modeline ait analitik modelin oluşturulmasında katı elemanlardan yararlanılmıştır. Model, yan yüzeylerinin tamamen tutulu olduğu varsayılarak mesnetlenmiştir. Baraj modelini temsil etmek amacıyla oluşturulan analitik model Şekil 2.106’da verilmektedir.



Şekil 2.106. Barajın başlangıç analitik modeli

Analitik modelin barajın gerçek davranışını temsil edebilmesi için baraj gövdesi Şekil 2.106'da gösterilen biçimde düzgün olarak elemanlara bölünmüştür. Barajın başlangıç analitik modelinin oluşturulmasında dikkate alınan malzeme özellikleri Tablo 2.50'de verilmektedir.

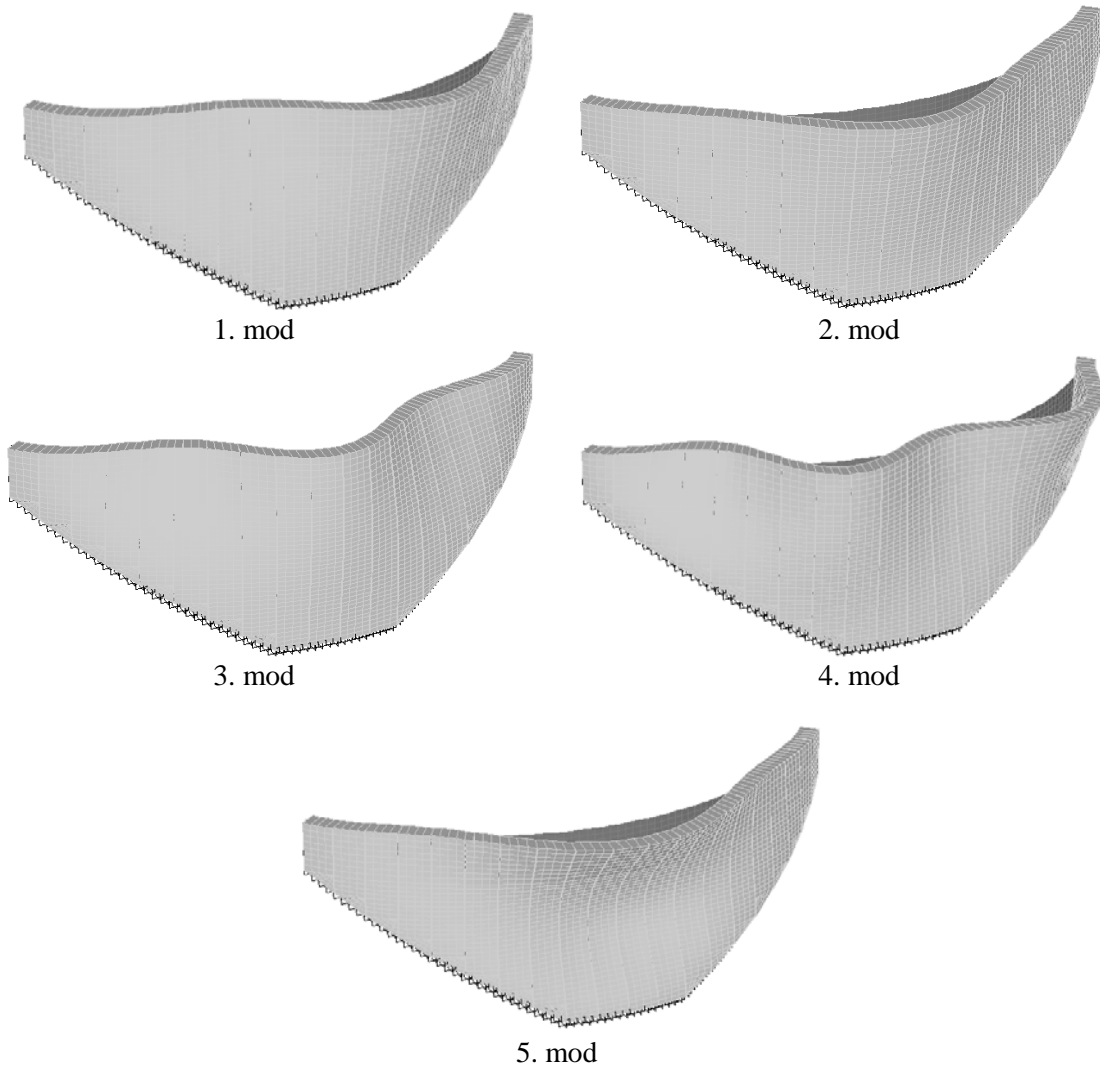
Tablo 2.50. Barajın başlangıç analitik modelde kullanılan malzeme özellikleri

	Gövde
Elastisite Modülü (N/m <sup>2</sup> )	2.8*10 <sup>10</sup>
Birim Kütle (kg/m <sup>3</sup> )	2300

Barajın başlangıç analitik modelinin modal analizden elde edilen ilk beş doğal frekans değeri Tablo 2.51'de, mod şekilleri ise Şekil 2.107'de verilmektedir.

Tablo 2.51. Barajın başlangıç analitik modelinden elde edilen doğal frekansları

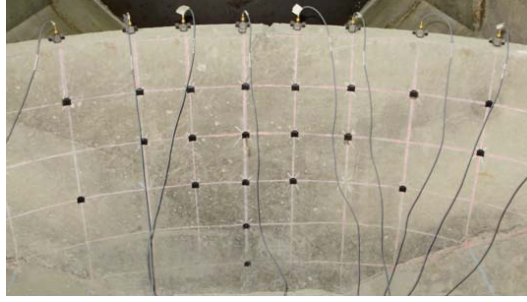
Mod Numarası	Doğal Frekans (Hz)
1	423.09
2	432.92
3	594.46
4	730.43
5	867.64



Şekil 2.107. Barajın başlangıç analitik modeline ait mod şekilleri

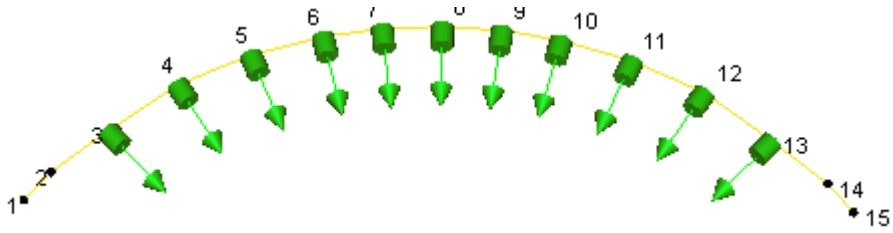
### 2.7.3. Hasarsız Durum Ölçümünün Gerçekleştirilmesi

Baraj modeli üzerindeki ölçüm çevresel titreşim şartları altında gerçekleştirilmiştir. Ölçümde toplam on bir adet tek eksenli ivmeölçer kullanılmıştır. İvmeölçerler kemer kısmının en üst kotuna yani kret seviyesine bağlanmıştır. Şekil 2.108'de ivmeölçer bağlantıları ve ölçüm düzeni gösterilmektedir.



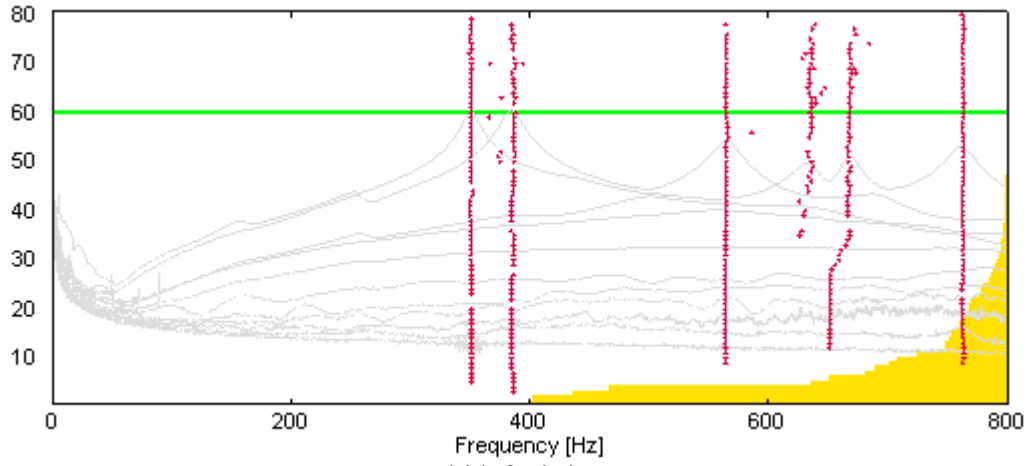
Şekil 2.108. Baraj modeli üzerinde deneysel ölçüm düzeni ve ivmeölçer yerleşimi

Ölçümde baraj modeline ait ilk beş frekans değerinin ve mod şekillerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla gerçekleştirilen ölçümde frekans aralığı 0-800Hz olarak seçilmiş ve toplam 10dk'lık bir ölçüm alınmıştır. Baraj modeli üzerinde gerçekleştirilen ölçümde kullanılan ölçüm düzeni Şekil 2.109'da verilmektedir.

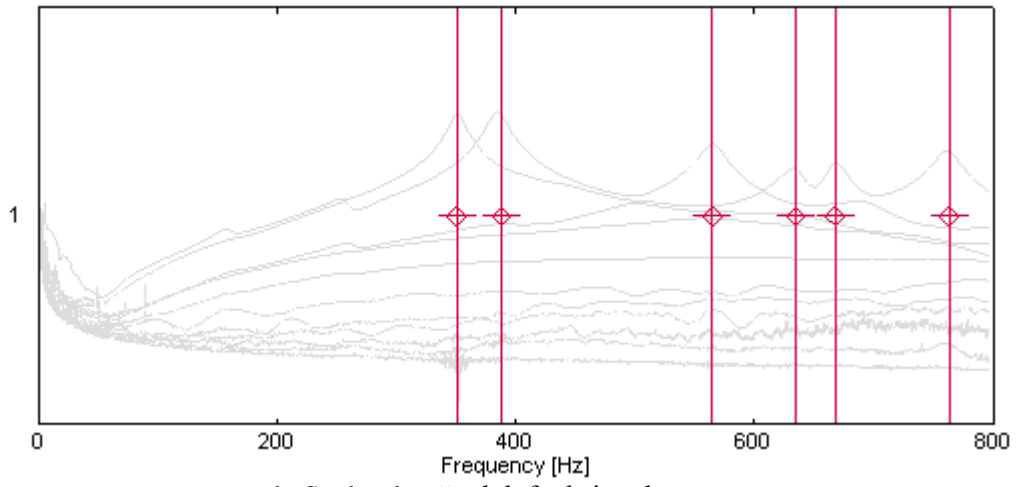


Şekil 2.109. Baraj model ölçümünde kullanılan deneysel ölçüm düzeni

Baraj modelin modal parametreleri SAB yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Barajın hasarsız durumu için gerçekleştirilen ölçümden elde edilen karalılık diyagramı ve spektral yoğunluk fonksiyonları Şekil 2.110'da verilmektedir.



a. Kararlılık fonksiyonu



b. Spektral yoğunluk fonksiyonları

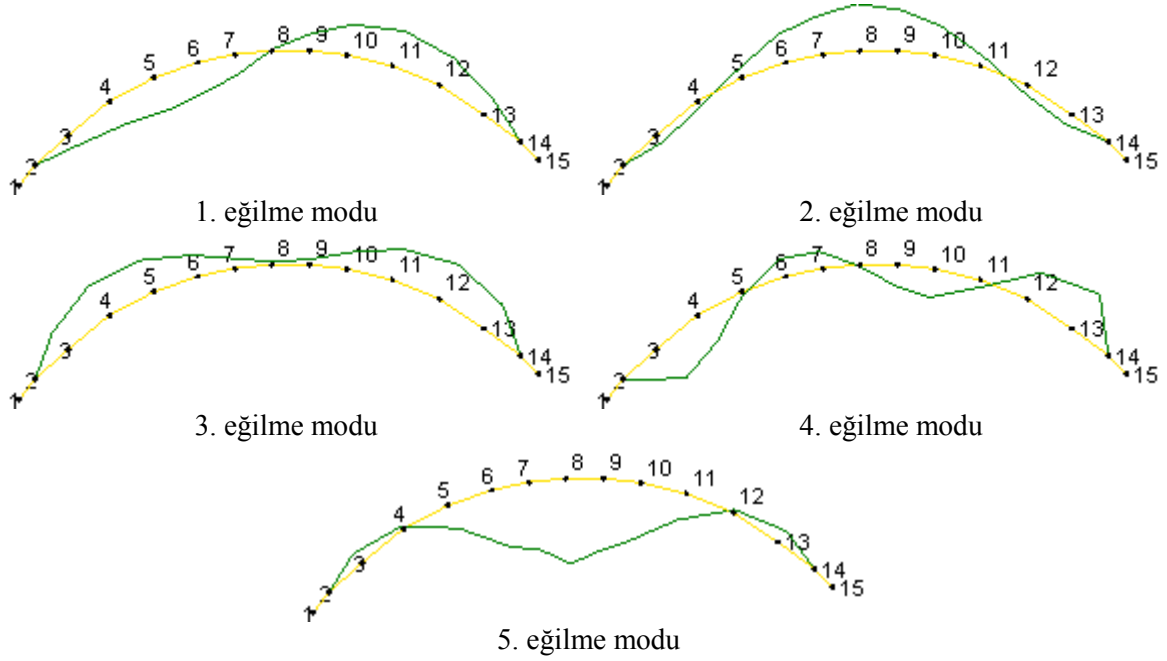
Şekil 2.110. Baraj modelin hasarsız durumu için kararlılık diyagramı ve spektral yoğunluk fonksiyonları

Spektral yoğunluk fonksiyonlarından doğal frekanslar ve modal sönüm oranları belirlenmiştir. Baraj modelin hasarsız durumu için gerçekleştirilen ölçümden elde edilen ilk beş doğal frekans değeri ve modal sönüm oranları Tablo 2.52’de verilmektedir.

Tablo 2.52. Barajın hasarsız durum için ölçülen doğal frekansları ve modal sönüm oranları

Mod Numarası	Doğal Frekans (Hz)	Modal Sönüm Oranı (%)
1	315.1	1.442
2	341.3	1.538
3	501.9	1.119
4	573.1	0.961
5	683.1	1.482

Baraj model üzerinde hasarsız durum için gerçekleştirilen ölçümden elde edilen mod şekilleri Şekil 2.111’de verilmektedir.



Şekil 2.111. Barajın hasarsız durum ölçümlerinden elde edilen mod şekilleri

#### 2.7.4. Analitik Modelin Kalibre Edilmesi

Barajın başlangıç analitik modelinin oluşturulmasında gövde kısmı tamamen ankastre mesnetli ve kullanılan malzemenin elastisite değeri  $2.8 \cdot 10^{10} \text{N/m}^2$  olarak dikkate alınmıştır. Barajın hasarsız durumu için gerçekleştirilen ölçümden ve başlangıç analitik modelinden elde edilen frekans değerleri ve MGK değerleri Tablo 2.53’te verilmektedir.

Tablo 2.53. Baraj modelin hasarsız durumu için deneysel ve başlangıç analitik frekansları ile MGK değerleri

Mod Numarası	Doğal Frekansı(Hz)			Modal Güvence Kriteri
	Hasarsız Deneysel	Analitik Başlangıç	Fark (%)	
1	315.1	423.09	34.27	0.995
2	341.3	432.92	26.85	0.937
3	501.9	594.46	18.44	0.949
4	573.1	730.43	27.45	0.988
5	683.1	867.64	27.02	---

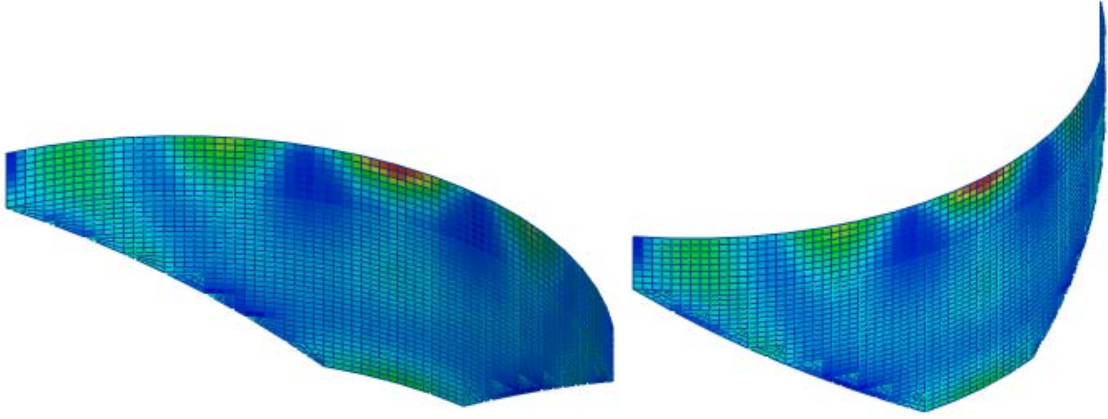
Baraja ait analitik modelden elde edilen frekansların deneysel frekanslardan oldukça farklı olduğu ve frekanslar arasındaki farklılığın %34.27'lere varan değerlere ulaştığı görülmektedir. Oluşturulan baraj modelinde elastisite değeri değişken olarak seçilip model kalibrasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Başlangıç modelin kalibre edilmesinde doğal frekans, mod şekli ve MGK değerlerinde en fazla %1 farklılık sağlanacak şekilde kriterler ortaya konulmuştur. Seçilen hedef doğrultusunda elastisite değerinde %10'luk bir değişim olabileceği varsayılarak başlatılan iterasyonlar neticesinde verilen yakınsama kriteri sağlanmış ve seçilen elastisite değeri için doğal frekanslar ve mod şekilleri hesaplanmıştır. Başlangıç analitik modelin kalibrasyonu neticesinde elde edilen frekans değerleri Tablo 2.54'te verilmektedir.

Tablo 2.54. Baraj modelin kalibre edilmiş durumu için doğal frekansları

Mod Numarası	Doğal Frekansı(Hz)		
	Hasarsız Deneysel	Analitik Kalibre	Fark (%)
1	315.1	315.09	0.00
2	341.3	341.27	0.01
3	501.9	501.86	0.01
4	573.1	573.08	0.00
5	683.1	683.07	0.00

Başlangıç analitik modelin kalibre edilmesi sonucunda frekanslar arasındaki fark %0.01'lara kadar indirilebilmiştir. Elastisite değerindeki değişim dikkate alınarak gerçekleştirilen analitik model kalibrasyonu işlemi sonrasında baraj gövdesindeki her bir eleman için elastisite değerlerindeki değişim Şekil 2.112'de verilmektedir.

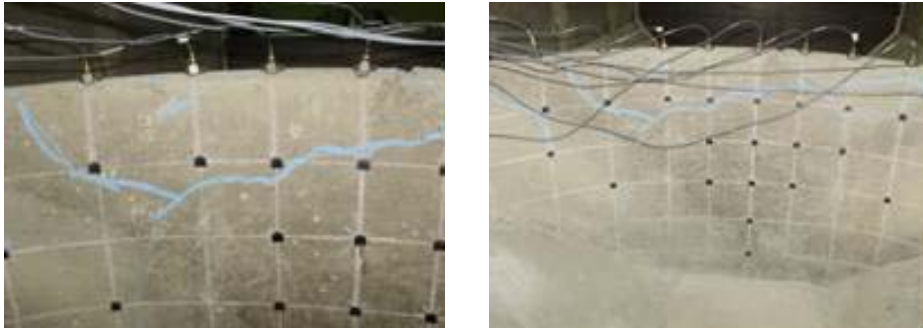




Şekil 2.112. Baraj modelinde analitik model kalibrasyonundan sonra elastisite değerinin değişimi

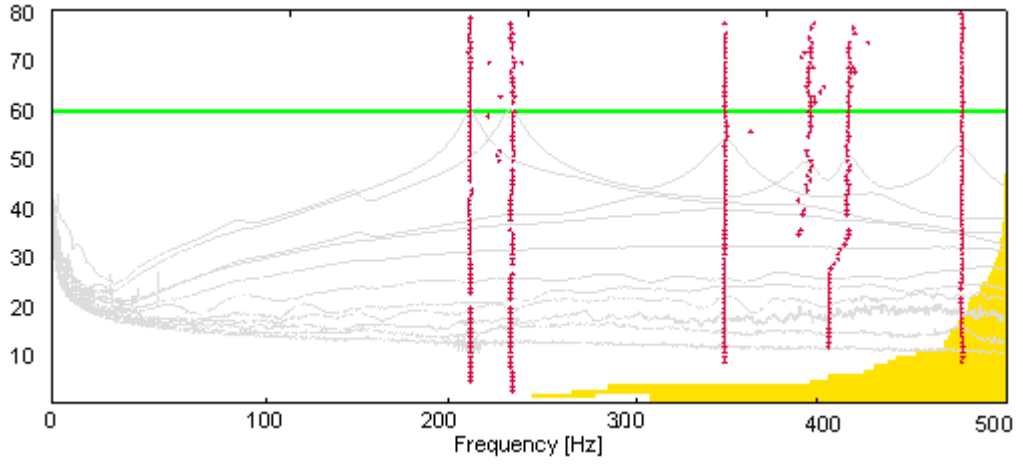
### 2.7.5. Hasarlı Durum Ölçümünün Gerçekleştirilmesi

Baraj model üzerinde, kretin orta kısımlarında rastgele vurulan balyoz darbeleriyle yeri ve büyüklüğü belirsiz hasarlar oluşturulmuştur. Şekil 2.113'te bu hasar durumuna ait görüntüler verilmektedir.

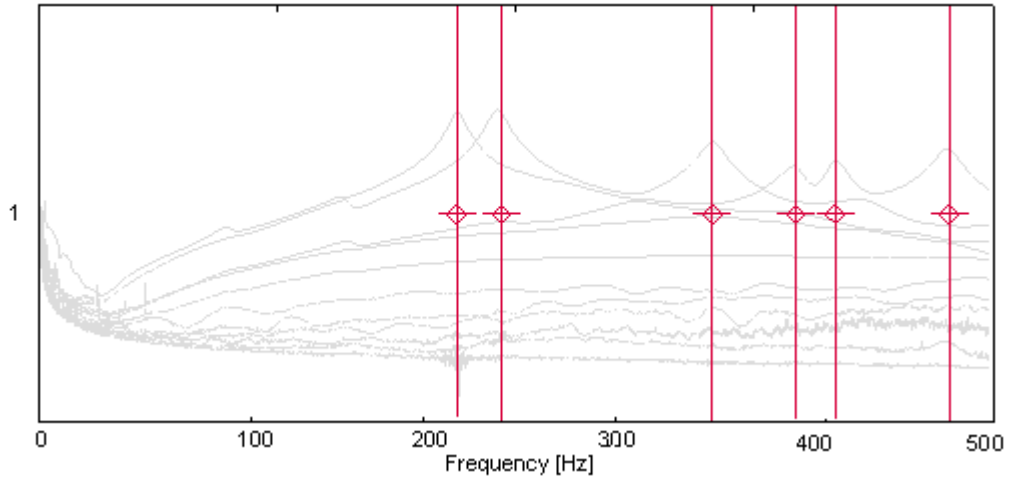


Şekil 2.113. Baraj modelde hasar dağılımı

Bu hasar durumu için çevresel titreşim şartları altında gerçekleştirilen ölçümden elde edilen veriler SAB yöntemiyle değerlendirilmiştir. Elde edilen kararlılık diyagramı ve spektral yoğunluk fonksiyonları Şekil 2.114'te verilmektedir.



a. Kararlılık fonksiyonu



b. Spektral yoğunluk fonksiyonları

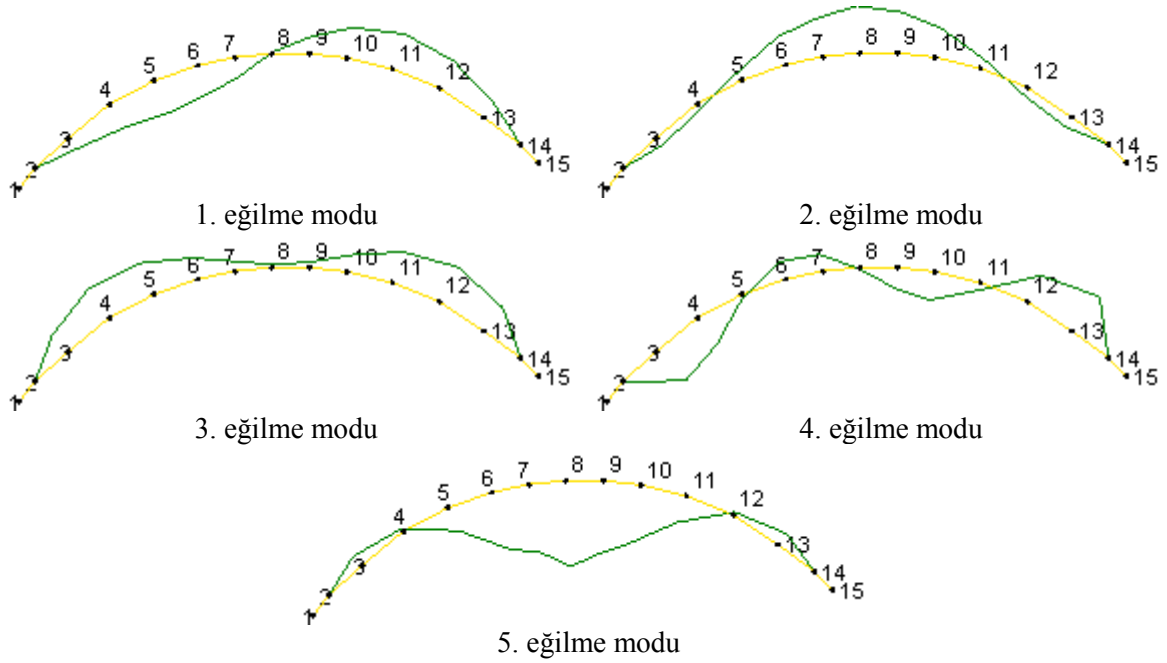
Şekil 2.114. Baraj modelin hasarlı durum için kararlılık diyagramı ve spektral yoğunluk fonksiyonları

Spektral yoğunluk fonksiyonları kullanılarak doğal frekanslar ve modal sönüm oranları belirlenmiştir. Baraj modelin hasarlı durumu için ölçümden elde edilen ilk beş doğal frekans değeri ve modal sönüm oranları Tablo 2.55'te verilmektedir.

Tablo 2.55. Baraj modelde hasarlı durum için ölçülen doğal frekanslar ve modal sönüm oranları

Mod Numarası	Doğal Frekansı (Hz)	Modal Sönüm Oranı (%)
1	211.30	1.047
2	223.70	1.497
3	293.80	1.644
4	374.70	1.355
5	410.40	1.406

Baraj model üzerinde hasarlı durum için gerçekleştirilen ölçümlerden elde edilen ilk beş mod şekli Şekil 2.115'te verilmektedir.



Şekil 2.115. Barajın hasarlı durum ölçümlerinden elde edilen mod şekilleri

### 3. BULGULAR VE İRDELEMELER

Bu bölümde, hasarlı durumlar için çevresel titreşim altında deneysel ölçümleri gerçekleştirilen çelik konsol kiriş ve iki boyutlu çerçeve modeller ile betonarme tek katlı bina, üç katlı bina, köprü ve baraj modelleri üzerinde hasar tespiti ve değerlendirmesi yapılmıştır. Hasar tespit ve değerlendirme işlemi önerilen yaklaşım kullanılarak her bir model için kalibre edilmiş analitik doğal frekanslar ve mod şekilleri ile hasarlı duruma ait doğal frekanslar ve mod şekilleri birlikte değerlendirilip gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, ilk olarak yapıda hasar olup olmadığına karar verilmiş, sonrasında hasar durumları için olası hasar yerleri belirlenmiş ve son olarak belirlenen hasar durumunun yapı davranışına etkisi statik analizler yapılarak ortaya konulmuştur.

#### 3.1. Konsol Kiriş Modelin Hasar Durumunun Değerlendirilmesi

##### 3.1.1. Hasar Varlığının Belirlenmesi

Konsol kiriş model üzerinde, testere kullanılarak yeri ve yaklaşık büyüklüğü bilinen hasar etkisi için ölçümler yapılmıştır. Hasar değerlendirme işleminde, öncelikle hasarlı durum için gerçekleştirilen ölçümden elde edilen sonuçlar ile kalibre edilmiş analitik sonuçlar karşılaştırılarak hasarın varlığı belirlenmeye çalışılmıştır. Konsol kiriş model için hasarlı duruma ait deneysel frekanslar ile kalibre edilmiş analitik frekanslar ve MGK değerleri Tablo 3.1’de verilmektedir.

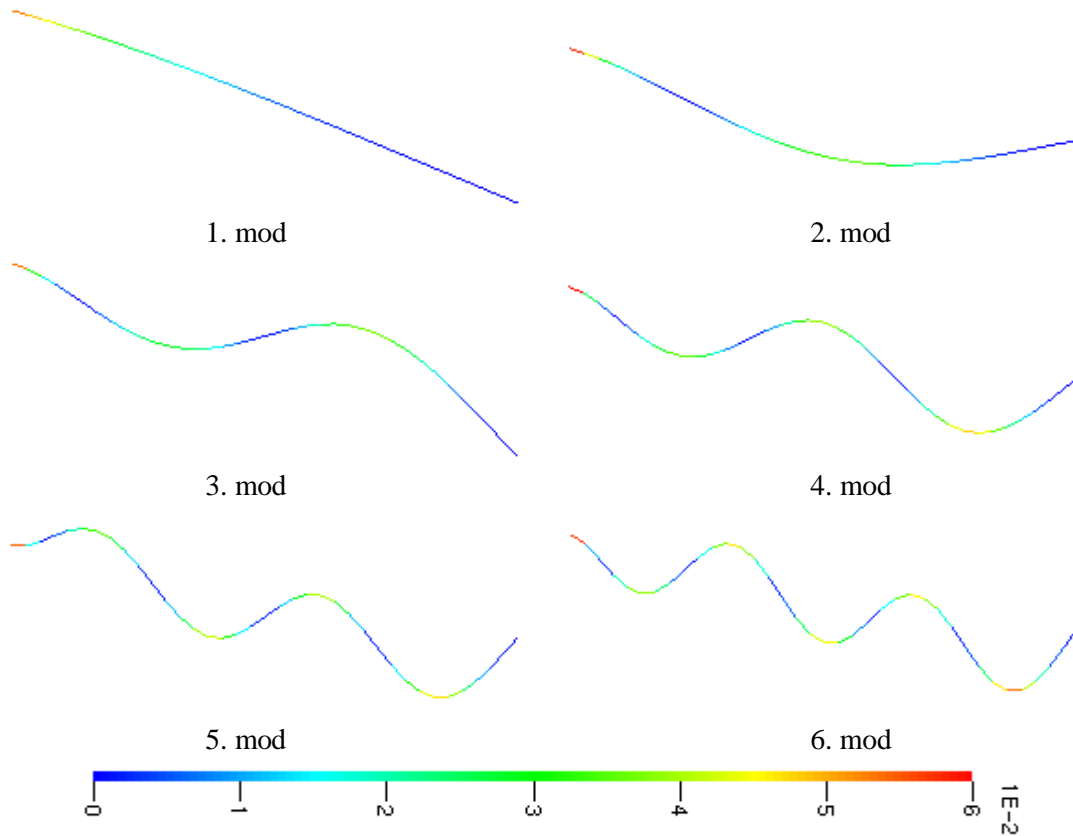
Tablo 3.1. Konsol kiriş model için hasarlı duruma ait deneysel ve kalibre edilmiş analitik frekanslar ile MGK değerleri

Mod Numarası	Doğal Frekansı(Hz)			Modal Güvence Kriteri
	Deneysel Hasarlı	Analitik Kalibre	Fark (%)	
1	9.752	9.774	0.23	1.000
2	60.195	61.201	1.67	0.999
3	170.35	171.23	0.51	0.996
4	333.54	335.27	0.52	0.997
5	546.04	553.78	1.42	0.991
6	821.01	826.56	0.68	0.993

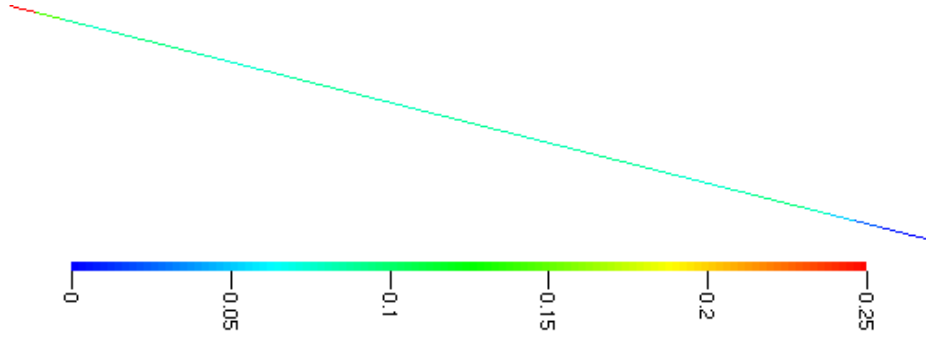
Tablo 3.1'den, hasarlı durumda deneysel ve analitik frekanslar arasındaki farkların hasarsız duruma göre arttığı, özellikle de ikinci ve beşinci modlarda farkların %1.4'ten daha büyük değerler aldığı görülmektedir. Doğal frekanslardaki bu farklılıklar, konsol kiriş modelde bazı değişikliklerin olduğu anlamına gelmekte yani hasarın varlığına işaret etmektedir.

### 3.1.2. Hasar Yerinin Belirlenmesi

Konsol kiriş modelde hasar yerinin tahmin edilebilmesi amacıyla, kalibre edilmiş analitik model üzerinde kesit atalet değeri değişken alınarak güncellenme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, birçok parçaya bölünen konsol kiriş modelin elemanlarında tanımlı kesti atalet değerine değişim verilerek doğal frekanslar ve mod şekilleri arasındaki farkın en aza indirgenmesi sağlanmıştır. Bunun için, öncelikle seçilen değişkenin amaç fonksiyonu üzerindeki etkinliğinin göstergesi olan duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Konsol kiriş model için kesit ataletinin her bir mod üzerindeki etkisi Şekil 3.1'de, toplam modal davranış üzerindeki etkisi Şekil 3.2'de verilmektedir.

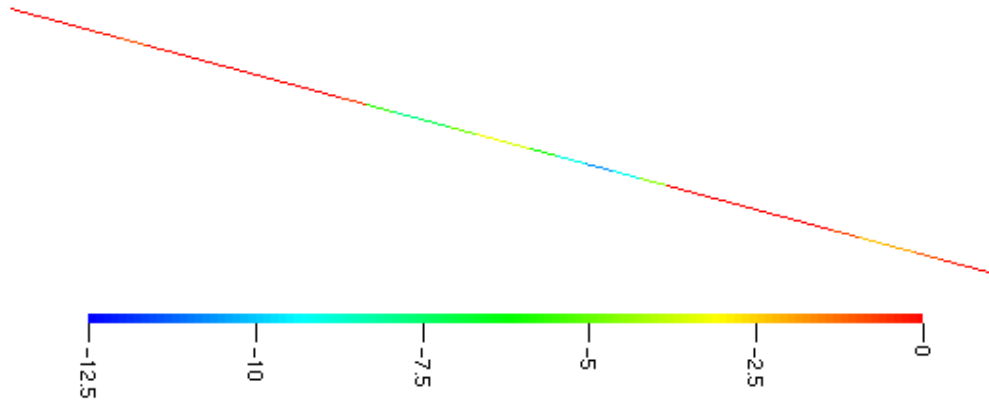


Şekil 3.1. Konsol kiriş modelde kesit ataletinin her bir mod üzerindeki etkisi



Şekil 3.2. Konsol kiriş modelde kesit ataletinin toplam modal davranış üzerindeki etkisi

Konsol kiriş modelde, kriterler kesit atalet değerindeki değişim dikkate alınarak frekanslar ve mod şekilleri arasındaki farklılıklar %1 düzeyinde olacak şekilde belirlenmiştir. Kesit atalet değerinde %25'lik bir değişim olabileceği varsayılarak gerçekleştirilen adım adım çözümler sonucunda, yakınsamanın elde edildiği durum için kesit ataletlerindeki değişim hesaplanmıştır. Şekil 3.3'te konsol kiriş model için hasarın yerini belirlemeye yönelik olarak gerçekleştirilen analitik model güncelleme işlemi neticesinde elde edilen kesit atalet değişimleri verilmektedir.



Şekil 3.3. Konsol kiriş modelde hasarlı durum için kesit atalet değerlerindeki değişimler

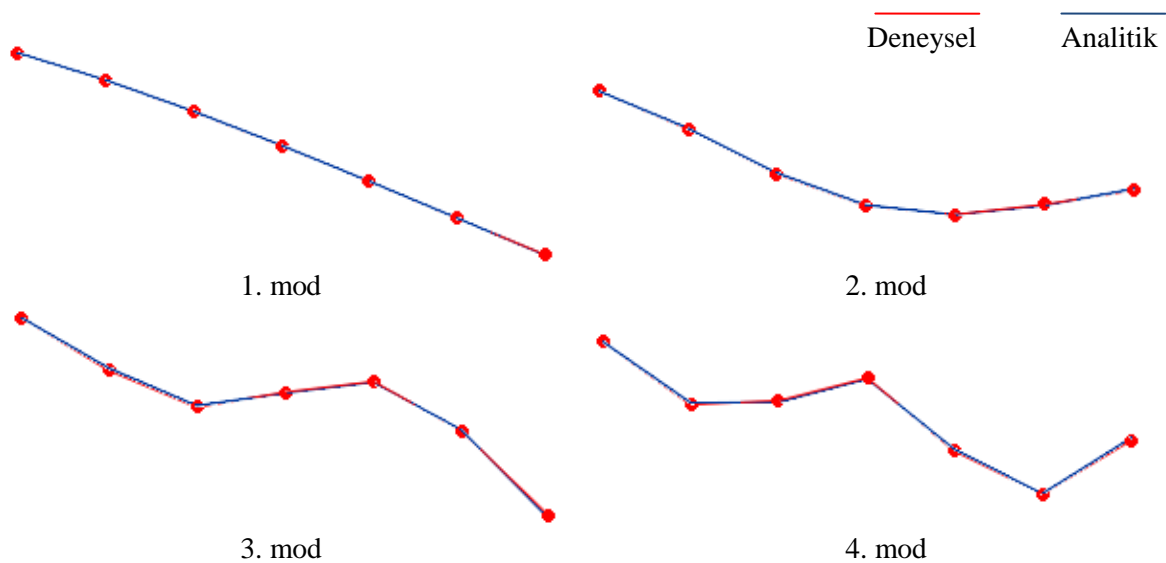
Konsol kiriş modelde hasarlı durum için gerçekleştirilen değerlendirmeden, kesit ataletindeki değişimlerin en fazla olduğu elemanlar belirlenmiştir. Hasarlı durum konsol kirişin boyutları ile eşleştirildiğinde, hasar oluşma ihtimali en yüksek kesit 52.5cm'deki kesit olarak ortaya çıkmaktadır. Gerçek hasar durumuyla karşılaştırıldığında, kullanılan

yöntem ile konsol kiriş modelde hasar yerinin oldukça doğru bir şekilde belirlenebildiği görülmektedir. Hasarlı durumu temsil ettiği kabul edilen güncellenmiş analitik modelin modal analizden elde edilen sonuçlar ile hasarlı duruma ait deneysel sonuçlar Tablo 3.2’de karşılaştırmalı olarak verilmektedir.

Tablo 3.2. Konsol kiriş modelin hasarlı durumu için deneysel ve analitik frekanslar

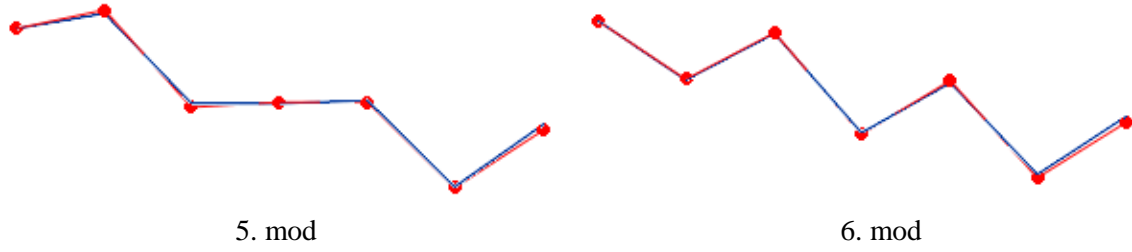
Mod Numarası	Doğal Frekansı(Hz)			Modal Güvence Kriteri
	Deneysel Hasarlı	Analitik Hasarlı	Fark (%)	
1	9.752	9.721	0.32	1.000
2	60.195	60.069	0.21	0.999
3	170.35	169.64	0.42	0.996
4	333.54	332.24	0.39	0.997
5	546.04	544.90	0.21	0.990
6	821.01	819.28	0.21	0.994

Analitik modelin güncellenmesi sonucunda elde edilen frekans değerleri arasında en fazla %0.42’lik bir fark olduğu görülmektedir. Konsol kiriş modelin hasarlı durumu için deneysel ve analitik mod vektörleri eşleştirilmiş ve MGK dikkate alınarak karşılaştırılmıştır. İlk beş mod için MGK değerleri en az 0.990 olarak elde edilmiştir. Şekil 3.4’te konsol kiriş modelin hasarlı durum için deneysel ve analitik mod şekilleri verilmektedir.



Şekil 3.4. Konsol kiriş modelin hasarlı durum için deneysel ve analitik mod şekilleri

Şekil 3.4'ün devamı



### 3.1.3. Hasarın Konsol Kiriş Davranışına Etkisinin Belirlenmesi

Konsol kiriş model üzerinde oluşturulan hasarın yapı davranışına etkisini belirleyebilmek amacıyla, analitik modelde konsol ucuna 100N'luk yükleme yapılmış durum için statik analiz gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.5'te verilen konsol modeldeki yükleme durumu verilmektedir.



Şekil 3.5. Konsol kiriş model üzerinde statik yükleme durumu

Bu yükleme durumu için konsol kiriş modele ait kalibre edilmiş ve hasarlı durumu temsil ettiği kabul edilen güncellenmiş analitik modellerden, maksimum yerdeğiştirme değerleri hasarsız durum için 5.218cm ve hasarlı durum için 5.304cm olarak elde edilmiştir. Oluşturulan bu hasarın yerdeğiştirmeyi %1.65 oranında arttırdığı belirlenmiştir.



## 3.2. İki Boyutlu Çelik Çerçeve Modelin Hasar Durumunun Değerlendirilmesi

### 3.2.1. Kiriş Ortası Hasarı

#### 3.2.1.1. Hasar Varlığının Belirlenmesi

İki boyutlu çelik çerçeve model üzerinde ilk hasar etkisi olarak kiriş ortası hasarı oluşturulmuş ve ölçümler yapılmıştır. Bu hasar durumu için değerlendirme yapabilmek amacıyla, hasarlı durum için ölçülen frekanslar ve mod şekilleri ile kalibre edilmiş analitik modelden elde edilen frekanslar ve mod şekilleri karşılaştırılmış ve sonuçlar Tablo 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3.3. İki boyutlu çelik çerçeve modelde kiriş ortası hasar durumu için deneysel ve kalibre edilmiş analitik frekanslar ile MGK değerleri

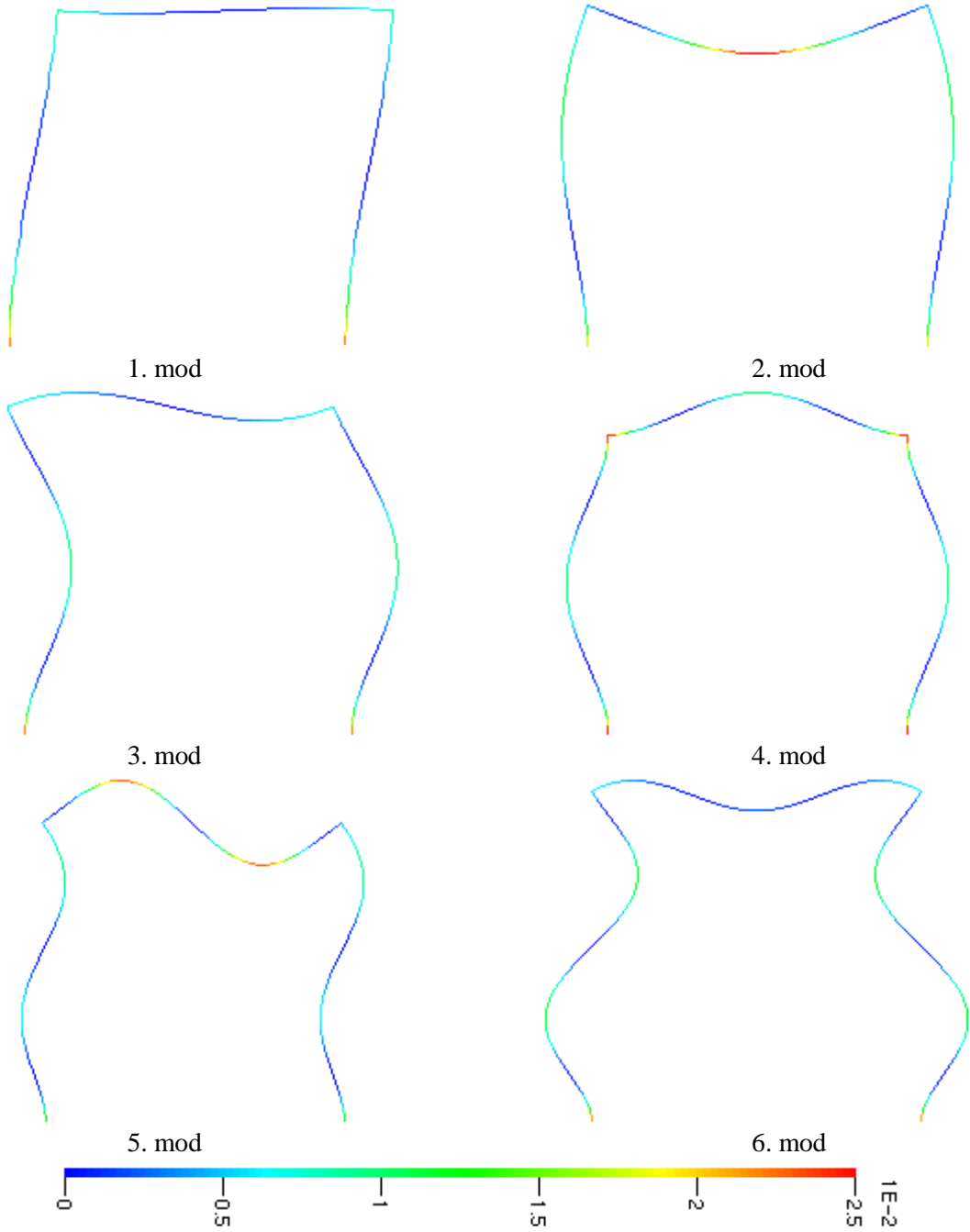
Mod Numarası	Doğal Frekansı(Hz)			Modal Güvence Kriteri
	Deneysel Hasarlı	Analitik Kalibre	Fark (%)	
1	9.004	9.081	0.85	0.995
2	35.018	35.837	2.34	0.997
3	57.699	58.453	1.31	0.950
4	62.420	63.378	1.54	0.962
5	127.070	127.99	0.72	0.977
6	153.730	156.36	1.71	0.977

Tablo 3.3'ten, deneysel ve analitik frekanslar arasındaki hasarsız duruma göre farkların arttığı ve özellikle de ikinci modda %2'den daha büyük bir fark olduğu görülmektedir. Frekanslardaki bu değişimler iki boyutlu çerçeve modelde hasarın varlığına işaret etmektedir.

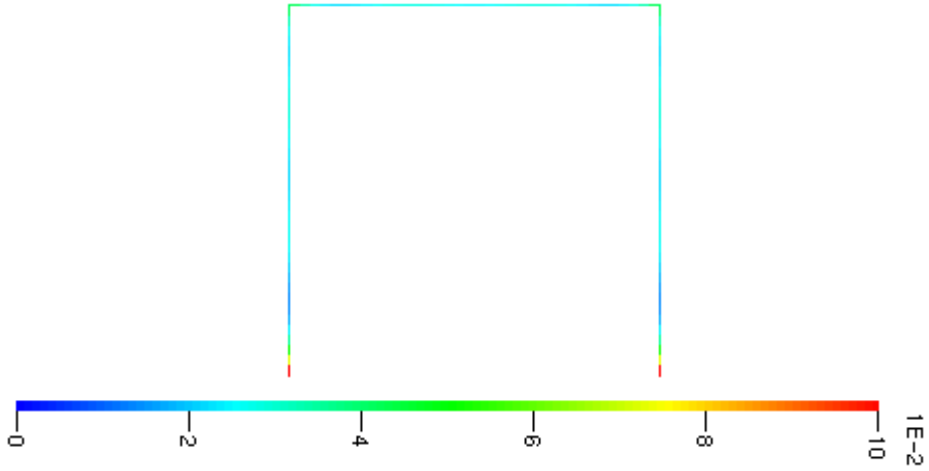
#### 3.2.1.2. Hasar Yerinin Belirlenmesi

Hasar yerinin tahmin edilebilmesi amacıyla, analitik model üzerinde kesit atalet değeri değişken alınarak güncellenme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlemde sonlu sayıda elemana bölünen iki boyutlu çelik çerçeve modelde, bütün elemanlarda kesit atalet değişimi dikkate alınmış; deneysel ve analitik frekanslar ile mod şekilleri arasındaki

farklılıklar en aza indirgenmeye çalışılmıştır. Değişken olarak seçilen kesit ataletinin, amaç fonksiyonu üzerindeki etkinliği duyarlılık analizi yapılarak belirlenmiştir. İki boyutlu çelik çerçeve modelde, kesit ataletinin modal davranış üzerindeki etkisi her bir mod için Şekil 3.6'da, toplam modal davranış için Şekil 3.7'de verilmektedir.

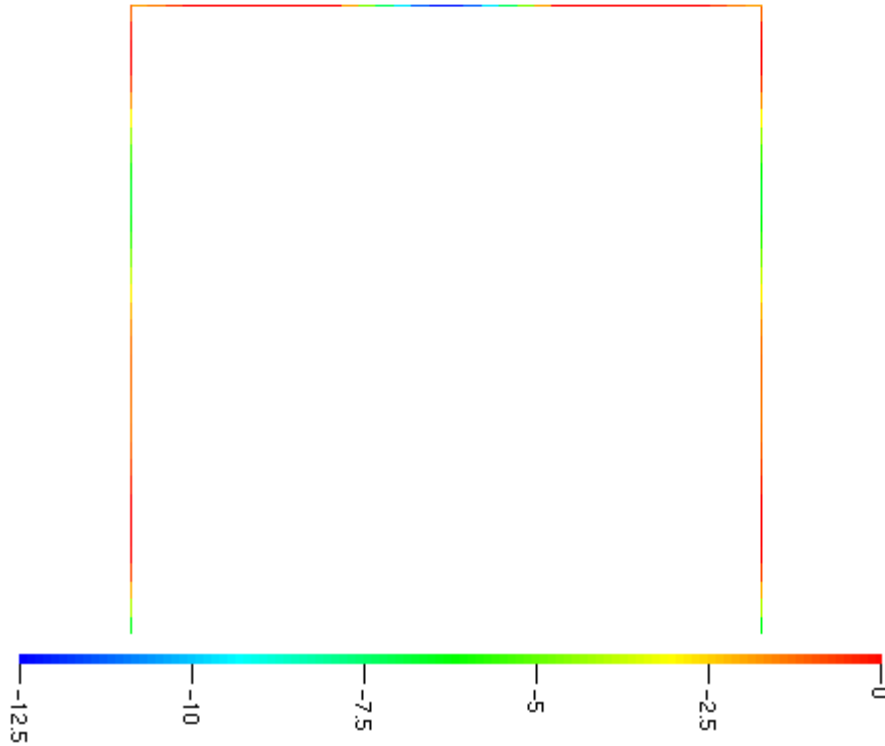


Şekil 3.6. İki boyutlu çelik çerçeve modelde kesit ataletinin her bir mod üzerindeki etkisi



Şekil 3.7. İki boyutlu çelik çerçeve modelde kesit ataletinin toplam modal davranış üzerindeki etkisi

Çelik çerçeve modelde, kesitin atalet değerindeki değişim dikkate alınarak frekanslar ve mod şekilleri için tanımlanan kriterler sağlanacak şekilde adım adım çözümler gerçekleştirilmiştir. Bu işlem sonucunda yakınsamanın elde edildiği durum için kesit ataletlerindeki değişimler Şekil 3.8'de verilmektedir.



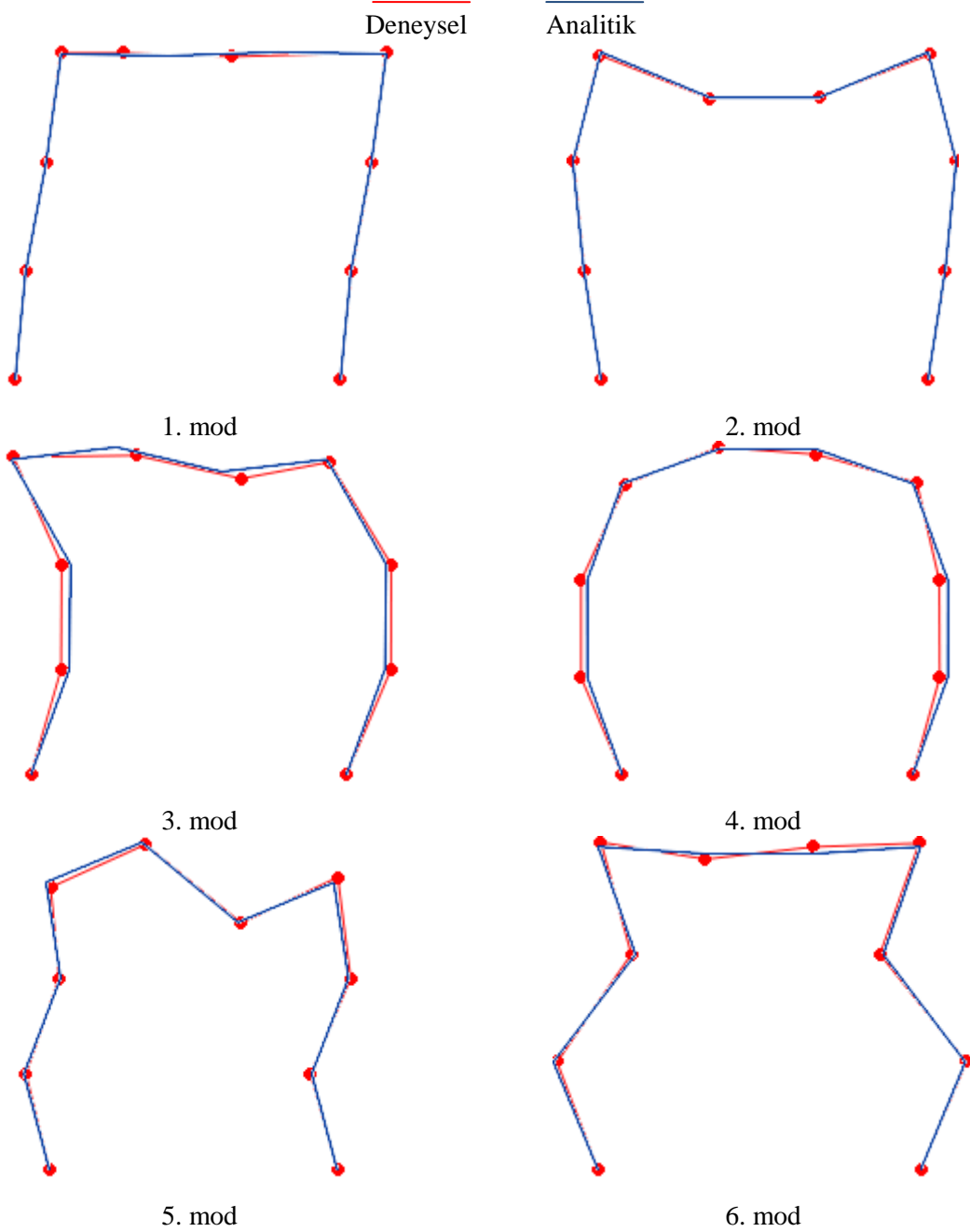
Şekil 3.8. İki boyutlu çelik çerçeve modelde kiriş ortası hasar durumu için kesit atalet değerindeki değişimler

Şekil 3.8'den iki boyutlu çelik çerçeve modelde hasarlı durum için gerçekleştirilen değerlendirme sonucunda, kesit ataletinde değişimin en fazla olduğu elemanlar belirlenmiştir. Çerçeve sistemin boyutları dikkate alındığında, kesit ataletinin en fazla değiştiği elemanlar kiriş ortasındaki yani 45cm'deki kesitlerdir. Gerçek hasar durumu ile karşılaştırıldığında, analitik model güncelleme yöntemiyle iki boyutlu çelik çerçevede kiriş ortası hasarı yerinin oldukça doğru bir şekilde belirlenebildiği görülmektedir. Belirlenen hasar durumuna ait analitik model üzerinde gerçekleştirilen modal analizden ve deneysel ölçümden elde edilen frekanslar Tablo 3.4'te verilmektedir.

Tablo 3.4. İki boyutlu çelik çerçeve modelde kiriş ortası hasar durumu için deneysel ve analitik frekanslar ile MGK değerleri

Mod Numarası	Doğal Frekansı(Hz)			Modal Güvence Kriteri
	Deneysel Hasarlı	Analitik Hasarlı	Fark (%)	
1	9.004	8.998	0.06	0.995
2	35.018	34.991	0.08	0.997
3	57.699	57.653	0.08	0.950
4	62.420	62.408	0.02	0.962
5	127.070	126.72	0.27	0.977
6	153.730	153.70	0.02	0.977

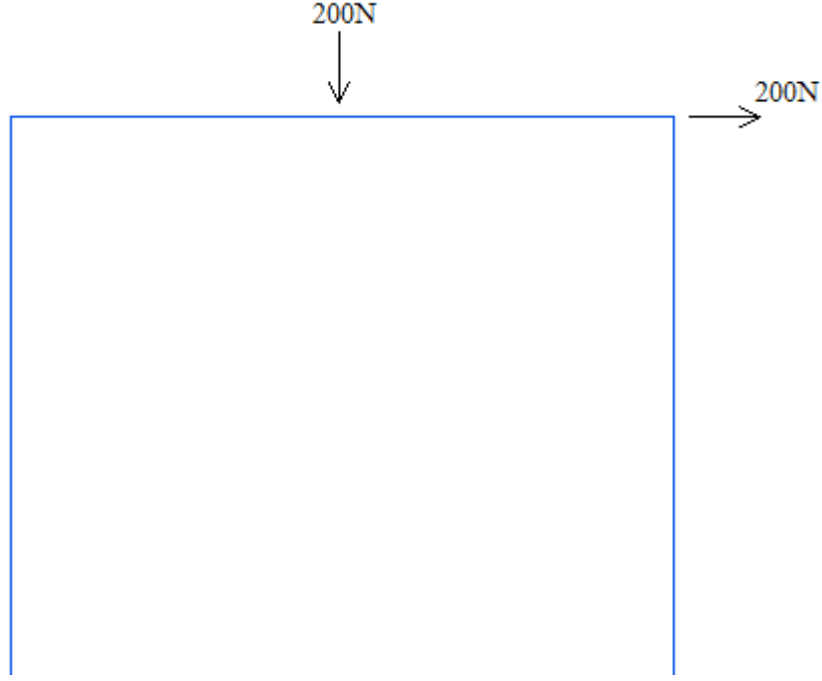
İki boyutlu çerçeveye ait analitik modelin güncellenmesi sonucunda, analitik frekanslar ile deneysel frekanslar arasındaki fark maksimum %0.27 olarak elde edilmiştir. İki boyutlu çerçeve modelin hasarlı durumu için deneysel ve analitik mod vektörlerinin eşleştirilmesi sonucunda, kiriş ortası hasar durumu için MGK değerleri 0.950'den daha büyük olarak belirlenmiştir. Şekil 3.9'da bu hasar durumu için çerçeve modelde deneysel ve analitik mod şekilleri verilmektedir.



Şekil 3.9. İki boyutlu çelik çerçeve modelde kiriş ortası hasar durumuna ait deneysel ve analitik mod şekilleri

### 3.2.1.3. Hasarın Çelik Çerçeve Davranışına Etkisinin Belirlenmesi

İki boyutlu çelik çerçeve modelde oluşturulan hasarın yapı davranışına etkisini belirleyebilmek amacıyla, analitik model üzerinde Şekil 3.10'da gösterilen yükleme durumu için statik analiz gerçekleştirilmiştir. Statik yükler, hasar etkisini daha net belirleyebilmek amacıyla kiriş ortasına ve kolon üst ucuna uygulanmıştır.



Şekil 3.10. İki boyutlu çerçeve model üzerinde statik yükleme durumu

Bu yükleme durumu için kalibre edilmiş ve hasarlı durumu temsil eden analitik modellerin statik analizlerden, maksimum düşey yerdeğiştirme hasarsız durum için 3.434mm ve hasarlı durum için 3.606mm; yatay yerdeğiştirme hasarsız durum için 17.943mm ve hasarlı durum için 18.245mm olarak elde edilmiştir.

### 3.2.2. Kolon-Kiriş Birleşim Bölgesi Hasarı

#### 3.2.2.1. Hasar Varlığının Belirlenmesi

İki boyutlu çelik çerçeve model üzerinde, ikinci hasar durumu olarak kolon-kiriş birleşim bölgesi hasarı oluşturulmuş ve deneysel ölçümler gerçekleştirilmiştir. Bu hasar durumunu değerlendirebilmek için, hasarlı duruma ait deneysel frekanslar ve mod şekilleri ile bir önceki hasar durumu için güncellenen analitik modelden elde edilen frekanslar ve mod şekilleri karşılaştırılmış ve Tablo 3.5'te verilmiştir.

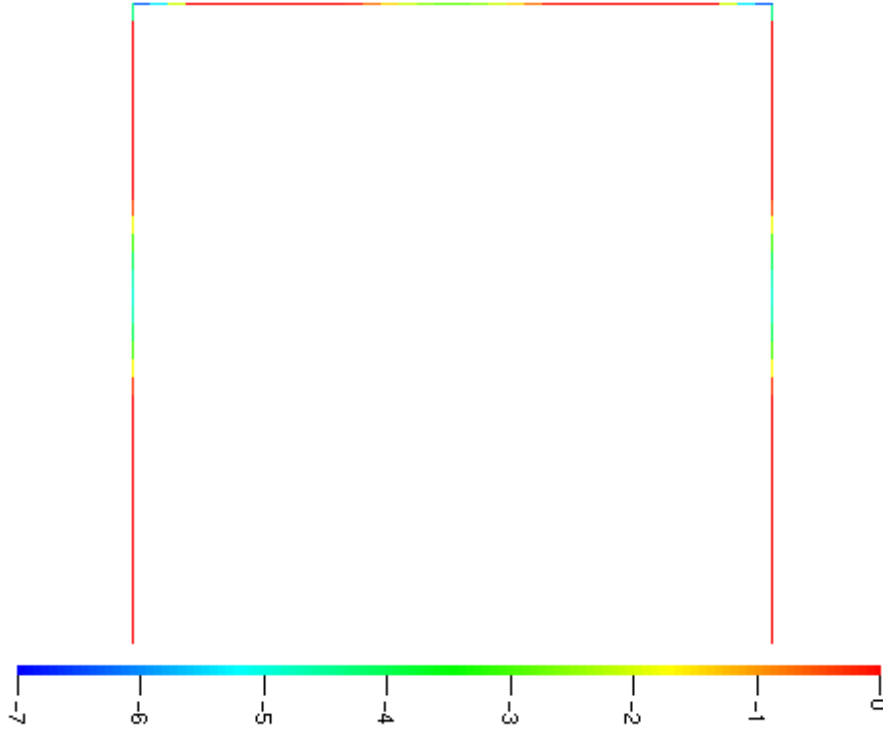
Tablo 3.5. İki boyutlu çelik çerçeve modelde kolon-kiriş birleşim bölgesi hasar durumuna ait deneysel ve hasar öncesi analitik frekanslar ile MGK değerleri

Mod Numarası	Doğal Frekansı(Hz)			Modal Güvence Kriteri
	Deneysel Hasarlı	Analitik Hasar öncesi	Fark (%)	
1	9.004	8.998	0.07	0.994
2	34.857	34.991	0.38	0.997
3	57.260	57.653	0.69	0.986
4	61.904	62.408	0.81	0.991
5	126.99	126.72	0.21	0.978
6	153.51	153.70	0.12	0.982

Tablo 3.5'ten deneysel olarak ölçülen frekansların, analitik modelden elde edilen frekanslardan farklı olduğu görülmektedir. Bu değişimler iki boyutlu çerçevede yeni hasar durumlarının varlığına işaret etmektedir.

### 3.2.2.2. Hasar Yerinin Belirlenmesi

Çelik çerçeve modelde kolon-kiriş birleşim bölgesi hasar durumu için hasar yerinin tahmin edilebilmesi amacıyla, ilk hasar durumuna göre güncellenen analitik model üzerinde kesit ataletinin değişimi dikkate alınarak tekrar güncelleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu durum için gerçekleştirilen adım adım çözümler sonucunda yakınsamanın elde edildiği durumda kesit ataletlerindeki değişimler Şekil 3.11'de verilmektedir.

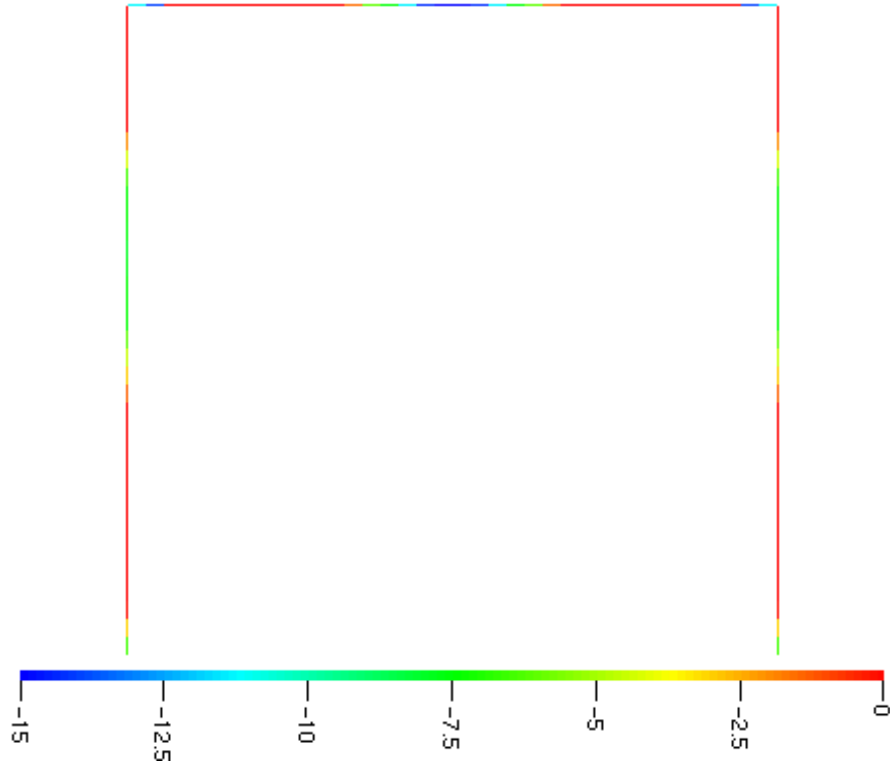


Şekil 3.11. İki boyutlu çelik çerçeve modelde kolon-kiriş birleşim bölgesi hasar durumu için kesit atalet değerindeki değişimler

Şekil 3.11'den iki boyutlu çelik çerçeve modelde hasarlı durum için gerçekleştirilen değerlendirme sonucunda, kesit ataletinde değişimin en fazla olduğu elemanlar kolon-kiriş birleşim bölgeleri olarak belirlenmiştir. Gerçek hasar durumu ile karşılaştırıldığında, kolon-kiriş birleşim bölgesi hasar yerinin oldukça doğru bir şekilde belirlenebildiği ortaya çıkmaktadır.

Kiriş ortası hasarı ile kolon-kiriş birleşim bölgesi hasarının, iki boyutlu çerçeve model üzerinde aynı anda oluştuğu varsayılarak yeni bir değerlendirme yapılmıştır. Daha önceki hasar durumları için gerçekleştirilen adımlar, bu hasar durumu için de tekrarlanmış ve kesit atalet değeri için Şekil 3.12'de gösterilen değişimler elde edilmiştir.





Şekil 3.12. İki boyutlu çelik çerçeve modelde kiriş ortası ve kolon-kiriş birleşim bölgesi hasarları için kesit atalet değerindeki değişimler

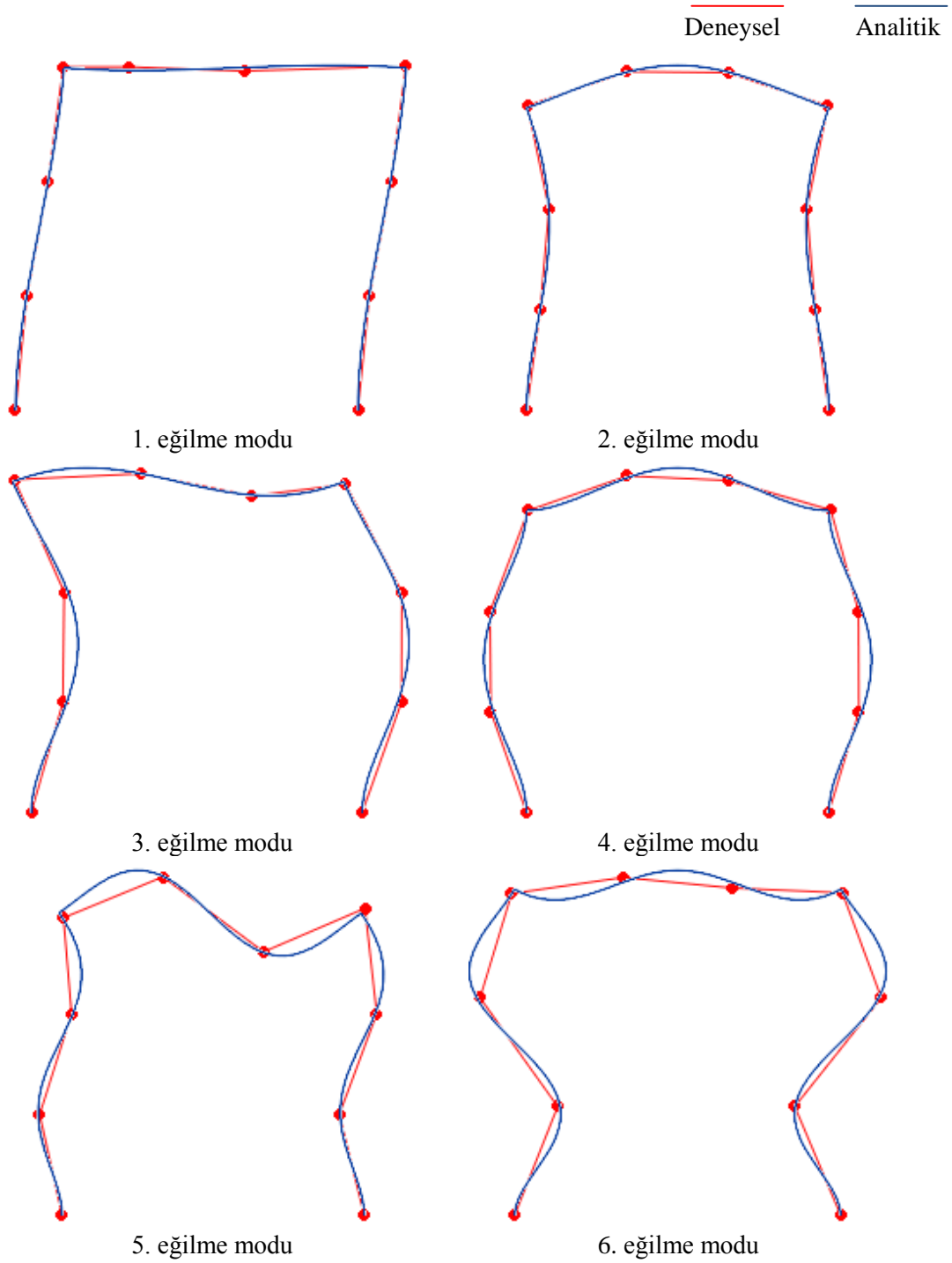
Şekil 3.12'den iki boyutlu çelik çerçeve modelde bu hasar durum için gerçekleştirilen değerlendirmeden, kesit atalet değerinin en fazla kiriş ortasında ve kiriş uç bölgelerinde değişim gösterdiği belirlenmiştir. Bu hasar durumu için elde edilen analitik frekanslar ile deneysel frekanslar Tablo 3.6'da verilmektedir.

Tablo 3.6. İki boyutlu çelik çerçeve modelde kiriş ortası ve kolon-kiriş birleşim bölgesi hasar durumları için deneysel ve analitik frekanslar ile MGK değerleri

Mod Numarası	Doğal Frekansı(Hz)			Modal Güvence Kriteri
	Deneysel Hasarlı	Analitik Hasarlı	Fark (%)	
1	9.004	8.969	0.21	0.994
2	34.857	34.817	0.11	0.997
3	57.260	57.200	0.10	0.986
4	61.904	61.779	0.20	0.991
5	126.99	126.72	0.21	0.978
6	153.51	153.39	0.07	0.982

Çelik çerçeveye ait analitik modelin bu hasar durumuna göre güncellenmesi sonucunda, deneysel ve analitik frekanslar arasındaki farkın maksimum %0.21 olduğu

görülmektedir. İki boyutlu çerçeve modelin hasarlı durumu için deneysel ve analitik mod vektörlerinin eşleştirilmesi sonucunda MGK değerlerinin 0.978'den daha büyük olduğu belirlenmiştir. Şekil 3.13'te bu hasar durumu için deneysel ve analitik mod şekilleri verilmektedir.



Şekil 3.13. İki boyutlu çelik çerçeve modelde kiriş ortası ve kolon-kiriş birleşim bölgesi hasarları için deneysel ve analitik mod şekilleri

### 3.2.2.3. Hasarın Çelik Çerçeve Davranışına Etkisinin Belirlenmesi

İki boyutlu çelik çerçeve modelde ikinci aşamada oluşturulan kolon-kiriş birleşim bölgesi hasarının yapı davranışına etkisini belirleyebilmek amacıyla, hasarlı durumu temsil ettiği kabul edilen analitik model üzerine Şekil 3.10'da gösterilen yükleme durumu uygulanmıştır. Bu hasarlı duruma ait analitik model üzerinde gerçekleştirilen statik analizden, maksimum düşey yerdeğiştirme 3.657mm ve yatay yerdeğiştirme 18.386mm olarak elde edilmiştir.

İki boyutlu çelik çerçeve modelde oluşturulan iki farklı hasar etkisi için, maksimum düşey yerdeğiştirmelerin kiriş ortası hasar durumunda %5, kolon- kiriş birleşim bölgesi hasar durumunda ise %1.4 düzeyinde arttığı ve yatay yerdeğiştirmelerin ise bu hasar durumlarından daha az etkilendiği belirlenmiştir.

## 3.3. Tek Katlı Betonarme Bina Modelin Hasar Durumlarının Değerlendirilmesi

### 3.3.1. Kolon Üst Uçlarında Kabuk Betonu Hasarı

#### 3.3.1.1. Hasar Varlığının Belirlenmesi

Tek katlı betonarme bina modelde, öncelikle kolon üst uç bölgelerindeki kabuk betonu hasar durumu için değerlendirme yapılmıştır. Hasarın varlığının belirlenebilmesi amacıyla, hasarlı duruma ait deneysel frekanslar ve mod şekilleri ile kalibre edilmiş analitik modelden elde edilen frekanslar ve mod şekilleri karşılaştırılmıştır (Tablo 3.7).

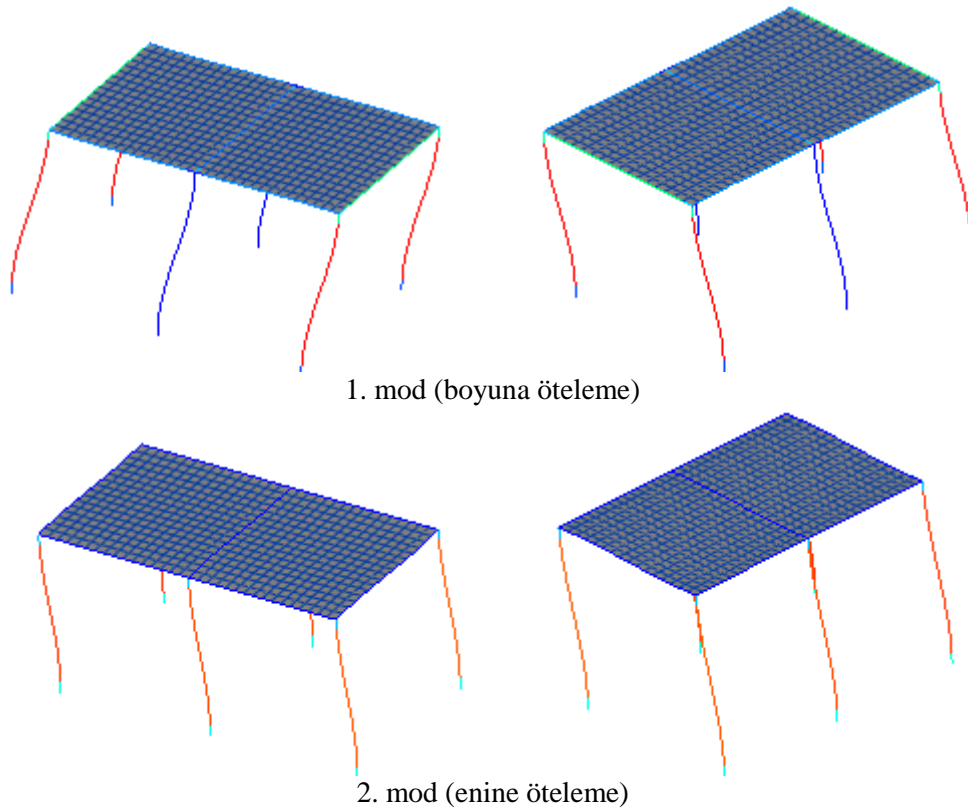
Tablo 3.7. Tek katlı betonarme bina modelde kolon üst uçlarında kabuk betonu hasar durumu için deneysel ve kalibre edilmiş analitik frekanslar ile MGK değerleri

Mod Numarası	Doğal Frekansı(Hz)			Modal Güvence Kriteri
	Deneysel Hasarlı	Analitik Kalibre	Fark (%)	
1	12.879	14.936	15.97	0.993
2	17.685	19.751	11.68	0.994
3	21.528	23.880	10.93	0.986

Tablo 3.7'den de görüldüğü üzere, deneysel ölçümlerden elde edilen frekans değerlerinin analitik frekanslardan oldukça düşük olduğu ve farkın bazı modlarda %16'lara yaklaştığı görülmektedir. Bu değişimler tek katlı betonarme modelde hasarın varlığına işaret etmektedir.

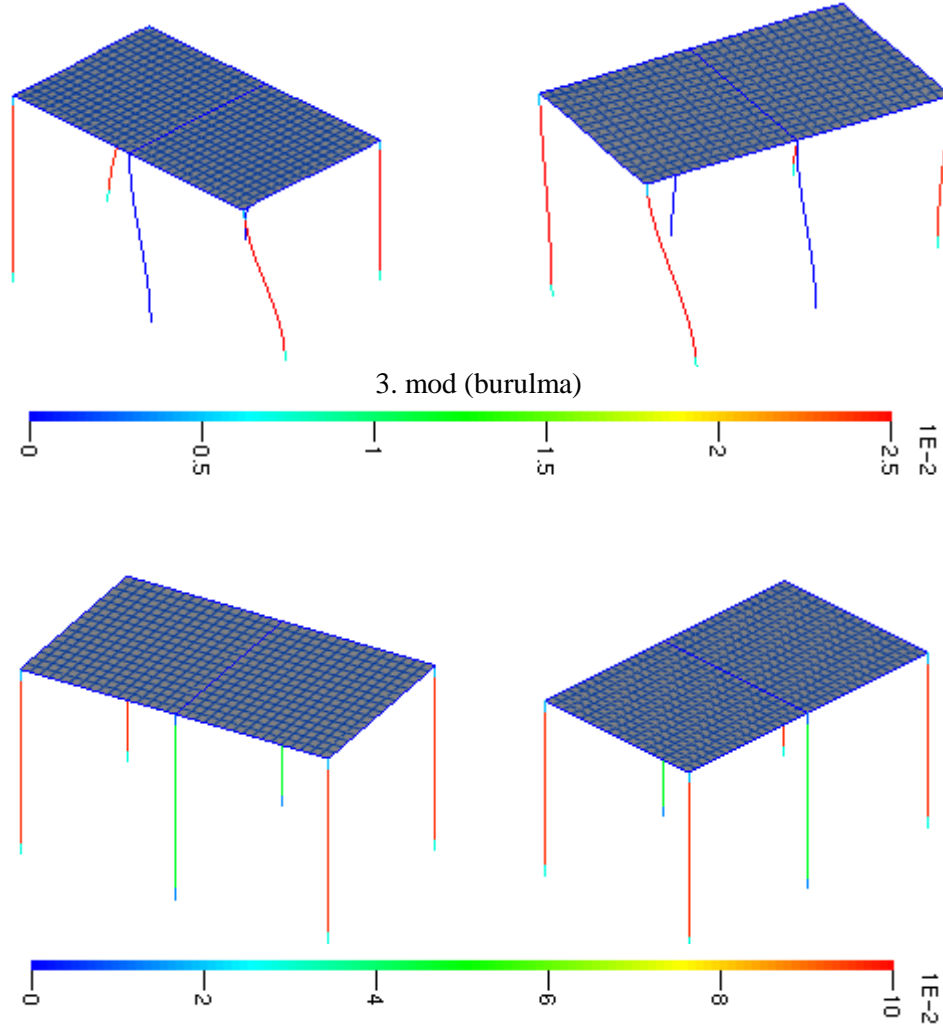
### 3.3.1.2. Hasar Yerinin Belirlenmesi

Tek katlı betonarme bina modelde hasar yerinin tahmin edilebilmesi amacıyla, kalibre edilmiş analitik modelde kesit atalet değeri değişken alınarak model güncellenme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, öncelikle kesit ataletindeki değişimin, bina modelinin modal davranışı üzerindeki etkisi duyarlılık analizi yapılarak belirlenmiştir. Duyarlılık analizi sonucunda, tek katlı bina modelde kesit ataleti değişiminin her bir mod üzerindeki etkisi Şekil 3.14'te, toplam modal davranış üzerindeki etkisi Şekil 3.15'te verilmektedir.



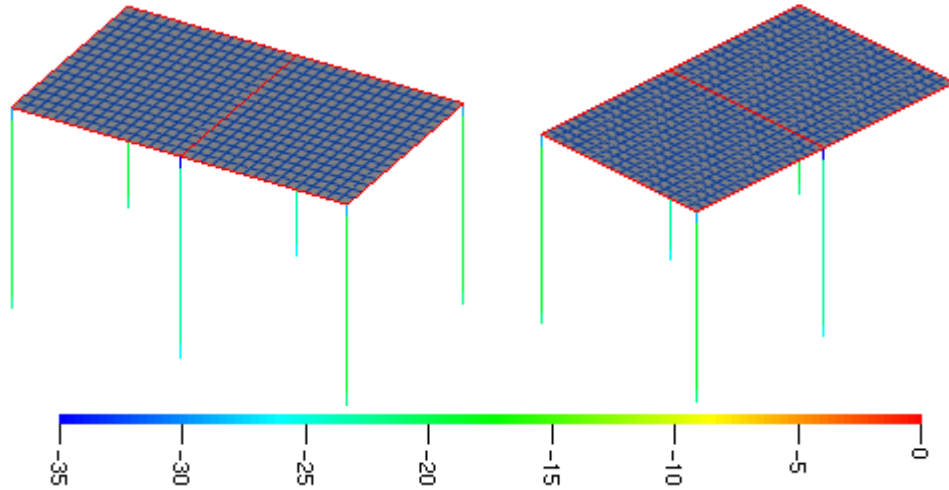
Şekil 3.14. Tek katlı betonarme bina modelde kesit ataletinin her bir mod üzerindeki etkisi

Şekil 3.14'ün devamı



Şekil 3.15. Tek katlı betonarme bina modelde kesit ataletinin toplam modal davranış üzerindeki etkisi

Tek katlı betonarme bina modelde, kesit atalet değerindeki değişimler dikkate alınarak gerçekleştirilen adım adım çözümler sonucunda yakınsamanın elde edildiği durumda kesit ataletlerindeki değişimler Şekil 3.16'da verilmektedir.



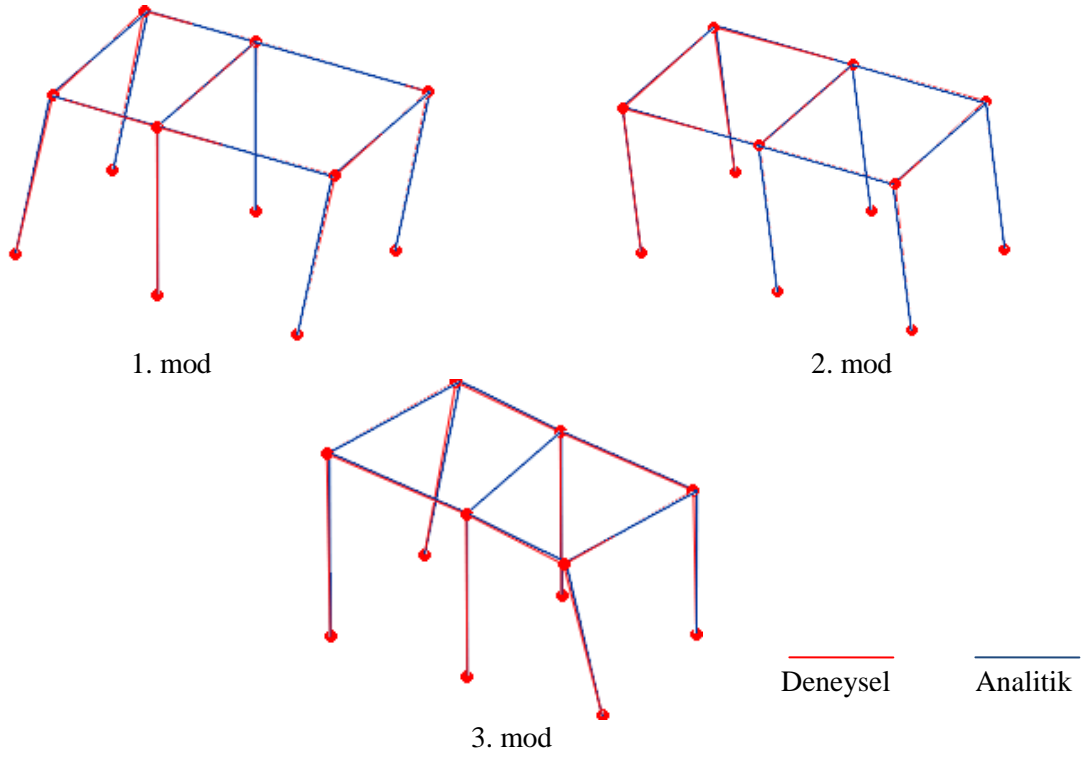
Şekil 3.16. Tek katlı betonarme bina modelde kolon üst uçlarındaki hasar durumu için atalet değerindeki değişimler

Şekil 3.16'dan tek katlı betonarme bina modelde hasarlı durum için gerçekleştirilen değerlendirme sonucunda, kesit ataletindeki değişimlerin en fazla olduğu elemanlar kolonların üst uçları olarak belirlenmiştir. Kullanılan yaklaşımla, bu modelde kolon üst ucu hasarlarının oldukça doğru bir şekilde belirlenebildiği görülmektedir. Bu hasar durumu için güncellenen analitik modelden elde edilen frekansların deneysel frekanslarla karşılaştırılması Tablo 3.8'de verilmektedir.

Tablo 3.8. Tek katlı betonarme bina modelde kolon üst uçları hasarlı duruma ait deneysel ve analitik frekanslar ile MGK değerleri

Mod Numarası	Doğal Frekansı(Hz)			Modal Güvence Kriteri
	Deneysel Hasarlı	Analitik Hasarlı	Fark (%)	
1	12.879	12.879	0.00	0.993
2	17.685	17.685	0.00	0.994
3	21.528	21.528	0.00	0.987

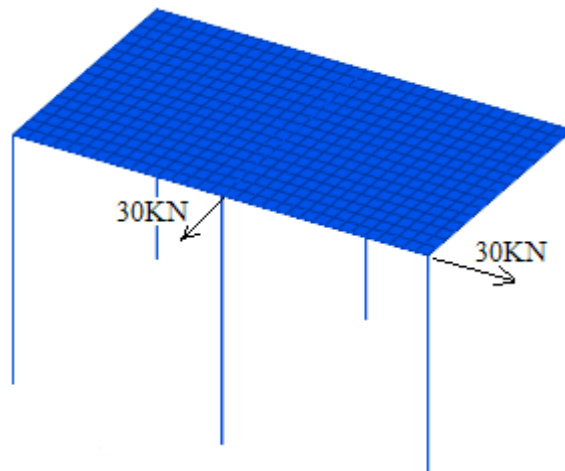
Analitik modelin güncellenmesi sonucunda, analitik ve deneysel frekans değerleri arasındaki fark en aza indirgenmiştir. Hasarlı durum için deneysel ve analitik mod vektörleri arasındaki MGK değerleri en az 0.987 olarak elde edilmiştir. Şekil 3.17'de tek katlı betonarme bina modelde bu hasar durumu için deneysel ve analitik mod şekilleri verilmektedir.



Şekil 3.17. Tek katlı betonarme bina modelde kolon üst uçlarının hasarlı olması durumu için deneysel ve analitik mod şekilleri

### 3.3.1.3. Hasarın Betonarme Bina Davranışına Etkisinin Belirlenmesi

Tek katlı betonarme modelde bütün kolonların üst uçlarında oluşturulan kabuk betonu hasarının yapı davranışına etkisini belirleyebilmek amacıyla, Şekil 3.18’de gösterilen yükleme durumu dikkate alınmıştır.



Şekil 3.18. Tek katlı betonarme bina modelde statik yükleme durumu

Bu yükleme durumu için kalibre edilmiş ve hasarlı durumu temsil eden analitik modeller statik analizlerden, boyuna doğrultudaki maksimum yerdeğiştirme hasarsız durum için 2.463mm ve hasarlı durum için 3.240mm; enine doğrultudaki maksimum yerdeğiştirme ise hasarsız durum için 1.175mm ve hasarlı durum için 1.448mm olarak elde edilmiştir. Oluşturulan hasar durumu, boyuna ve enine doğrultudaki yerdeğiştirmeleri sırasıyla %31 ve %23 düzeyinde arttırmıştır.

### 3.3.2. Kolon Alt Uçlarında Kabuk Betonunun Hasarı

#### 3.3.2.1. Hasar Varlığının Belirlenmesi

Tek katlı betonarme bina modelde kolon alt uç bölgelerinde oluşturulan kabuk betonu hasar durumunun değerlendirilmesi amacıyla, öncelikle deneysel frekanslar ve mod şekilleri ile bir önceki hasar durumuna ait güncellenmiş modelden elde edilen frekanslar ve mod şekilleri karşılaştırılmış ve Tablo 3.9’da verilmiştir.

Tablo 3.9. Tek katlı betonarme bina modelde kolonların alt uçlarındaki hasar durumu için deneysel ve hasar öncesi analitik frekanslar ile MGK değerleri

Mod Numarası	Doğal Frekansı(Hz)			Modal Güvence Kriteri
	Deneysel Hasarlı	Analitik Hasar öncesi	Fark (%)	
1	10.998	12.879	17.10	0.995
2	15.760	17.685	12.71	0.989
3	18.241	21.528	18.44	0.989

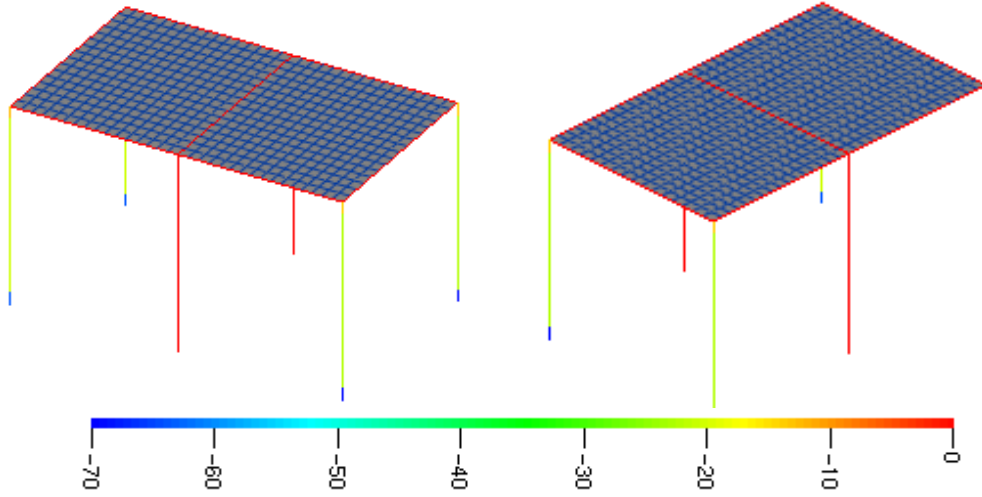
Tablo 3.9’den deneysel ve analitik frekanslar arasındaki farkların önemli düzeyde arttığı ve farklılığın bazı modlarda %19 değerine yaklaştığı görülmektedir. Bu değişimler tek katlı bina modelde yeni hasarların varlığına işaret etmektedir.

#### 3.3.2.2. Hasar Yerinin Belirlenmesi

Tek katlı betonarme bina modelde bu hasar durumu için hasar yerinin tahmin edilebilmesi amacıyla, önceki hasar durumu için güncellenen analitik modelde kesit atalet



değeri değişken olarak dikkate alınıp analitik model tekrar güncellenmiştir. Bu işlemde bina modelin bütün elemanlarında kesit atalet değerindeki değişimler için amaç fonksiyonunun sağlanması hedeflenmiştir. Kesit atalet değerindeki değişimler dikkate alınarak gerçekleştirilen adım adım çözümler sonucunda, yakınsamanın elde edildiği durumda kesit ataletlerindeki değişimler Şekil 3.19’da verilmektedir.



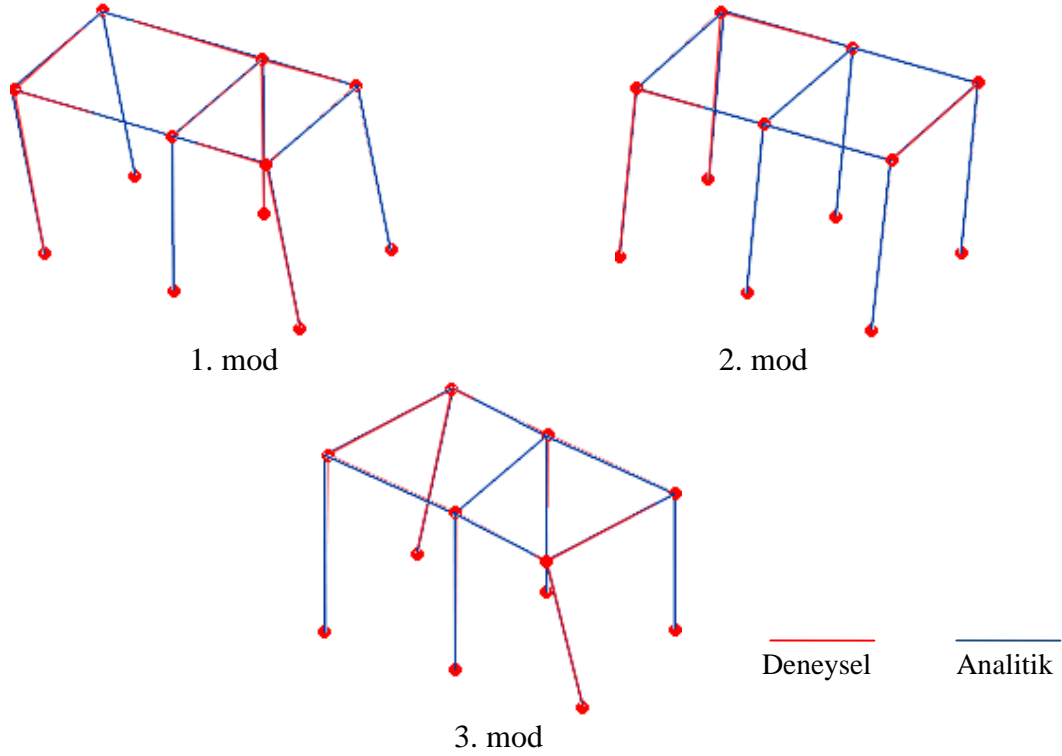
Şekil 3.19. Tek katlı betonarme modelde kolon alt uçları kabuk betonu hasar durumu için kesit atalet değerindeki değişimler

Şekil 3.19’dan tek katlı betonarme bina modelde hasarlı durum için gerçekleştirilen değerlendirmeden, kesit atalet değerinde değişimlerin en fazla olduğu elemanlar bütün kolonların alt uçları olarak belirlenmiştir. Gerçek hasar durumu ile karşılaştırıldığında, bu hasar durumu için hasar yerlerinin oldukça doğru bir şekilde belirlenebildiği ortaya çıkmaktadır. Hasarlı durumu temsil eden güncellenmiş analitik modele ait frekanslar ile ölçümlerden elde edilen frekanslar Tablo 3.10’da verilmektedir.

Tablo 3.10. Tek katlı betonarme bina modelde kolon alt uçları hasar durum için deneysel ve analitik frekanslar ile MGK değerleri

Mod Numarası	Doğal Frekansı(Hz)			Modal Güvence Kriteri
	Deneysel Hasarlı	Analitik Hasarlı	Fark (%)	
1	10.998	10.998	0.00	0.995
2	15.760	15.710	0.32	0.998
3	18.241	18.241	0.00	0.995

Analitik modelin güncellenmesi sonucunda, analitik frekanslar ile deneysel frekanslar arasındaki fark en aza indirgenmiştir. Tek katlı betonarme modelde bu hasar durumu için deneysel ve analitik mod vektörlerinin eşleştirilmesi sonucunda MGK değeri en az 0.995 olarak elde edilmiştir. Tek katlı betonarme modelde kolon alt uçlarında kabuk betonu hasar durumu için deneysel ve analitik mod şekilleri Şekil 3.20’de verilmektedir.



Şekil 3.20. Tek katlı betonarme modelde kolon alt uçlarındaki hasarlar için deneysel ve analitik mod şekilleri

### 3.3.2.3. Hasarın Betonarme Bina Davranışına Etkisinin Belirlenmesi

Tek katlı betonarme modelde kolon alt uçlarındaki kabuk betonu hasarının yapı davranışına etkisini belirleyebilmek amacıyla, hasarlı durumu temsil eden analitik model üzerinde Şekil 3.18’de gösterilen yükleme durumu tekrar uygulanmıştır. Hasarlı duruma ait modelin statik analizinden, boyuna doğrultudaki maksimum yerdeğiştirme 4.401mm ve enine doğrultudaki yerdeğiştirme ise 1.799mm olarak elde edilmiştir. Bina modelde oluşturulan bu hasar etkisi boyuna ve enine doğrultudaki yerdeğiştirmeleri sırasıyla %35 ve %24 düzeyinde arttırmıştır.

### 3.3.3. A-1 Kolon Üst Ucu Çekirdek Betonuna Hasarı

#### 3.3.3.1. Hasar Varlığının Belirlenmesi

Tek katlı betonarme bina modelde son olarak köşe kolonlardan bir tanesinin üst ucunda çekirdek betonu hasarı oluşturulmuş ve ölçümler yapılmıştır. Hasar değerlendirmesi amacıyla, hasarlı durum için gerçekleştirilen ölçümden elde edilen frekanslar ve mod şekilleri ile hasar öncesi analitik frekanslar ve mod şekilleri karşılaştırılmış ve Tablo 3.11’de verilmiştir.

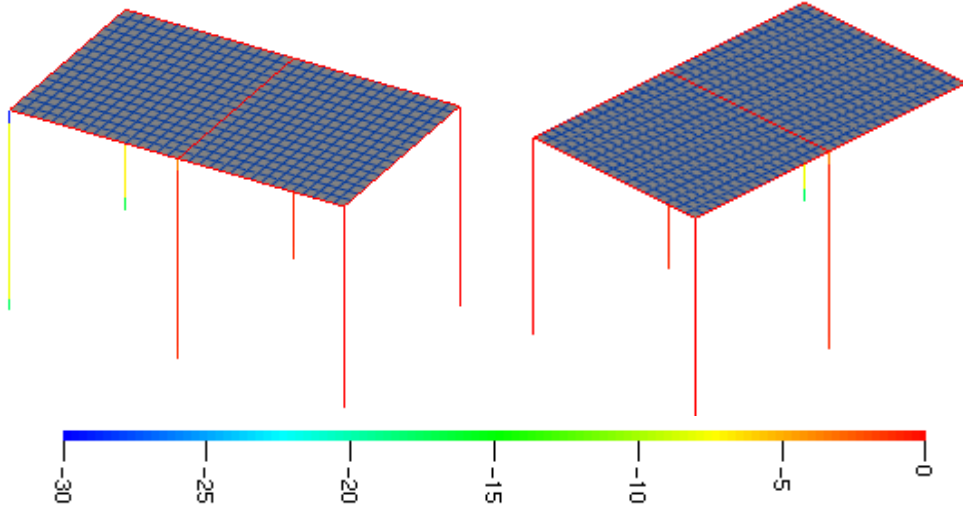
Tablo 3.11. Tek katlı betonarme modelde köşe kolon üst ucu hasar durumu için deneysel ve hasar öncesi analitik frekanslar ile MGK değerleri

Mod Numarası	Doğal Frekansı(Hz)			Modal Güvence Kriteri
	Deneysel Hasarlı	Analitik Hasar öncesi	Fark (%)	
1	10.856	10.998	1.50	0.995
2	15.402	15.710	2.26	0.979
3	17.890	18.241	2.30	0.974

Hasarlı durum için gerçekleştirilen incelemeye göre, deneysel ve analitik frekanslar arasındaki farkların arttığı ve farklılığın bazı modlarda %2.3 değerinde olduğu görülmektedir. Bu değişimler bina modelde hasarın varlığına işaret etmektedir.

#### 3.3.3.2. Hasar Yerinin Belirlenmesi

Tek katlı betonarme bina modelde köşe kolon üst ucu çekirdek betonu hasarı için hasar yerinin tahmin edilebilmesi amacıyla, önceki hasar durumu için güncellenen analitik model kesit atalet değeri değişken alınıp tekrar güncellenmiştir. Tek katlı modelde kesit atalet değerindeki değişim dikkate alınarak gerçekleştirilen adım adım çözümler sonucunda yakınsamanın elde edildiği durumda kesit ataletlerindeki değişimler Şekil 3.21’de verilmektedir.



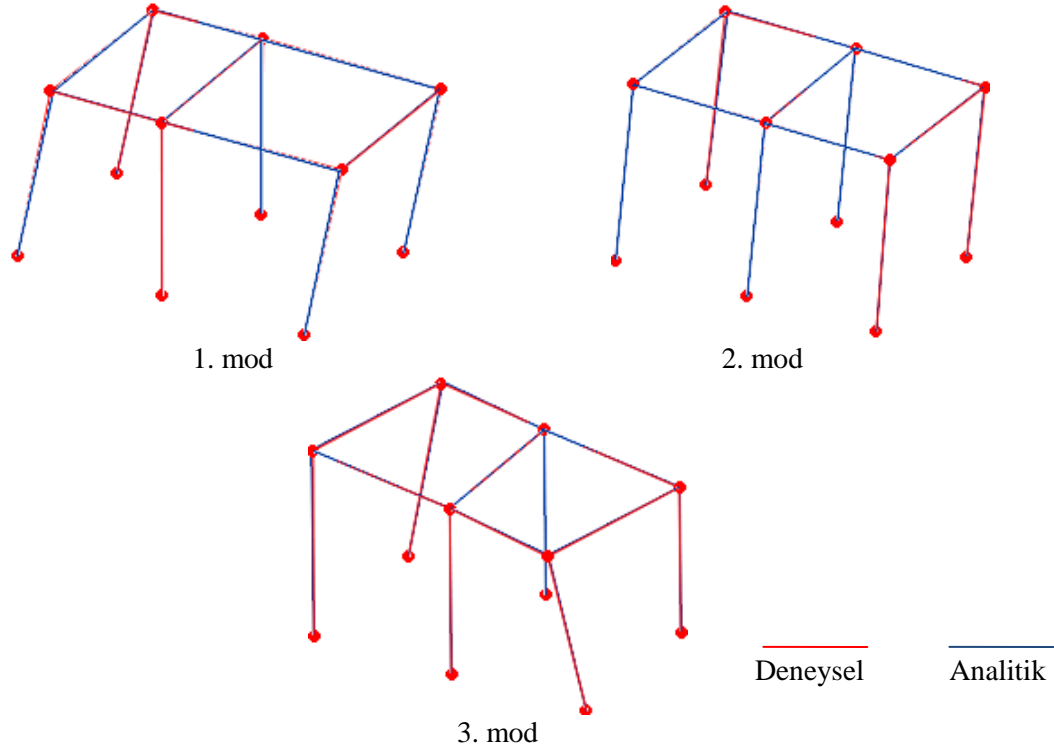
Şekil 3.21. Tek katlı betonarme bina modelde köşe kolon üst ucu hasar durumu için kesit ataletindeki değişimler

Şekil 3.21'den tek katlı betonarme bina modelde hasarlı durum için gerçekleştirilen değerlendirmeden, kesit ataletindeki değişimin en fazla olduğu eleman A-1 köşe kolonu üst ucu olarak belirlenmiştir. Gerçek hasar durumu ile karşılaştırıldığında, kolon üst ucu çekirdek betonu hasar durumunun oldukça doğru bir şekilde belirlenebildiği ortaya çıkmaktadır. Hasarlı durumu temsil eden analitik modelin modal analizinden elde edilen doğal frekanslar ile deneysel frekansların karşılaştırılması Tablo 3.12'de verilmektedir.

Tablo 3.12. Tek katlı betonarme bina modelde köşe kolon üst ucu hasar durumu için deneysel ve analitik frekanslar ile MGK değerleri

Mod Numarası	Doğal Frekansı(Hz)			Modal Güvence Kriteri
	Deneysel Hasarlı	Analitik Hasarlı	Fark (%)	
1	10.856	10.765	0.84	0.994
2	15.402	15.394	0.06	0.998
3	17.890	17.842	0.27	0.996

Analitik modelin güncellenmesi sonucunda, analitik frekans değerleri ile deneysel frekans değerleri arasındaki fark en aza indirgenmiştir. Tek katlı betonarme bina modelin hasarlı durumu için deneysel ve analitik mod vektörleri arasındaki MGK değerleri en az 0.994 olarak belirlenmiştir. Şekil 3.22'de bu hasar durumu için deneysel ve analitik mod şekilleri verilmektedir.



Şekil 3.22. Tek katlı betonarme bina modelde köşe kolon üst ucu hasar durumu için deneysel ve analitik mod şekilleri

### 3.3.3.3. Hasarın Betonarme Bina Davranışına Etkisinin Belirlenmesi

Tek katlı betonarme modelde A-1 kolonu üst ucunda göbek betonu hasarının yapı davranışına etkisini belirleyebilmek amacıyla, daha önceki modellere uygulanan yükleme durumu için statik analizler yapılmıştır. Bu hasar durumunu temsil ettiği kabul edilen analitik model üzerinde gerçekleştirilen statik analizden, boyuna doğrultudaki maksimum yerdeğiştirme 4.588mm ve enine doğrultudaki yerdeğiştirme ise 1.923mm olarak elde edilmiştir. Oluşturulan hasar etkisi boyuna yerdeğiştirmeyi bir önceki duruma göre %4,3 enine yerdeğiştirmeyi ise %6.9 düzeyinde arttırmıştır.

Tek katlı betonarme modelin başlangıç durumuna göre oluşturulan bütün hasar etkileri, boyuna doğrultudaki yerdeğiştirmede %86 ve enine doğrultudaki yerdeğiştirmede %63 oranında artışa sebep olmuştur.

### 3.4. Üç Katlı Betonarme Bina Modelin Hasar Durumlarının Değerlendirilmesi

#### 3.4.1. Hasar 1: 1 Aksı Üzerindeki Duvarda Çatlaklar Oluşması

##### 3.4.1.1. Hasar Varlığının Belirlenmesi

Üç katlı betonarme bina modeli üzerinde ilk hasar durumu olarak, 1. katta 1 aksı üzerindeki tuğla duvarın çatladığı durum dikkate alınmış ve deneysel ölçüm gerçekleştirilmiştir. Bu ölçüm sonucundan, yapıda hasar olup olmadığına karar verebilmek için deneysel ölçümden elde edilen frekanslar ve mod şekilleri kalibre edilmiş analitik modele ait frekanslar ve mod şekilleri ile karşılaştırılmış ve Tablo 3.13'te verilmiştir.

Tablo 3.13. Üç katlı betonarme bina modelde 1 aksındaki duvarın çatlaması hasarı için deneysel ve kalibre edilmiş analitik frekanslar ile MGK değerleri

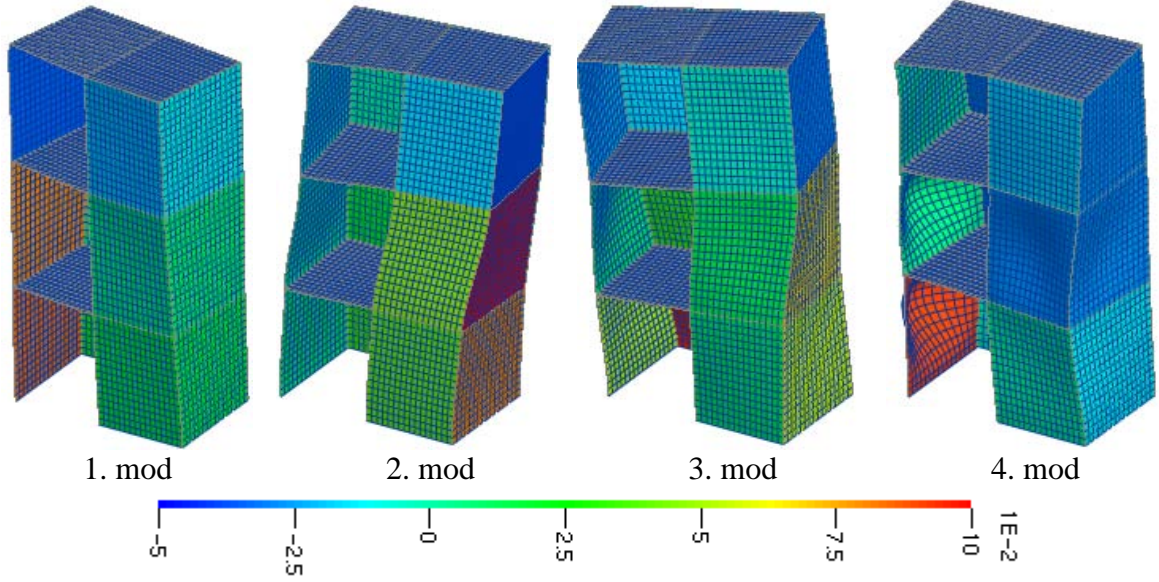
Mod Numarası	Doğal Frekansı(Hz)			Modal Güvence Kriteri
	Deneysel Hasarlı	Analitik Kalibre	Fark (%)	
1	12.712	13.889	9.28	0.903
2	16.526	16.788	1.60	0.808
3	29.350	31.221	6.41	0.829
4	45.242	51.974	14.92	0.652

Tablo 3.13'ten, gerçekleştirilen ölçümden elde edilen frekans değerlerinin kalibre edilmiş analitik değerlerden oldukça farklı olduğu, bazı modlarda farklılığın %15 değerine yaklaştığı görülmektedir. Bu değişimler, üç katlı betonarme modelde hasarın varlığına işaret etmektedir.

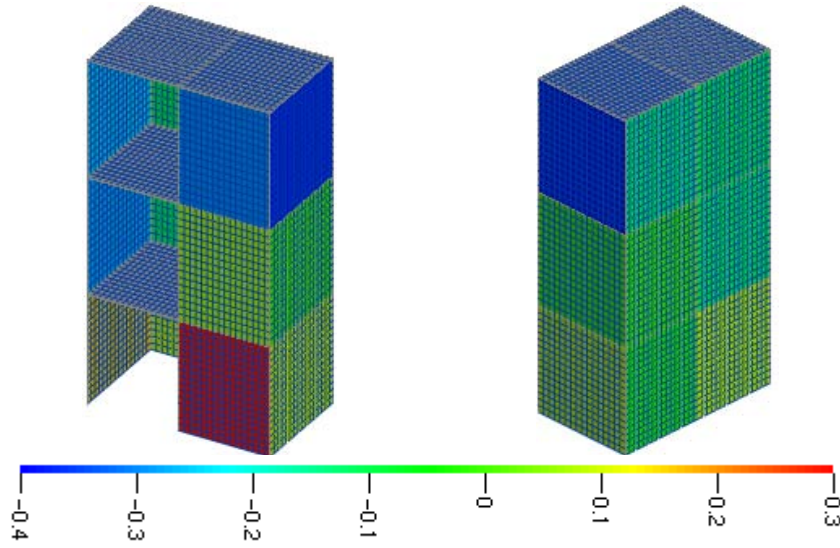
##### 3.4.1.2. Hasar Yerinin Belirlenmesi

Üç katlı betonarme bina modelde oluşturulan hasar etkisinin yerinin belirlenebilmesi amacıyla, kolon ve kiriş elemanlarda kesit ataleti ile duvar elemanlarda kalınlık değerleri değişken alınarak analitik model üzerinde güncelleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Analitik modelin güncellenmesinde, öncelikle tuğla duvarlarda hasar oluşabileceği düşüncesiyle duvar kalınlıklarına daha fazla değişim verilmiştir. Duvar kalınlıklarının modal davranış

üzerindeki etkisi duyarlılık analizi yapılarak belirlenmiş ve her bir mod için Şekil 3.23'te, toplam modal davranış için 3.24'te verilmiştir.

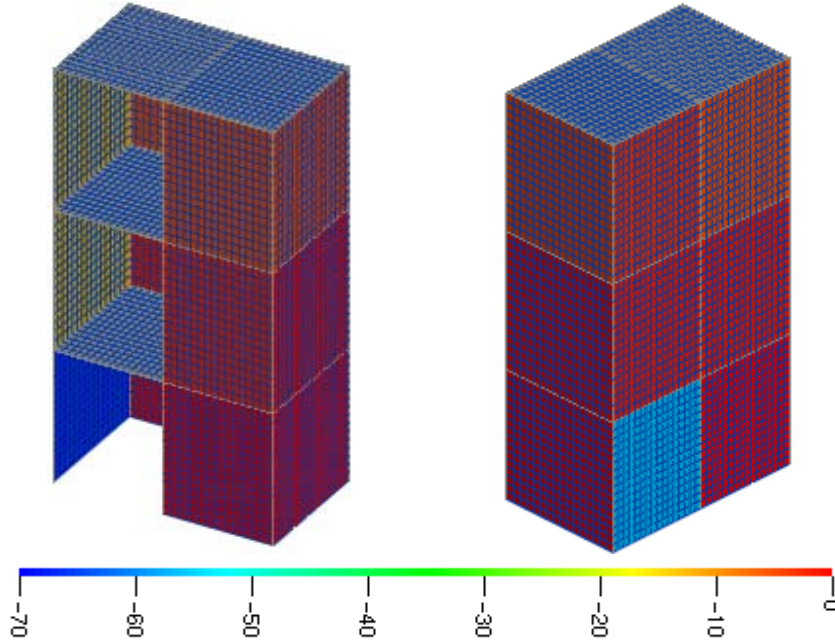


Şekil 3.23. Üç katlı betonarme bina modelde duvar kalınlıklarının her bir mod üzerine etkisi



Şekil 3.24. Üç katlı betonarme bina modelde duvar kalınlıklarının toplam modal davranış üzerindeki etkisi

Üç katlı betonarme bina modelde, seçilen değişkenlere göre gerçekleştirilen adım adım çözümler sonucunda yakınsamanın elde edildiği durumda duvar kalınlıklarının değişimi Şekil 3.25’te verilmektedir.



Şekil 3.25. Üç katlı betonarme bina modelde 1 aksındaki duvarın çatlama hasar durumu için duvar kalınlıklarındaki değişimler

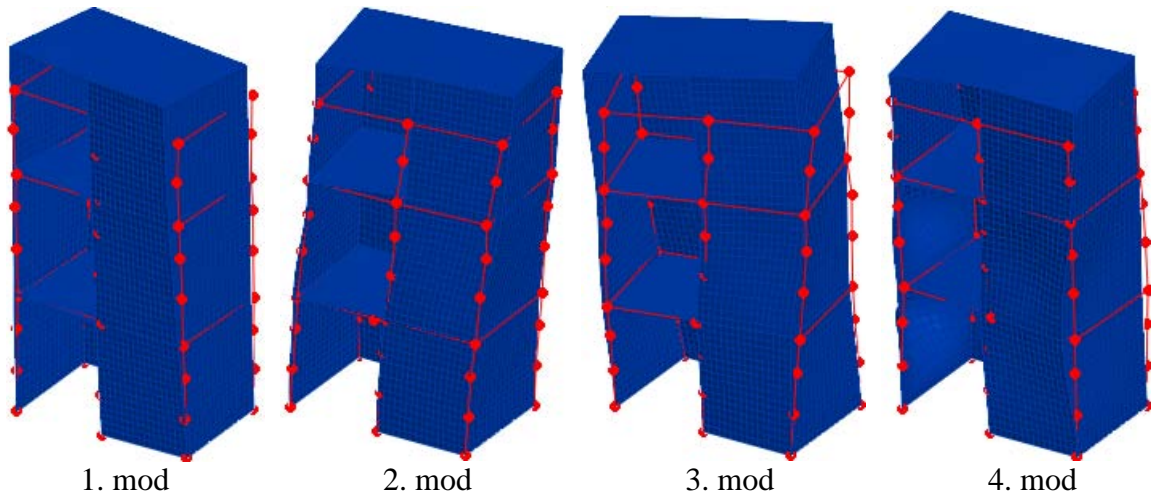
Şekil 3.25’ten üç katlı betonarme bina modelde hasarlı durum için gerçekleştirilen değerlendirme sonucunda, duvar kalınlığındaki azalmanın 1. katta 1 aksı üzerindeki duvarda en fazla olduğu görülmektedir. Gerçek hasar durumu ile karşılaştırıldığında, üç katlı modelde duvar çatlama hasar durumunun oldukça doğru bir şekilde belirlenebildiği ortaya çıkmaktadır. Duvardaki hasarlı durum için güncellenen analitik model üzerinde gerçekleştirilen modal analizden elde edilen sonuçlar ile hasarlı duruma ait deneysel ölçüm sonuçları Tablo 3.14’te karşılaştırmalı olarak verilmektedir.



Tablo 3.14. Üç katlı betonarme bina modelde 1 aksındaki duvarın çatlaması hasarı için deneysel ve analitik frekanslar ile MGK değerleri

Mod Numarası	Doğal Frekansı(Hz)			Modal Güvence Kriteri
	Deneysel Hasarlı	Analitik Hasarlı	Fark (%)	
1	12.712	12.611	0.79	0.903
2	16.526	16.347	1.09	0.834
3	29.350	29.186	0.56	0.855
4	45.242	44.682	1.24	0.798

Analitik modelin bu hasar durumu için güncellenmesi sonucunda elde edilen frekans değerleri ile hasarlı duruma ait deneysel frekans değerleri arasındaki fark %1'lere kadar indirgenebilmiştir. Ayrıca hasarlı durum için deneysel ve analitik mod vektörlerinin eşleştirilmesi sonucunda elde edilen MGK değerlerinin de arttığı gözlemlenmiştir. Şekil 3.26'da bu hasar durumu için üç katlı modelin deneysel ve analitik mod şekilleri verilmektedir.



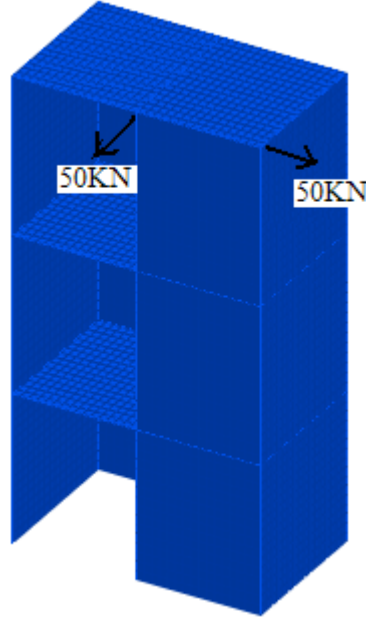
Şekil 3.26. Üç katlı betonarme bina modelde 1 aksındaki duvarın çatlaması hasar durumu için deneysel ve analitik mod şekilleri

### 3.4.1.3. Hasarın Betonarme Bina Davranışına Etkisinin Belirlenmesi

Üç katlı betonarme bina modelde dolgu duvar çatlaması hasarının yapı davranışına etkisini belirleyebilmek amacıyla, kalibre edilmiş ve bu hasar durumu için güncellenmiş analitik modeller üzerinde Şekil 3.27'de gösterilen yükleme durumları için statik analizler

gerçekleştirilmiştir. Yükler, modelin en üst kat seviyesinde enine ve boyuna doğrultularda uygulanmıştır.

Bu yükleme durumu için gerçekleştirilen statik analizlerden, boyuna doğrultudaki maksimum yerdeğişmeler kalibre edilmiş durumda 1.938mm ve hasarlı durumda 2.196mm olarak; enine doğrultuda ise kalibre edilmiş durumda 1.607mm ve hasarlı durumda 1.884mm olarak elde edilmiştir.



Şekil 3.27. Üç katlı betonarme bina modeli üzerinde statik yükleme durumu

### 3.4.2. Hasar 2: 1 Aksı Üzerindeki Duvarın Tamamen Göçmesi

#### 3.4.2.1. Hasar Varlığının Belirlenmesi

Üç katlı betonarme model üzerinde ikinci hasar durumu olarak, ilk durumda hasar gören duvarın tamamen yıkıldığı varsayılmış ve ölçümler gerçekleştirilmiştir. Bu hasar durumunun değerlendirmesinde, bir önceki hasar durumu baz alınarak değerlendirme yapılmıştır. Bu hasar durumu için ölçülen frekanslar ve mod şekilleri ile hasar öncesi analitik modele ait frekanslar ve mod şekillerinin karşılaştırılması sonucunda elde edilen değerler Tablo 3.15'te verilmektedir.

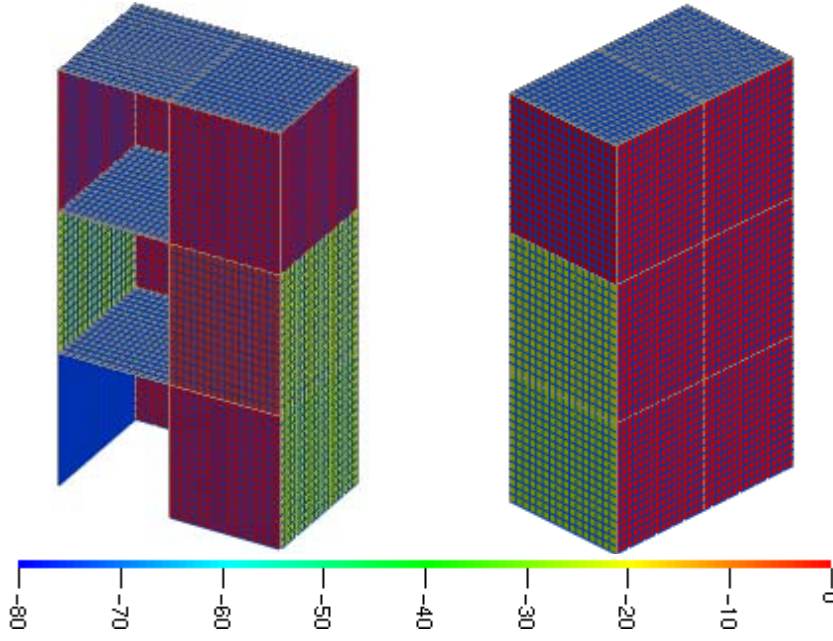
Tablo 3.15. Üç katlı betonarme bina modelde 1 aksındaki duvarın yıkılması hasar durumu için deneysel ve hasar öncesi analitik frekanslar ile MGK değerleri

Mod Numarası	Doğal Frekansı(Hz)			Modal Güvence Kriteri
	Deneysel Hasarlı	Analitik Hasar öncesi	Fark (%)	
1	10.863	12.611	16.09	0.995
2	15.954	16.347	2.46	0.989
3	26.417	29.186	10.48	0.989
4	40.011	44.682	11.67	---

Tablo 3.15'ten, deneysel ve analitik frekanslar arasındaki farkların önemli düzeyde arttığı ve farklılığın bazı modlarda %16 değerinde olduğu görülmektedir. Bu değişimler, üç katlı bina modelde yeni hasar etkilerinin oluştuğuna işaret etmektedir.

#### 3.4.2.2. Hasar Yerinin Belirlenmesi

Üç katlı betonarme bina modelde yeni oluşturulan hasarın yerini tahmin edebilmek amacıyla, önceki hasar durumu için geliştirilen analitik model bu hasar durumuna ait deneysel sonuçlar dikkate alınarak tekrar güncellenmiştir. Analitik modelde kolonlarda ve kirişlerde kesit ataleti ve duvarlarda kalınlık değişken alınarak gerçekleştirilen adım adım çözümler sonucunda yakınsamanın elde edildiği durum belirlenmiş ve Şekil 3.28'de verilmiştir.



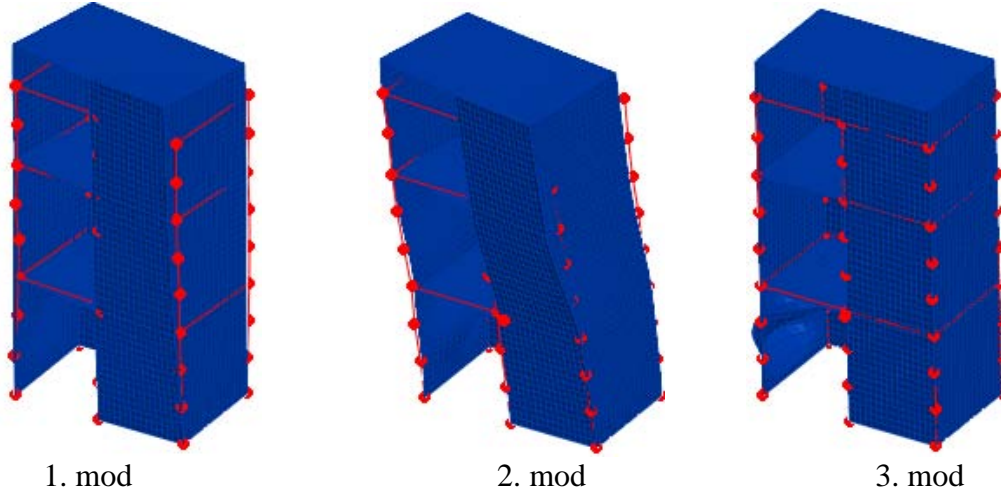
Şekil 3.28. Üç katlı betonarme bina modelde 1 aksındaki duvarın tamamen yıkılması hasar durumu için duvar kalınlıklarındaki değişimler

Şekil 3.28'de gösterilen üç katlı betonarme bina modelde bu hasar durumu için gerçekleştirilen değerlendirmeden, kalınlıktaki en fazla azalmanın 1. katta daha önce hasar gören duvarda olduğu görülmektedir. Elde edilen sonuç gerçek hasar durumu ile oldukça iyi bir şekilde örtüşmektedir. Tablo 3.16'da bu hasar durumuna ait analitik modelden elde edilen frekanslar ile deneysel frekanslar verilmektedir.

Tablo 3.16. Üç katlı betonarme bina modelde duvarın göçmesi hasarı için deneysel ve analitik frekanslar ile MGK değerleri

Mod Numarası	Doğal Frekansı(Hz)			Modal Güvence Kriteri
	Deneysel Hasarlı	Analitik Hasarlı	Fark (%)	
1	10.863	10.921	0.53	0.931
2	15.954	15.721	1.47	0.779
3	26.417	26.538	0.46	0.815

Analitik modelin güncellenmesi sonucunda, analitik ve deneysel frekans değerleri arasındaki fark maksimum %1.47'ye kadar indirgenmiştir. Şekil 3.29'da bu hasar durumu için üç katlı betonarme modelin deneysel ve analitik mod şekilleri verilmektedir.



Şekil 3.29. Üç katlı betonarme bina modelde 1 aksındaki duvarın yıkılması hasar durumu için deneysel ve analitik mod şekilleri

### 3.4.2.3. Hasarın Betonarme Bina Davranışına Etkisinin Belirlenmesi

Üç katlı betonarme bina modelde, ilk durumda hasar gören duvarın tamamen göçmesi durumu için güncellenen analitik modelin Şekil 3.27’de gösterilen yükleme durumu için statik analizi gerçekleştirilmiştir. Duvarın tamamen göçmesi durumunda, yerdeğiştirme değerleri boyuna doğrultuda 2.544mm ve enine doğrultuda 2.320mm olarak elde edilmiştir.

### 3.4.3. Hasar 3: 2 ve 3 Aksları Arasındaki Duvarın Tamamen Göçmesi

#### 3.4.3.1. Hasar Varlığının Belirlenmesi

Üç katlı betonarme model üzerinde üçüncü hasar durumu olarak, boyuna doğrultuda A aksı üzerindeki duvarın tamamen yıkıldığı durum dikkate alınmış ve deneysel ölçüm gerçekleştirilmiştir. Bu hasar durumunun değerlendirmesinde bir önceki hasarlı durum için geliştirilen analitik model baz alınmış, ayrıca tamamen göçtüğü varsayılan duvar analitik modelden kaldırılmıştır. Bu hasar durumu için ölçülen frekanslar ve mod şekilleri ile hasar öncesi analitik frekanslar ve mod şekilleri Tablo 3.17’de verilmektedir.

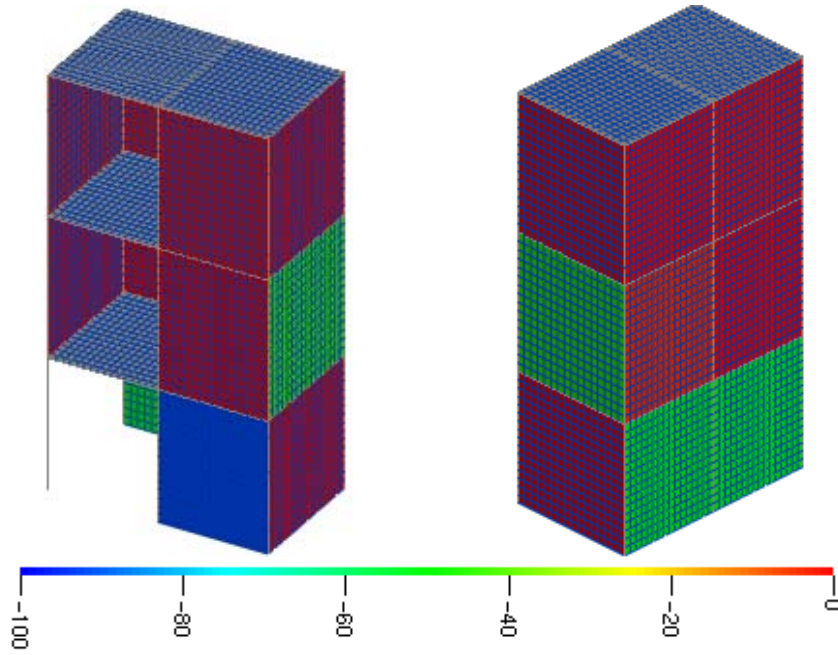
Tablo 3.17. Üç katlı betonarme bina modelde tuğla duvar yıkılması hasarı için deneysel ve hasar öncesi analitik frekanslar ile MGK değerleri

Mod Numarası	Doğal Frekansı(Hz)			Modal Güvence Kriteri
	Deneysel Hasarlı	Analitik Hasar öncesi	Fark (%)	
1	8.584	10.921	27.22	0.995
2	14.387	15.721	9.27	0.989
3	22.516	26.538	17.86	0.989

Tablo 3.17'den deneysel ve analitik frekanslar arasındaki farkların arttığı ve farklılığın bazı modlarda %27 değerinde olduğu görülmektedir. Bu değişimler üç katlı bina modelde yeni hasar etkilerinin varlığına işaret etmektedir.

#### 3.4.3.2. Hasar Yerinin Belirlenmesi

Üç katlı betonarme bina modelde yeni oluşturulan hasarın yerini tahmin edebilmek amacıyla, önceki hasar durumu için güncellenen analitik model üzerinde bu hasar durumuna ait deneysel ölçüm sonuçları dikkate alınarak güncelleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Modelde kesit ataleti ve duvar kalınlığı değişken alınarak gerçekleştirilen adım adım çözümler sonucunda yakınsamanın elde edildiği durum Şekil 3.30'da verilmektedir.



Şekil 3.30. Üç katlı betonarme bina modelde 2 ve 3 aksları arasındaki duvarın tamamen göçmesi hasarı için duvar kalınlıklarının değişimi

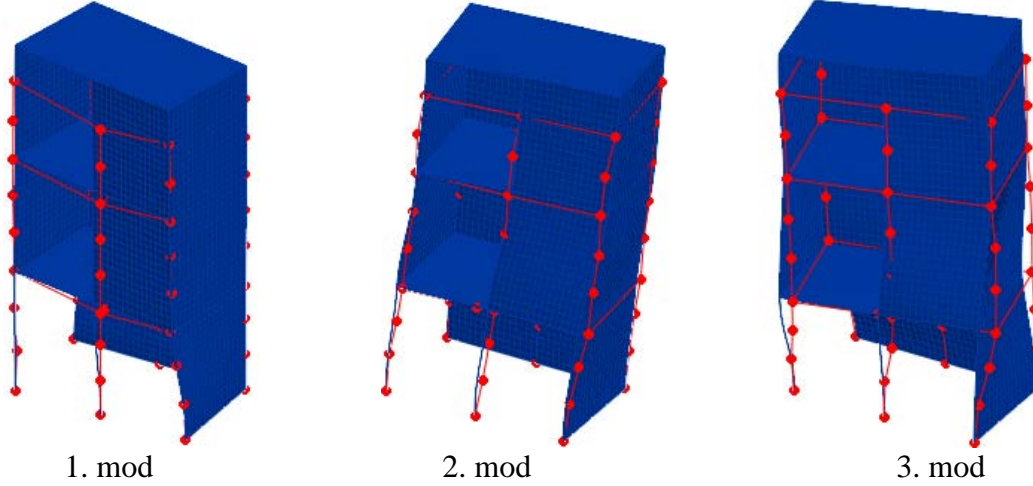
Şekil 3.30'dan üç katlı betonarme bina modelde hasarlı durum için gerçekleştirilen değerlendirmeden, en fazla azalmanın 1. katta A aksı üzerinde 2 ve 3 aksları arasındaki duvarın kalınlığında olduğu belirlenmiştir. Elde edilen sonuç gerçek hasar durumu ile karşılaştırıldığında hasar yerlerinin örtüştüğü görülmektedir. Tablo 3.18'de bu hasar durumuna ait analitik modelden elde edilen frekans değerleri ile deneysel frekans değerleri verilmektedir.

Tablo 3.18. Üç katlı betonarme bina modelde 2 ve 3 aksları arasındaki duvarın göçmesi hasarı için deneysel ve analitik frekanslar ile MGK değerleri

Mod Numarası	Doğal Frekansı(Hz)			Modal Güvence Kriteri
	Deneysel Hasarlı	Analitik Hasarlı	Fark (%)	
1	8.584	8.617	0.38	0.995
2	14.387	14.306	0.56	0.989
3	22.516	22.265	1.11	0.989

Analitik modelin bu hasar durumu için güncellenmesi sonucunda elde edilen frekans değerleri ile deneysel frekans değerleri arasındaki fark maksimum %1.11'e kadar

indirgenebilmiştir. Şekil 3.31’de bu hasar durumu için üç katlı betonarme bina modelin deneysel ve analitik mod şekilleri verilmektedir.



Şekil 3.31. Üç katlı betonarme bina modelde 2 ve 3 aksları arasındaki duvarın göçmesi hasarı için deneysel ve analitik mod şekilleri

#### 3.4.3.3. Hasarın Betonarme Bina Davranışına Etkisinin Belirlenmesi

Üç katlı betonarme bina modelde A aksı üzerinde 2 ve 3 aksları arasındaki duvarın tamamen göçmesi durumunun yapı davranışına olan etkisini belirlemek amacıyla, bu hasar durumu için güncellenen analitik model üzerinde Şekil 3.27’de gösterilen yükleme durumu için analiz yapılmıştır. Gerçekleştirilen statik analizden, maksimum yerdeğiştirme değerleri boyuna doğrultudaki 3.907mm ve enine doğrultuda ise 3.358mm olarak hesaplanmıştır.

#### 3.4.4. Hasar 4: 1. Kattaki Bütün Duvarların Tamamen Göçmesi

##### 3.4.4.1. Hasar Varlığının Belirlenmesi

Üç katlı betonarme model üzerinde dördüncü hasar durumu olarak bütün duvarların tamamen yıkıldığı varsayılmıştır. Hasar değerlendirmesinde bir önceki hasarlı durum baz alınarak değerlendirme yapılmış ve tamamen hasar gören duvarlar analitik modelden çıkarılmıştır. Bu hasar durumu için deneysel ölçümden elde edilen frekanslar ve mod şekilleri ile hasar öncesi analitik frekanslar ve mod şekilleri Tablo 3.19’da verilmektedir.



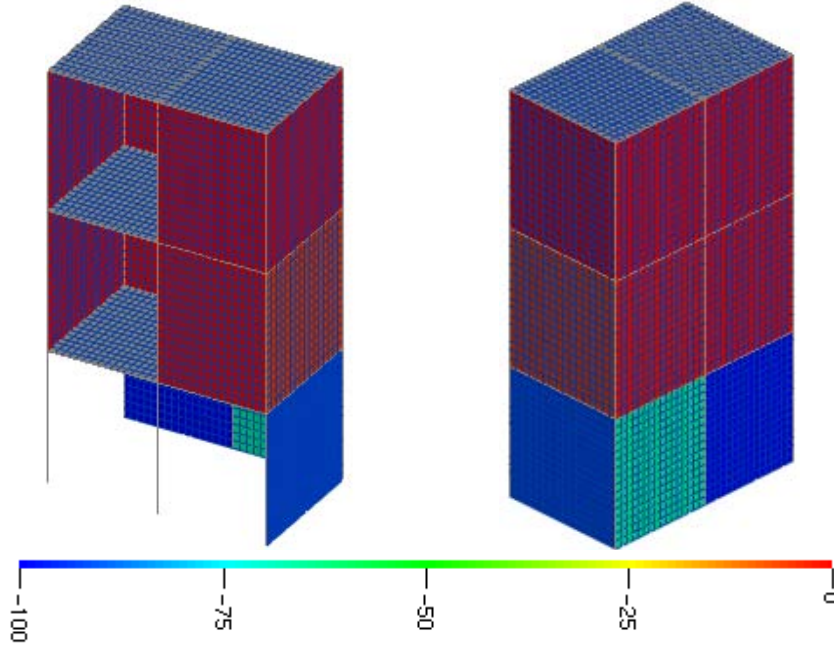
Tablo 3.19. Üç katlı betonarme bina modelde 1. kattaki bütün duvar yıkılması hasar durumu için deneysel ve hasar öncesi analitik frekanslar ile MGK değerleri

Mod Numarası	Doğal Frekansı(Hz)			Modal Güvence Kriteri
	Deneysel Hasarlı	Analitik Hasar öncesi	Fark (%)	
1	6.283	8.617	37.15	0.995
2	7.440	14.306	92.28	0.989
3	9.303	22.265	139.33	0.989

Tablo 3.19'dan deneysel ve analitik frekanslar arasındaki farkların aşırı düzeyde arttığı görülmektedir. Bu değişimler betonarme bina modelde yeni hasar etkilerine işaret etmektedir.

#### 3.4.4.2. Hasar Yerinin Belirlenmesi

Üç katlı betonarme bina modelde yeni oluşturulan hasarın yerini tahmin edebilmek amacıyla, önceki hasar durumu için güncellenen analitik model hasarlı duruma ait deneysel sonuçlara göre tekrar güncellenmiştir. Daha önceki işlemlere benzer şekilde gerçekleştirilen adım adım çözümler sonucunda yakınsamanın elde edildiği durum Şekil 3.32'de verilmektedir.



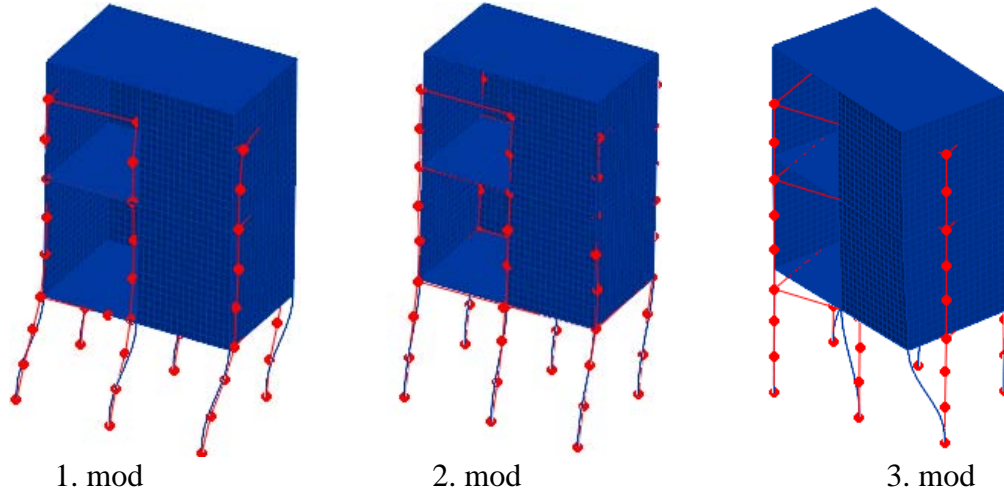
Şekil 3.32. Üç katlı betonarme bina modelde 1. kattaki dolgu duvarların tamamen göçmesi hasarı için duvar kalınlıklarının değişimi

Şekil 3.33'ten üç katlı betonarme bina modelde hasarlı durum için gerçekleştirilen değerlendirmeden, duvar kalınlıklarındaki azalmanın diğer katlara göre 1. katta daha fazla olduğu belirlenmiştir. Elde edilen sonuç gerçek hasar durumu ile örtüşmektedir. Tablo 3.20'de bu hasar durumuna ait analitik modelden elde edilen frekans değerleri ile deneysel frekans değerleri verilmektedir.

Tablo 3.20. Üç katlı betonarme bina modelde 1. kattaki bütün duvarların göçmesi hasarı için deneysel ve analitik frekanslar ile MGK değerleri

Mod Numarası	Doğal Frekansı(Hz)			Modal Güvence Kriteri
	Deneysel Hasarlı	Analitik Hasarlı	Fark (%)	
1	6.283	6.276	0.11	0.835
2	7.440	7.411	0.39	0.993
3	9.303	9.279	0.26	---

Analitik modelin bu hasar durumu için güncellenmesi sonucunda elde edilen frekans değerleri ile deneysel frekans değerleri arasındaki fark maksimum %0.39'ye kadar indirgenebilmiştir. Şekil 3.33'te bu hasar durumu için deneysel ve analitik mod şekilleri verilmektedir.



Şekil 3.33. Üç katlı betonarme bina modelde 1. kattaki bütün duvarların göçmesi hasarı için deneysel ve analitik mod şekilleri

#### 3.4.4.3. Hasarın Betonarme Bina Davranışına Etkisinin Belirlenmesi

Üç katlı betonarme bina modelde 1. kattaki bütün duvarların tamamen göçmesi durumu için güncellenen analitik modelin Şekil 3.27'deki yükleme durumu için gerçekleştirilen statik analizinden, maksimum yerdeğiştirmeler boyuna doğrultuda 4.557mm ve enine doğrultuda 3.317mm olarak elde edilmiştir.

#### 3.4.5. Hasar 5: A-1 Kolonu Üst Ucunda Kabuk Betonu Hasarı

##### 3.4.5.1. Hasar Varlığının Belirlenmesi

Üç katlı betonarme modelde dolgu duvar hasarlarından sonra kolonlarda hasarlar oluştuğu varsayılarak A ve 1 akslarının çakıştığı yerdeki kolonun üst ucu kabuk betonuna hasar verilmiş ve deneysel ölçüm gerçekleştirilmiştir. Bu durum için gerçekleştirilen ölçümden elde edilen frekans değerleri ile analitik frekans değerleri Tablo 3.21'de verilmektedir.

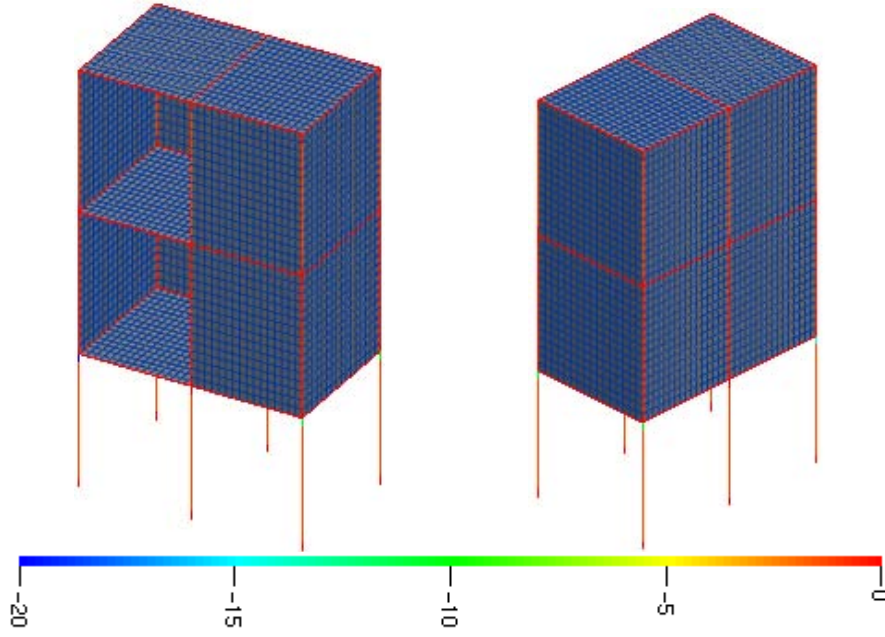
Tablo 3.21. Üç katlı betonarme bina modelde A-1 kolonu üst ucu kabuk betonu hasarı için deneysel ve hasar öncesi analitik frekanslar ile MGK değerleri

Mod Numarası	Doğal Frekansı(Hz)			Modal Güvence Kriteri
	Deneysel Hasarlı	Analitik Hasar öncesi	Fark (%)	
1	6.190	6.276	1.40	0.245
2	7.389	7.411	0.30	0.989
3	9.161	9.279	1.29	0.651

Tablo 3.21'den deneysel ve analitik frekanslar arasındaki farkların arttığı görülmektedir. Bu değişimler, betonarme bina modelde yeni hasarların varlığına işaret etmektedir.

#### 3.4.5.2. Hasar Yerinin Belirlenmesi

Üç katlı betonarme bina modelde yeni oluşturulan hasarın yerini tahmin edebilmek amacıyla, önceki hasar durumu için geliştirilen analitik model hasarlı duruma ait deneysel sonuçlar dikkate alınarak tekrar güncellenmiştir. Analitik modelde kolon ve kirişlerin kesit atalet değerleri değişken alınarak gerçekleştirilen adım adım çözümler sonucunda yakınsamanın elde edildiği durum Şekil 3.34'te verilmektedir.



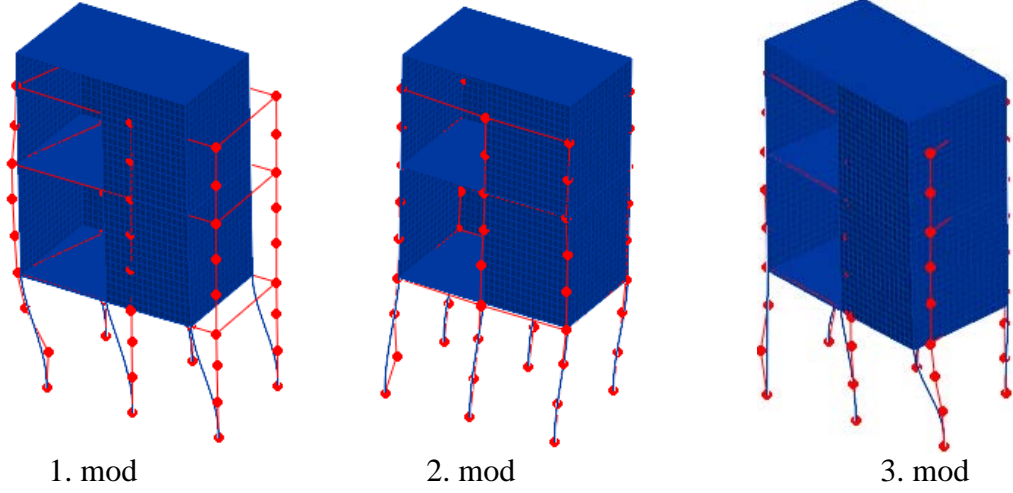
Şekil 3.34. Üç katlı betonarme bina modelde A-1 kolun üst ucu kabuk betonu hasar durumu için atalet değerindeki değişimler

Şekil 3.34'ten üç katlı betonarme bina modelde hasarlı durum için gerçekleştirilen değerlendirmeden, kesit ataletinde değişimin en fazla olduğu elemanlar A-1 kolunu üst ucu olarak belirlenmiştir. Tablo 3.22'de bu hasar durumuna ait analitik modelden elde edilen frekans değerleri ile deneysel frekans değerleri verilmektedir.

Tablo 3.22. Üç katlı betonarme bina modelde A-1 kolunu üst ucu kabuk betonu hasarı için deneysel ve analitik frekanslar ile MGK değerleri

Mod Numarası	Doğal Frekansı(Hz)			Modal Güvence Kriteri
	Deneysel Hasarlı	Analitik Hasarlı	Fark (%)	
1	6.190	6.186	0.07	0.247
2	7.389	7.363	0.36	0.988
3	9.161	9.163	0.03	0.644

Analitik modelin güncellenmesi sonucunda elde edilen frekans değerleri ile deneysel frekans değerleri arasındaki fark maksimum %0.36'ye kadar indirgenebilmiştir. Şekil 3.35'te bu hasarı durumu için deneysel ve analitik mod şekilleri verilmektedir.



Şekil 3.35. Üç katlı betonarme bina modelde kolon üst ucu kabuk betonu hasarı için deneysel ve analitik mod şekilleri

### 3.4.5.3. Hasarın Betonarme Bina Davranışına Etkisinin Belirlenmesi

A-1 kolonunun üst ucundaki kabuk betonunda oluşan hasarının yapı davranışına etkisini belirleyebilmek amacıyla, analitik model üzerine Şekil 3.27’de gösterilen statik yükleme durumu uygulanmıştır. Bu yükleme durumu altında A-1 kolonu üst ucu hasarı için, maksimum yerdeğiştirmeler boyuna doğrultuda 6.147mm ve enine doğrultuda 3.834mm olarak elde edilmiştir.

### 3.4.6. Hasar 6: B-1 Kolonu Üst Ucunda Kabuk Betonu Hasarı

#### 3.4.6.1. Hasar Varlığının Belirlenmesi

Üç katlı betonarme modelde kolonlarda ikinci olarak, B-1 kolonu üst ucu kabuk betonuna hasar verilmiş ve deneysel ölçümler gerçekleştirilmiştir. Bu hasar durumu için gerçekleştirilen ölçümden elde edilen frekanslar ve mod şekilleri ile hasar öncesi analitik frekanslar ve mod şekilleri karşılaştırılmış ve Tablo 3.23’te verilmiştir.

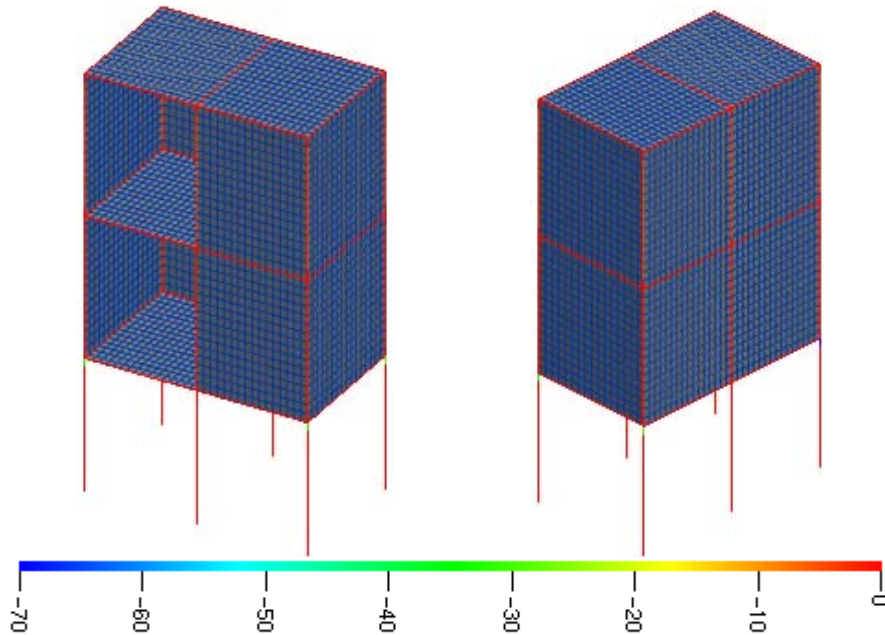
Tablo 3.23. Üç katlı betonarme bina modelde B-1 kolonu üst ucu kabuk betonu hasarı için deneysel ve hasar öncesi analitik frekanslar ile MGK değerleri

Mod Numarası	Doğal Frekansı(Hz)			Modal Güvence Kriteri
	Deneysel Hasarlı	Analitik Hasar öncesi	Fark (%)	
1	6.041	6.186	2.40	0.465
2	7.226	7.363	1.90	0.968
3	8.837	9.163	3.69	0.484

Tablo 3.23'ten deneysel ve analitik frekanslar arasındaki farkların artması, betonarme bina modelde yeni hasarların varlığına işaret etmektedir.

### 3.4.6.2. Hasar Yerinin Belirlenmesi

Üç katlı betonarme bina modelde B-1 kolonu üst ucu kabuk betonu hasarının yerini tahmin edebilmek amacıyla, önceki hasar durumu için güncellenen analitik model bu hasar durumuna ait deneysel sonuçlar dikkate alınarak tekrar güncellenmiştir. Analitik modelde kolon ve kirişlerin kesit atalet değerleri değişken alınarak gerçekleştirilen adım adım çözümler sonucunda yakınsamanın elde edildiği durum Şekil 3.36'da verilmektedir.



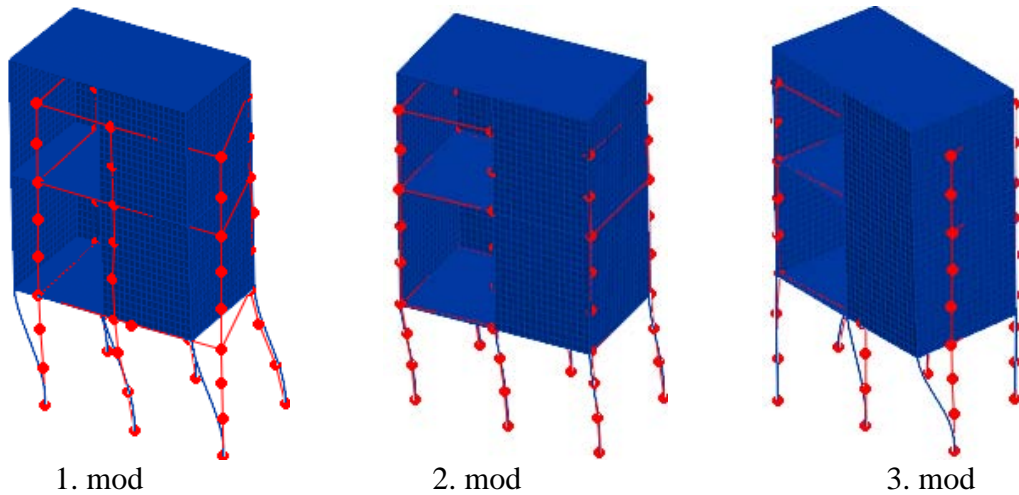
Şekil 3.36. Üç katlı betonarme bina modelde B-1 kolonu üst ucu kabuk betonu hasar durumu için atalet değerindeki değişimler

Üç katlı betonarme bina modele ait hasarlı durum için gerçekleştirilen değerlendirmeden, kesit ataletinde değişimin en fazla olduğu elemanlar B-1 kolonu üst ucu olarak belirlenmiştir. Gerçek hasar durumu ile karşılaştırıldığında, hasar yerinin oldukça doğru bir şekilde belirlenebildiği ortaya çıkmaktadır. Tablo 3.24'te bu hasar durumuna ait analitik modelden elde edilen frekans değerleri ile deneysel frekans değerleri verilmektedir.

Tablo 3.24. Üç katlı betonarme bina modelde B-1 kolonu üst ucu kabuk betonu hasarı için deneysel ve analitik frekanslar ile MGK değerleri

Mod Numarası	Doğal Frekansı(Hz)			Modal Güvence Kriteri
	Deneysel Hasarlı	Analitik Hasarlı	Fark (%)	
1	6.041	6.029	0.20	0.471
2	7.226	7.199	0.37	0.991
3	8.837	8.828	0.10	0.445

Analitik modelin güncellenmesi sonucunda elde edilen frekans değerleri ile deneysel frekans değerleri arasındaki fark maksimum %0.37'ye kadar indirgenebilmiştir. Şekil 3.37'de hasarlı durum için deneysel ve analitik mod şekilleri verilmektedir.



Şekil 3.37. Üç katlı betonarme bina modelde B-1 kolonu üst ucu kabuk betonu hasarı için deneysel ve analitik mod şekilleri



### 3.4.6.3. Hasarın Betonarme Bina Davranışına Etkisinin Belirlenmesi

Üç katlı betonarme modelde oluşturulan hasarın yapı davranışına etkisini belirleyebilmek amacıyla, hasarlı durum için güncellenen analitik model üzerinde Şekil 3.27’de tanımlanan yükleme durumu için statik analizler gerçekleştirilmiştir. Bu hasar durumu için maksimum yerdeğiştirme değerleri, boyuna doğrultuda 6.735mm ve enine doğrultuda 4.247mm olarak elde edilmiştir.

### 3.4.7. Hasar 7: A-1 Kolonu Üst Ucu Çekirdek Betonu Hasarı

#### 3.4.7.1. Hasar Varlığının Belirlenmesi

Üç katlı betonarme modelde son olarak A-1 kolonu üst ucu çekirdek betonu hasar durumu oluşturulmuş ve deneysel ölçümler gerçekleştirilmiştir. Bu durum için gerçekleştirilen ölçümden elde edilen frekanslar ve mod şekilleri ile hasar öncesi analitik frekanslar ve mod şekilleri karşılaştırılmış ve Tablo 3.25’te verilmiştir.

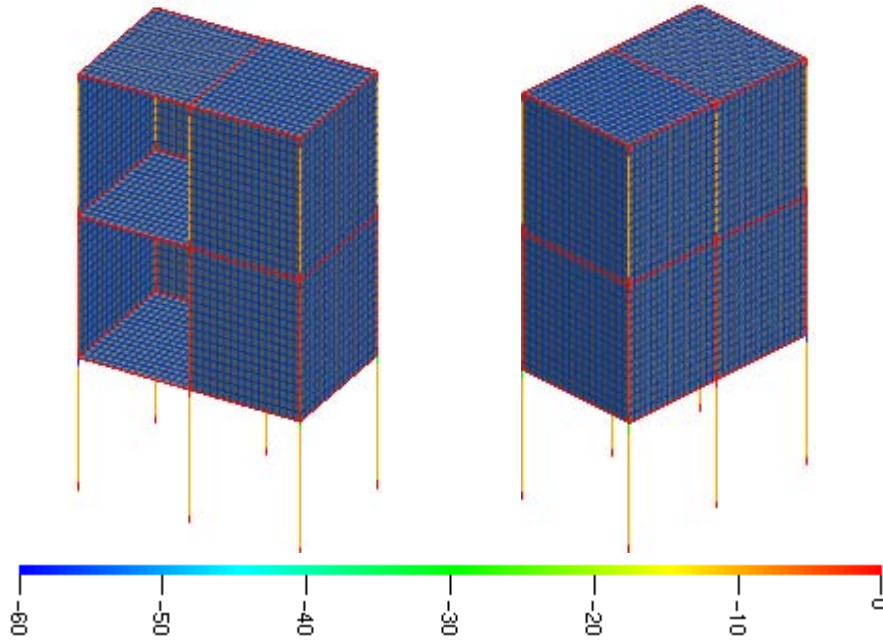
Tablo 3.25. Üç katlı betonarme bina modelde A-1 kolon üst ucu çekirdek betonu hasarı için deneysel ve hasar öncesi analitik frekanslar ile MGK değerleri

Mod Numarası	Doğal Frekansı(Hz)			Modal Güvence Kriteri
	Deneysel Hasarlı	Analitik Hasar öncesi	Fark (%)	
1	5.545	6.029	8.73	0.266
2	6.790	7.199	6.02	0.886
3	8.055	8.828	9.60	0.909

Tablo 3.25’ten deneysel ve analitik frekanslar arasındaki farkların arttığı ve farklılığın bazı modlarda %10'lara varan farklılıklar oluşturduğu görülmektedir. Bu değişimler betonarme modelde yeni hasarlar oluştuğuna işaret etmektedir.

### 3.4.7.2. Hasar Yerinin Belirlenmesi

Üç katlı betonarme bina modelde son olarak oluşturulan hasarın yerini tahmin edebilmek amacıyla, önceki hasar durumuna göre güncellenmiş analitik model hasarlı duruma ait deneysel sonuçlar dikkate alınarak tekrar güncellenmiştir. Analitik modelde kolon ve kirişlerin kesit atalet değerleri değişken alınarak gerçekleştirilen adım adım çözümler sonucunda yakınsamanın elde edildiği durum Şekil 3.38’de verilmektedir.



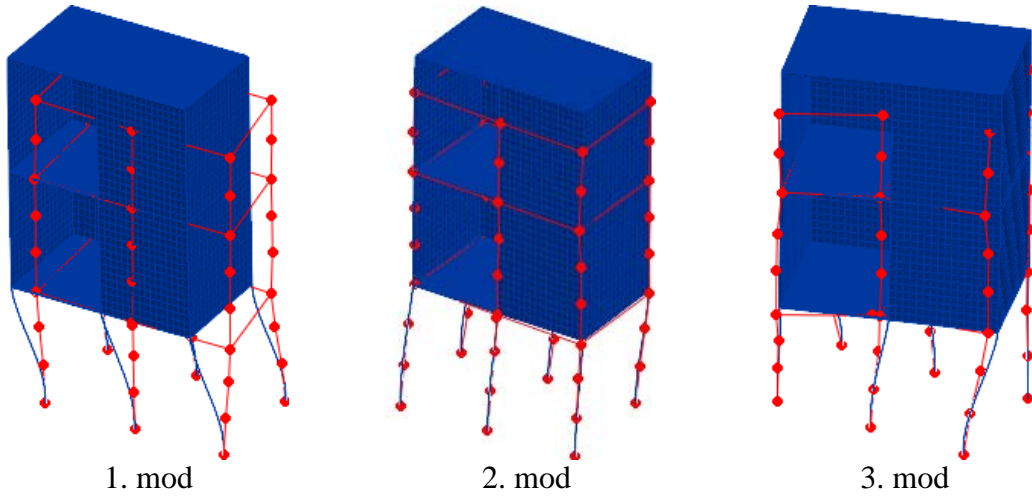
Şekil 3.38. Üç katlı betonarme bina modelde B-1 kolon üst ucunda çekirdek betonu hasar durumu için atalet değerindeki değişimler

Üç katlı betonarme bina modelde hasarlı durum için gerçekleştirilen değerlendirmeden, kesit ataletinde değişimin en fazla olduğu elemanlar A-1 kolonu üst ucu olarak belirlenmiştir. Gerçek hasar durumu ile karşılaştırıldığında, hasar yerinin oldukça doğru bir şekilde belirlenebildiği ortaya çıkmaktadır. Tablo 3.26’da bu hasar durumuna ait analitik modelden elde edilen frekans değerleri ile deneysel frekans değerleri verilmektedir.

Tablo 3.26. Üç katlı betonarme bina modelde A-1 kolonu üst ucu çekirdek betonu hasarı için deneysel ve analitik frekanslar ile MGK değerleri

Mod Numarası	Doğal Frekansı(Hz)			Modal Güvence Kriteri
	Deneysel Hasarlı	Analitik Hasarlı	Fark (%)	
1	5.545	5.548	0.05	0.267
2	6.790	6.794	0.06	0.949
3	8.055	8.058	0.03	0.907

Analitik modelin güncellenmesi sonucunda elde edilen frekans değerleri ile deneysel frekans değerleri arasındaki fark maksimum %0.06'ya kadar indirgenebilmiştir. Şekil 3.39'da bu hasar durumu için deneysel ve analitik mod şekilleri verilmektedir.



Şekil 3.39. Üç katlı betonarme bina modelde A-1 kolonu üst ucu çekirdek betonu hasarı için deneysel ve analitik mod şekilleri

### 3.4.7.3. Hasarın Betonarme Bina Davranışına Etkisinin Belirlenmesi

Kolon üst ucunda oluşturulan çekirdek betonu hasarının yapı davranışına etkisini belirleyebilmek amacıyla, analitik modeller üzerinde daha önce tanımlanan yükleme durumu için statik analizler gerçekleştirilmiştir. Bu hasar durumu için maksimum yerdeğiştirmeler, boyuna doğrultuda 8.362mm ve enine doğrultuda 5.181mm olarak elde edilmiştir.

Üç katlı betonarme bina modeli üzerinde oluşturulan hasar durumları genel olarak değerlendirildiğinde, duvarlarda hasar oluşması durumunda boyuna yerdeğiştirme boyuna doğrultuda %135 ve enine doğrultuda %106 düzeyinde artmıştır. Hasarların kolonlarda oluşması durumunda ise yerdeğiştirmeler boyuna doğrultuda %83.5 ve enine doğrultuda %56.2 düzeyinde artmıştır.

### 3.5. Köprü Modelin Hasar Durumunun Değerlendirilmesi

#### 3.5.1. Kolon Üst Ucu Kesit Azalması Hasarı

##### 3.5.1.1. Hasar Varlığının Belirlenmesi

Köprü modelde ilk hasar durumu olarak sol taraftaki kolonun üst ucunda kesit zayıflatılması durumu dikkate alınmış ve ölçümler gerçekleştirilmiştir. Bu hasar durumu için gerçekleştirilen ölçümden elde edilen frekans değerleri, köprü modelin kalibre edilmiş analitik frekans değerleri ile karşılaştırılarak hasar olup olmadığına karar verilmiştir. Tablo 3.27’de hasarlı durum için deneysel ve kalibre edilmiş analitik frekans değerleri verilmektedir.

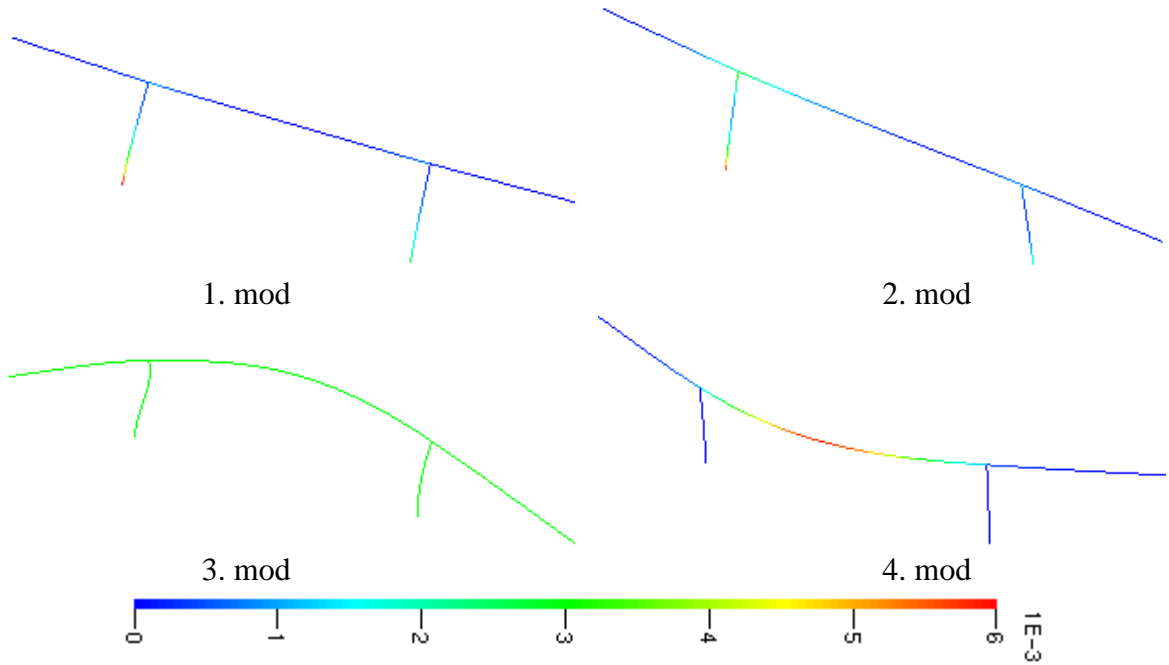
Tablo 3.27. Köprü modelde kolon üst ucu hasar durum için deneysel ve kalibre edilmiş analitik frekanslar ile MGK değerleri

Mod Numarası	Doğal Frekansı(Hz)			Modal Güvence Kriteri
	Deneysel Hasarlı	Analitik Kalibre	Fark (%)	
1	23.809	23.621	0.79	0.914
2	27.502	27.246	0.93	0.918
3	38.727	40.087	3.51	0.916
4	50.304	44.621	11.30	---
5	52.972	53.805	1.57	0.984

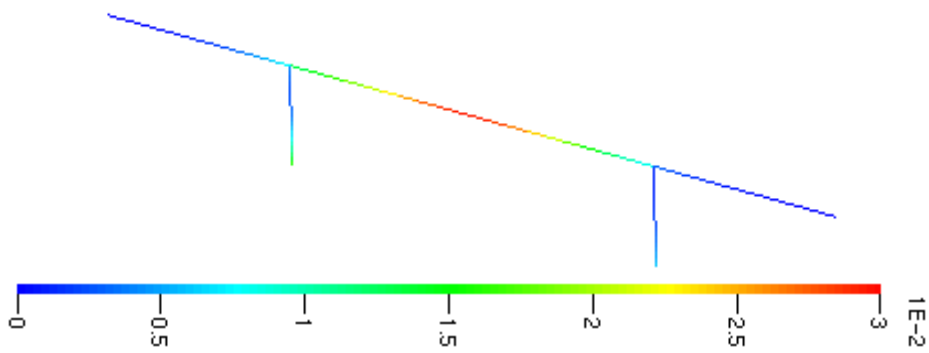
Tablo 3.27’den deneysel ve analitik frekanslar arasındaki farkların kalibre edilmiş duruma göre arttığı görülmektedir. Bu değişimler köprü modelde hasarın varlığına işaret etmektedir.

### 3.5.1.2. Hasar Yerinin Belirlenmesi

Köprü modelde hasar yerinin tahmin edilebilmesi amacıyla, analitik model üzerinde kesit atalet değeri değişken alınarak güncelleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlemde, köprü modelin bütün elemanlarında kesit ataletindeki değişimler için amaç fonksiyonunun sağlanması hedeflenmiştir. Kesit ataleti değişimlerinin amaç fonksiyonu üzerindeki etkisi duyarlılık analizi yapılarak belirlenmiştir. Köprü modelde kesit ataletinin modal davranıştaki etkisi her bir mod için Şekil 3.40'ta, toplam modal davranış için Şekil 3.41'de verilmektedir.

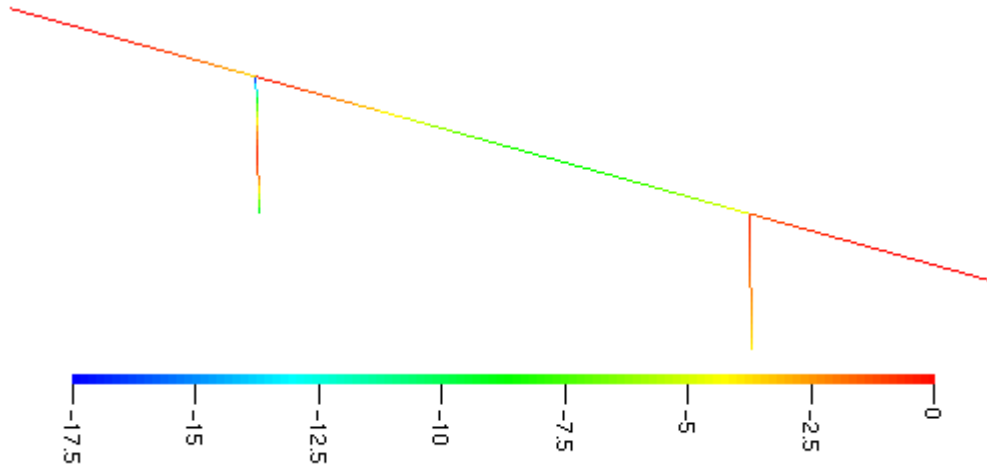


Şekil 3.40. Köprü modelde kesit ataletinin her bir mod üzerindeki etkisi



Şekil 3.41. Köprü modelde kesit ataletinin toplam modal davranış üzerindeki etkisi

Köprü modelde kesit atalet değerindeki değişim dikkate alınarak, hasarsız ve hasarlı frekanslar ve mod şekilleri arasındaki fark en az olacak şekilde adım adım çözümlenmeler gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda yakınsamanın elde edildiği durum için kesit ataletlerindeki değişim Şekil 3.42’de verilmektedir.



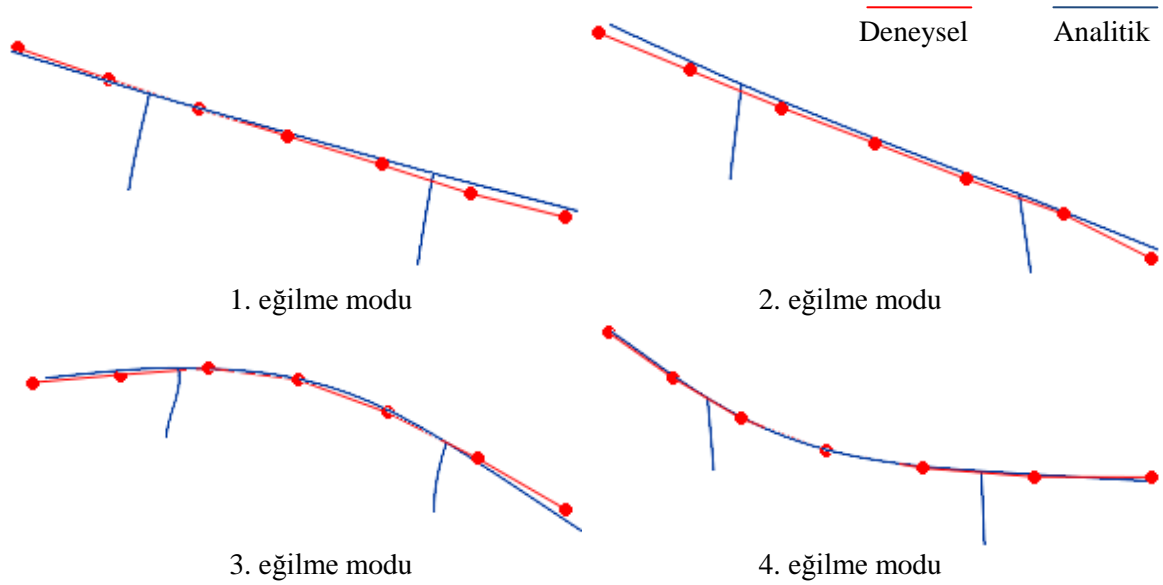
Şekil 3.42. Köprü modelde sol taraftaki kolonun üst ucu hasar durumu için atalet değerindeki değişimler

Köprü modelde hasarlı durum için gerçekleştirilen değerlendirmeden, kesit ataletinde değişimin en fazla olduğu elemanlar sol taraftaki kolonun üst ucu olarak belirlenmiştir. Gerçek hasar durumu ile karşılaştırıldığında, gerçekleştirilen analitik model güncelleme işlemiyle köprü modelde hasar yerinin oldukça doğru bir şekilde belirlenebildiği görülmektedir. Hasarlı durumu temsil ettiği kabul edilen güncellenmiş analitik model üzerinde gerçekleştirilen modal analizden elde edilen frekans değerleri ile deneysel ölçümden elde edilen frekans değerleri Tablo 3.28’de karşılaştırmalı olarak verilmektedir.

Tablo 3.28. Köprü modelde kolon üst ucu hasar durum için deneysel ve analitik frekanslar ile MGK değerleri

Mod Numarası	Doğal Frekansı(Hz)			Modal Güvence Kriteri
	Deneysel Hasarlı	Analitik Hasarlı	Fark (%)	
1	23.809	23.647	0.68	0.912
2	27.502	27.263	0.87	0.916
3	38.727	38.727	0.00	0.909
4	50.304	43.939	---	---
5	52.972	52.696	0.52	0.984

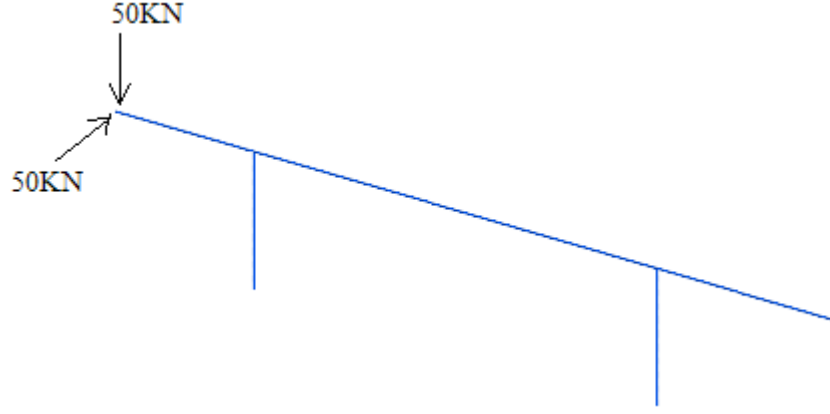
Köprünün analitik modelinin güncellenmesi sonucunda elde edilen frekanslar ile hasarlı duruma ait deneysel frekanslar arasındaki fark maksimum %0.87 olarak elde edilmiştir. Köprü modelin bu hasar durumu için deneysel ve analitik mod vektörlerinin eşleştirilmesi sonucunda MGK değeri en az 0.909 olarak elde edilmiştir. Şekil 3.43'te köprü modelin bu hasar durumu için deneysel ve analitik mod şekilleri verilmektedir.



Şekil 3.43. Köprü modelde kolon üst ucu hasar durumu için deneysel ve analitik mod şekilleri

### 3.5.1.3. Hasarın Köprü Davranışına Etkisinin Belirlenmesi

Köprü modelde oluşturulan ilk hasar durumunun yapı davranışına etkisini belirleyebilmek amacıyla, Şekil 3.44'te gösterilen yükleme durumu için statik analizler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.44. Köprü model üzerinde statik yükleme durumu

Köprü modelde kalibre edilmiş ve hasarlı durumu temsil ettiği kabul edilen güncellenmiş analitik modeller üzerinde gerçekleştirilen statik analizlerden, maksimum düşey yerdeğiştirme kalibre durum için 4.965mm, güncellenmiş durum için 5.129mm olarak elde edilmiştir. Köprünün maksimum yanal yerdeğiştirmeleri ise kalibre edilmiş durumda 6.680mm ve güncellenmiş durumda 6.698mm olarak hesaplanmıştır. Köprü modelde dikkate alınan yükleme durumu altında, bu hasar durumu için yerdeğiştirmeler düşey ve yatay doğrultularda sırasıyla %3.3 ve %0.27 düzeyinde artmıştır.

### 3.5.2. Tabliye Hasarı

#### 3.5.2.1. Hasar Varlığının Belirlenmesi

Köprü modelde ikinci hasar durumu olarak kesit zayıflatılması gerçekleştirilen kolonun tabliye ile temas ettiği kesitteki tabliyenin çatlağı varsayılmış ve ölçümler gerçekleştirilmiştir. Hasarın varlığının belirleyebilmek amacıyla, bu hasar durumu için gerçekleştirilen ölçümlerden elde edilen frekans değerleri ile önceki hasar durumuna göre güncellenmiş analitik frekans değerleri karşılaştırılmış ve Tablo 3.29'da verilmiştir.



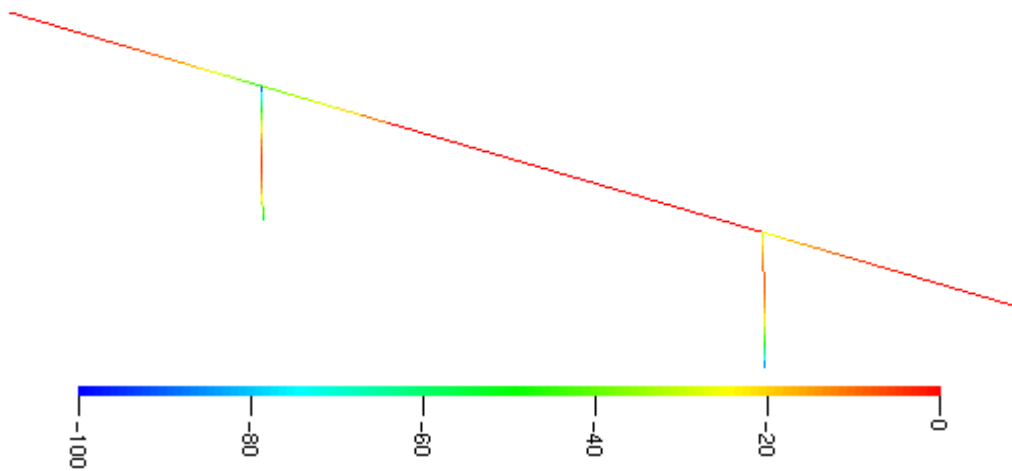
Tablo 3.29. Köprü modelde tabliye hasarlı durum için deneysel ve hasar öncesi analitik frekanslar ile MGK değerleri

Mod Numarası	Doğal Frekansı(Hz)			Modal Güvence Kriteri
	Deneysel Hasarlı	Analitik Hasar öncesi	Fark (%)	
1	21.716	23.647	0.79	0.914
2	25.181	27.263	0.93	0.918
3	37.127	38.727	3.51	0.916
4	46.835	43.939	---	---
5	51.091	52.696	1.57	0.984

Tablo 3.29'dan deneysel ve analitik frekanslar arasındaki farkların arttığı, özellikle de üçüncü modda farklılığın %3.5'ten daha büyük bir değer aldığı görülmektedir. Bu değişimler köprü modelde hasarın varlığına işaret etmektedir.

### 3.5.2.2. Hasar Yerinin Belirlenmesi

Köprü modelde tabliyede oluşturulan hasarın yerinin tahmin edilebilmesi amacıyla, analitik model kesit atalet değeri değişken alınarak güncellenmiştir. Köprü modelde kesit atalet değerindeki değişim dikkate alınarak gerçekleştirilen adım adım çözümler sonucunda, yakınsamanın elde edildiği durumda kesit ataletlerindeki değişim Şekil 3.45'te verilmektedir.



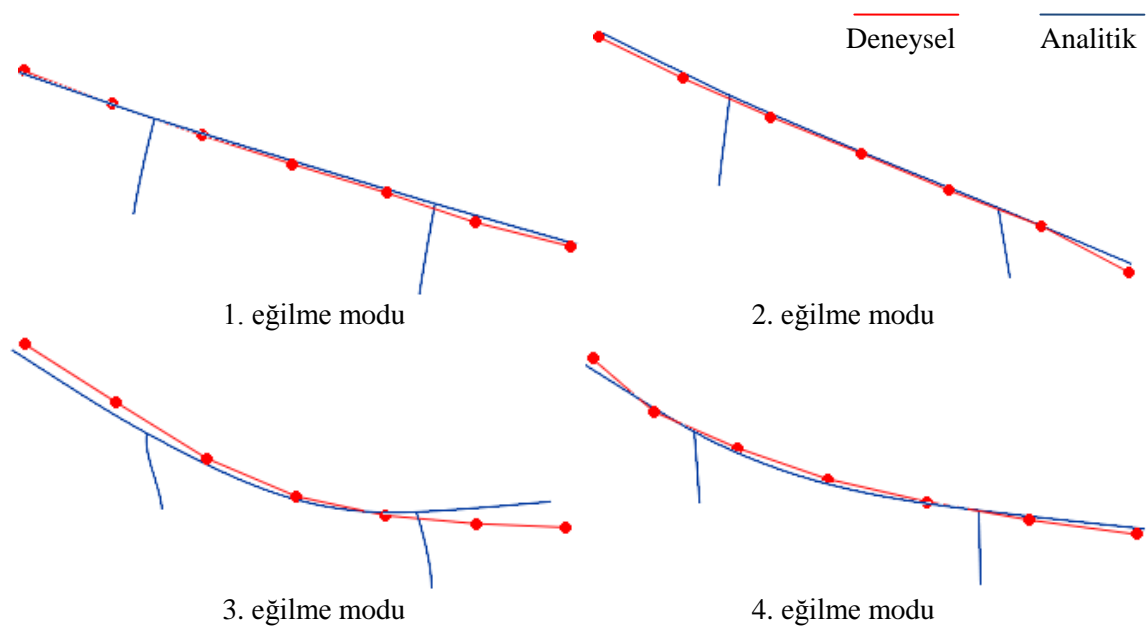
Şekil 3.45. Köprü modelin hasarlı durumu için atalet değerindeki değişimler

Şekil 3.45'ten köprü modeldeki hasarlı durum için gerçekleştirilen değerlendirmeden, kesit ataletindeki değişimin en fazla olduğu elemanlar sol taraftaki kolon üst ucu ve tabliye kesitleri olarak belirlenmiştir. Hasarlı duruma ait analitik frekanslar ile deneysel frekanslar Tablo 3.30'da karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 3.30. Köprü modelde tabliye hasarlı durum için deneysel ve analitik frekanslar ile MGK değerleri

Mod Numarası	Doğal Frekansı(Hz)			Modal Güvence Kriteri
	Deneysel Hasarlı	Analitik Hasarlı	Fark (%)	
1	21.716	21.715	0.00	0.965
2	25.181	25.180	0.00	0.972
3	37.127	37.127	0.00	0.865
4	46.835	43.165	---	---
5	51.091	50.914	0.35	0.893

Analitik modelin güncellenmesi sonucunda, analitik ve deneysel frekans değerlerindeki farklılığın maksimum %0.35 olduğu görülmektedir. Köprü modelin hasarlı durumu için deneysel ve analitik mod vektörlerinin eşleştirilmesi sonucunda MGK değeri en az 0.865 olarak elde edilmiştir. Şekil 3.46'da köprü modelin hasarlı durumu için deneysel ve analitik mod şekilleri verilmektedir.



Şekil 3.46. Köprü modelde tabliye hasar durumu için deneysel ve analitik mod şekilleri

### 3.5.2.3. Hasarın Köprü Davranışına Etkisinin Belirlenmesi

Köprü modelde tabliye hasarının yapı davranışına etkisini belirleyebilmek amacıyla, daha önce gösterilen yükleme durumu için statik analizler gerçekleştirilmiş ve maksimum yerdeğiştirme değerleri hesaplanmıştır. Tabliyede hasar olması durumunda, maksimum düşey yerdeğiştirme 5.326mm ve yatay yerdeğiştirme 7.840mm olarak elde edilmiştir.

Köprü modelde oluşturulan iki hasar durumu dikkate alındığında, düşey yerdeğiştirmelerde kolon üst ucu hasarı için %3.30 ve tabliye hasarı için %3.84 artış olduğu; yatay yerdeğiştirmelerde ise kolon üst ucu hasarı için %0.27 ve tabliye hasarı için %17 artış olduğu belirlenmiştir.

## 3.6. Baraj Modelin Hasar Durumunun Değerlendirilmesi

### 3.6.1. Hasar Varlığının Belirlenmesi

Baraj modelde rastgele balyoz darbeleriyle krete yakın kısımlarda hasar etkisi oluşturulmuş ve ölçümler gerçekleştirilmiştir. Hasarlı durum için gerçekleştirilen ölçümden elde edilen frekans değerleri, baraja ait kalibre edilmiş analitik frekans değerleri ile karşılaştırılarak hasar olup olmadığına karar verilmiştir (Tablo 3.31).

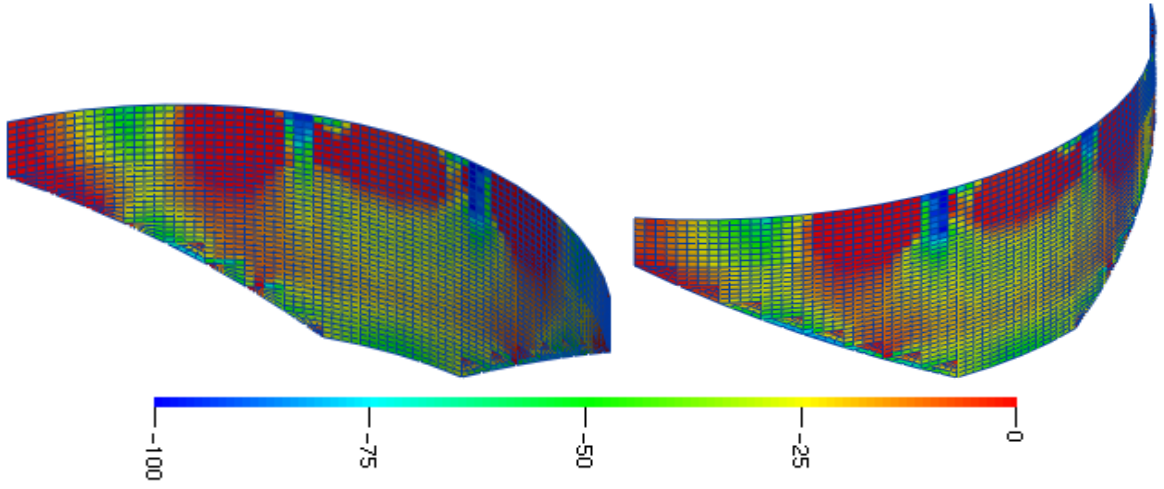
Tablo 3.31. Baraj modelde hasarlı durum için deneysel ve kalibre edilmiş analitik frekanslar ile MGK değerleri

Mod Numarası	Doğal Frekansı(Hz)			Modal Güvence Kriteri
	Deneysel Hasarlı	Analitik Kalibre	Fark (%)	
1	211.30	315.09	49.12	1.000
2	223.70	341.27	52.56	0.999
3	293.80	501.86	70.82	0.996
4	374.70	573.08	52.94	0.997
5	410.40	683.07	66.44	0.991

Tablo 3.31'den deneysel ve analitik frekanslar arasındaki farklılığın oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Bu değişimler baraj modelde hasarın varlığına işaret etmektedir.

### 3.6.2. Hasar Yerinin Belirlenmesi

Baraj modelde oluşturulan hasarın yerinin belirlenebilmesi amacıyla, her bir elemanda kesit kalınlığı değişken alınarak analitik modelde güncelleme yapılmış ve deneysel frekanslar ile en iyi uyum elde edilmeye çalışılmıştır. Gerçekleştirilen adım adım çözümler sonucunda, yakınsamanın elde edildiği durum için baraj gövdesinde kalınlığının değişimi Şekil 3.47’de verilmektedir.



Şekil 3.47. Baraj modelde hasarlı durum için her bir elemanda beton kalınlığının değişimi

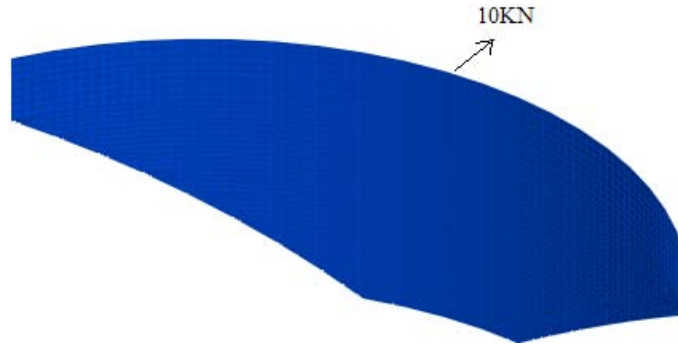
Balyoz darbeleriyle baraj modele vurulması sonucunda, baraj gövdesinin orta bölgesinde kret seviyesinden aşağıya doğru ilerleyen simetrik hasar etkileri oluşmuştu. Baraj modele ait analitik modelin güncellenmesi sonucunda, elde edilen dağılımın gerçek hasar durumu ile örtüştüğü görülmektedir. Baraj modele ait güncellenmiş analitik model üzerinde gerçekleştirilen modal analizden elde edilen frekanslar ile hasarlı durum ölçümünden elde edilen frekanslar karşılaştırıldığında, güncelleme işlemiyle frekanslar arasındaki farklılığın maksimum %0.13’e kadar indirgenebildiği görülmektedir. Tablo 3.32’de baraj modelin hasarlı durum için deneysel ve analitik frekans değerleri verilmektedir.

Tablo 3.32. Baraj modelde hasarlı duruma ait deneysel ve analitik frekanslar ile MGK değerleri

Mod Numarası	Doğal Frekansı(Hz)			Modal Güvence Kriteri
	Deneysel Hasarlı	Analitik Hasarlı	Fark (%)	
1	211.30	211.28	0.01	1.000
2	223.70	223.99	0.13	0.999
3	293.80	294.19	0.13	0.996
4	374.70	374.70	0.00	0.997
5	410.40	410.46	0.01	0.990

### 3.6.3. Hasarın Baraj Davranışına Etkisinin Belirlenmesi

Baraj modelde oluşturulan hasarın yapı davranışına etkisini belirleyebilmek amacıyla, barajın kret seviyesinde orta noktasına Şekil 3.48’de gösterilen şekilde statik yükleme gerçekleştirilmiştir. Bu yükleme durumu altında kalibre edilmiş ve güncellenmiş analitik modeller analiz edilmiş ve maksimum yerdeğiştirme değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 3.48. Baraj modelde statik yükleme durumu

Oluşturulan hasar durumu için, baraj modele ait kalibre edilmiş modelde maksimum 3.259cm yerdeğiştirme oluşurken güncellenmiş modelde 10.283cm yerdeğiştirme oluşmuştur.

#### 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Analitik model güncelleme, deneysel olarak ölçülen yapısal karakteristik değerlerin baz alınarak yapının analitik modelinde değişiklikler yapılması işlemidir. Bu işlem sonucunda, yapının gerçek durumunu temsil eden analitik model oluşturulmaktadır. Bu tez çalışmasında, çevresel titreşimler altında deneysel olarak ölçülen dinamik karakteristikler dikkate alınarak analitik model güncelleme yöntemiyle yapıların hasar durumlarının tespitine ve değerlendirilmesine imkan sağlayan bir yaklaşım ortaya konulmaya çalışılmıştır. Bu yaklaşım, yapıların hasarsız ve hasarlı durumlar için çevresel titreşimler altında dinamik karakteristiklerinin ölçülmesini, analitik modellerinin başlangıç durumuna göre kalibre edilmesini ve hasarlı duruma göre güncellenmesini içermektedir. Önerilen yaklaşımın uygulanabilirliği, laboratuvar ortamında oluşturulan ve inşaat mühendisliği alanında birçok uygulamasına rastlanan temel yapı modelleri üzerinde gösterilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla, çelik konsol kiriş ve iki boyutlu çerçeve modeller ile betonarme tek katlı bina, üç katlı bina, köprü ve baraj modelleri üzerinde incelemeler yapılmıştır. Gerçekleştirilen uygulamalarda, baraj modeli haricindeki modellerde yeri ve yaklaşık büyüklüğü bilinen hasar etkileri için inceleme yapılırken, baraj modelde ise rastgele oluşturulan hasar etkisi incelenmiştir. Hasarlı duruma ait deneysel ölçüm sonuçlarına göre analitik model güncelleme yöntemiyle yapıların hasar durumları değerlendirilerek hasar yeri tahmin edilmiştir. Ayrıca, yapıların hasarlı durumlarını temsil eden analitik modeller oluşturulmuş, statik yükleme durumları gerçekleştirilmiş ve hasarsız duruma ait sonuçlarla karşılaştırılarak, oluşturulan hasarların yapı davranışına etkisi değerlendirilmiştir.

Laboratuvar ortamında temel mühendislik yapı modelleri üzerinde gerçekleştirilen ve deneysel ölçümler ile analitik modellemeleri içeren bu tez çalışmasından, genel olarak gözlemlenen ve her bir modelden elde edilen sonuçlar aşağıda sırasıyla verilmektedir.

✓ Temel mühendislik yapılarını temsil etmek amacıyla oluşturulan laboratuvar modellerin deneysel dinamik karakteristiklerinin, bu modellere ait başlangıç analitik değerlerden oldukça farklı olduğu gözlemlenmiştir. Bu farklılıkları gidermek amacıyla, başlangıç analitik modeller, malzeme özellikleri, sınır şartları gibi parametrelerdeki değişimler dikkate alınarak kalibre edilmiştir.

✓ Bir modelin inşasında kullanılan malzemelere ait özelliklerin (elastisite değeri, kütle yoğunluğu gibi) yapı genelinde değişim gösterdiği belirlenmiş, bu amaçla özellikle de betonarme modeller değişken malzeme özellikleri dikkate alınarak modellenmiştir.

✓ Yapıların dinamik karakteristiklerinin Operasyonel Modal Analiz yöntemiyle belirlenmesinin, hem ölçüm süresi ve maliyet hem de yapılarda hasar oluşturulmaması bakımından oldukça elverişli olduğu gözlemlenmiştir. Bu yöntemle elde edilen sonuçların yapıların analitik modellerinin kalibre edilmesi ile hasar durumlarının tespiti ve değerlendirilmesinde oldukça etkili sonuç verdiği belirlenmiştir.

✓ Her bir yapının, geometrisine, sınır şartlarına ve malzeme özelliklerine göre belirlenen ve doğal frekanslar ile mod şekilleri olarak adlandırılan karakteristik değerlere sahip olduğu; bu karakteristik değerlerin oluşturulan hasarlardan farklı düzeyde etkilenmesinin, hasarın yerinin ve büyüklüğünün tahmin edilmesinde kilit role sahip olduğu belirlenmiştir.

✓ Gelişen teknolojik imkanların ve yazılımların, mühendislik yapılarının davranışlarının deneysel ve analitik olarak belirlenmesinde etkili olduğu; yapının hasarsız ve hasarlı durumlarına ait deneysel olarak belirlenmiş dinamik karakteristiklerin mevcut olması durumunda analitik modeller üzerinde değişiklikler yapılarak yapıların hasar durumlarının belirlenebildiği gözlemlenmiştir. Önerilen analitik model güncelleme yönteminin etkili sonuçlar verdiği belirlenmiştir.

✓ Çelik konsol kiriş modelin hasarsız durumu için ilk altı frekansı 9.788Hz ile 821.30Hz aralığında ölçülmüş ve başlangıç analitik modelin modal analizinden de ilk altı frekans 10.278Hz ile 869.19Hz aralığında elde edilmiştir. Bu frekanslardaki ortalama %5.16'lık farkı ortadan kaldırmak için analitik model kalibre edilmiş ve bu fark %0.21'e kadar azaltılabilmektedir. Testere kullanılarak kesik oluşturulması durumunda, frekanslarda aşırı farklılıklar olmamasına karşın, bazı frekansların diğerlerine göre daha fazla değiştiği görülmüştür. Frekanslar arasında maksimum %1.67'lik fark oluşmasına rağmen, analitik model güncelleme yöntemiyle hasar durumu etkin bir şekilde belirlenebilmiştir. Konsol kiriş modelde oluşturulan hasar etkisi, statik yükleme durumu için elde edilen yerdeğiştirmede %1.65'lik bir artışa sebep olmuştur.

✓ İki boyutlu çelik çerçeve modelin hasarsız durum için ilk altı frekansı 9.065Hz ile 156.39Hz aralığında ölçülmüş ve başlangıç analitik modelin modal analizinden ilk altı frekans 9.371Hz ile 161.35Hz aralığında hesaplanmıştır. Hasarsız durum için deneysel ve analitik frekanslar arasında ortalama %3.19'luk bir fark gözlemlenmiştir. Bu farkı

azaltmak için gerçekleştirilen kalibrasyon işlemi sonucunda ortalama fark, %0.27'ye kadar azaltılabilmektedir.

✓ İki boyutlu çerçeve model üzerinde kiriş ortası hasarı ve kolon-kiriş birleşim bölgesi hasarı olmak üzere iki farklı hasar etkisi oluşturulmuştur. Öncelikle, kiriş ortası hasarı oluşturularak ölçüm gerçekleştirilmiş, daha sonra hasarlı modelde birleşim bölgelerine de hasar uygulanarak ölçüm tekrarlanmıştır. Hasar değerlendirme işlemi hem adım adım her bir hasar durumu için hem de iki hasarın da aynı anda olduğu durum için gerçekleştirilmiştir. Kullanılan yöntemle her iki hasar durumu oldukça doğru bir şekilde değerlendirilebilmiş ve hasar yerleri belirlenebilmiştir. Kiriş ortasında hasar olması durumunda, düşey yerdeğiştirmede %5 artış oluşurken kolon-kiriş birleşim bölgesi hasarında %1.4'lük bir artış oluşmuştur.

✓ Tek katlı betonarme bina modelin hasarsız durumuna ait ilk üç frekansı 14.936Hz ile 23.880Hz aralığında ölçülmüştür. Başlangıç analitik modelin modal analizinde ilk üç frekans 16.534Hz ile 26.338Hz aralığında elde edilmiştir. Hasarsız durum için deneysel ve analitik frekanslar arasında ortalama %10.37'lik bir fark belirlenmiştir. Bu farkı en aza indirgeyebilmek için kalibre edilen analitik modelde farklılık tamamen ortadan kaldırılabilmiştir.

✓ Tek katlı betonarme bina modeli üzerinde birbirini takiben üç farklı hasar etkisi oluşturulmuş ve her bir durum için ayrı ayrı değerlendirme yapılmıştır. İlk hasar durumu olarak, oluşturulan bütün kolonların üst uçlarında kabuk betonu hasarının, boyuna doğrultudaki yerdeğiştirmeyi %31 düzeyinde, enine doğrultudaki yerdeğiştirmeyi ise %23 düzeyinde arttırdığı belirlenmiştir. İkinci olarak, bütün kolonların alt uçlarında oluşturulan kabuk betonu hasarının da benzer düzeyde bir etki oluşturduğu gözlemlenmiştir. Son olarak ise, köşe kolon üst ucu göbek betonu hasar durumu dikkate alınmış ve bu hasar etkisinin boyuna doğrultudaki yerdeğiştirmeyi %4.3 düzeyinde, enine doğrultudaki yerdeğiştirmeyi ise %6.9 düzeyinde arttırdığı belirlenmiştir. Bu model üzerinde oluşturulan bütün hasar durumları dikkate alındığında ise, başlangıç duruma göre boyuna doğrultudaki yerdeğiştirme %86, enine doğrultudaki yerdeğiştirme %63 düzeyinde arttığı belirlenmiştir.

✓ Üç katlı betonarme bina modeli üzerindeki deneysel ölçümler adım adım her bir inşaaşaması için gerçekleştirilmiş ve başlangıç analitik model sürekli güncellenmiştir. Analitik modelin güncellenmesinde her kattaki kolonlara, kirişlere, döşemelere ve duvarlara farklı malzeme özellikleri tanımlanmıştır. En son inşaaşaması olan sıvalı durum için, üç katlı betonarme bina modelinin frekansları 13.892Hz ile 56.297Hz aralığında ölçülmüştür. Bu



inşa aşaması için kalibre edilen analitik modelden, deneysel ölçüm sonuçlarına oldukça yakın frekans değerleri elde edilmiştir.

✓ Üç katlı betonarme bina modelde, uygulamadaki hasar oluşum sırası dikkate alınarak yedi farklı hasar etkisi birbirini takiben oluşturulmuş ve her bir durum için ayrı ayrı hasar değerlendirmesi yapılmıştır. İlk dört hasar etkisi bina modelin birinci katındaki duvarlarda, diğer hasarlar ise kolon alt ve üst uçlarında kabuk betonu hasarı ve göbek betonu hasarı şeklinde oluşturulmuştur. İlk hasar etkisi olarak, duvarda çatlaklar oluşması durumu dikkate alınmış ve bu durum için değerlendirme yapılmıştır. Duvarda çatlaklar oluşması hasar durumu için ölçülen frekansların, bazı modlarda analitik frekanslardan %15 düzeyinde farklı olduğu belirlenmiştir. Gerçekleştirilen hasar değerlendirmesi sonucunda, frekanslar arasındaki fark maksimum %1.24'e kadar indirilebilmiş ve hasar yeri gerçekte olduğu şekilde belirlenebilmiştir.

✓ Üç katlı betonarme bina modelde, birinci kattaki tüm duvarların hasar görmesi durumu için gerçekleştirilen hasar değerlendirmesinden, hasarlı elemanların laboratuvar modelinde oluşturulduğu şekilde birinci kat duvarlarında olduğu belirlenmiştir. Bu hasar durumu sonunda, üç katlı betonarme binanın yerdeğiştirmeleri dikkate alınan yüklem durumu için boyuna doğrultuda %135, enine doğrultuda ise %106 düzeyinde artmıştır.

✓ Üç katlı betonarme bina modelde, kolonların alt ve üst uçlarında oluşturulan hasar etkileri için değerlendirme yapılmış ve hasar yerleri oldukça doğru bir şekilde belirlenebilmiştir. En son kolon hasarı olarak oluşturulan kolon üst ucu göbek betonu hasarı frekanslarda %10'lara varan farklılıklar meydana getirmiş; bu hasar durumu için gerçekleştirilen hasar değerlendirmesi sonucunda bu farklılıklar %0.06'ya kadar indirilebilmiştir. Bu hasar durumu sonunda, üç katlı betonarme bina modelin yerdeğiştirmeleri en son verilen duvar hasarından sonra toplamda boyuna doğrultuda %83.5, enine doğrultuda %56.2 düzeyinde artmıştır.

✓ İçi boş kesitli köprü modeli üzerinde gerçekleştirilen incelemede, köprü modelin hasarsız durum için ilk beş frekansı 23.637Hz ile 53.809Hz aralığında ölçülmüştür. Başlangıç analitik modelin modal analizinden ilk beş frekans değeri 26.035Hz ile 51.339Hz aralığında elde edilmiştir. Hasarsız duruma ait frekanslar arasında %4.48 ile %16.37 aralığında farklar belirlenmiştir. Bu farklılıkları ortadan kaldırabilmek amacıyla analitik model güncellenmiş ve frekanslar arasındaki maksimum fark %0.07'ye kadar düşürülebilmştir.

✓ Köprü modeli üzerinde kolon üst ucu ve tabliye hasarı olmak üzere birbirini takiben iki farklı hasar durumu oluşturularak inceleme yapılmıştır. Her iki hasar durumu için ayrı ayrı gerçekleştirilen değerlendirmeden, hasar yerleri oldukça doğru bir şekilde belirlenebilmiştir. Kolon üst ucunun hasar görmesi durumunda, uygulanan yükleme durumu altında yerdeğiştirmeler düşey doğrultuda %3.3, yatay doğrultuda ise %0.27 düzeyinde artmış; tabliyenin hasar görmesi durumunda ise yerdeğiştirmelerde düşey doğrultuda %3.84, yatay doğrultuda %17 artış oluşmuştur.

✓ Kemer baraj modeli üzerinde gerçekleştirilen çalışmada, hasarsız durum için barajın ilk beş frekansı 211.30Hz ile 410.40Hz aralığında ölçülmüştür. Başlangıç analitik modelin modal analizinden ilk beş frekans değeri 315.09Hz ile 683.07Hz aralığında hesaplanmıştır. Hasarsız durum için elde edilen frekans değerleri arasında oldukça büyük farklılıklar gözlemlenmiştir. Başlangıç analitik modelin kalibre edilmesi sonucunda, frekanslar arasındaki fark %0.01 düzeyine kadar azaltılabilmektedir.

✓ Baraj modelde rastgele balyoz darbeleri sonucu oluşturulan hasar durumu için hasar değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan hasar etkisi frekanslarda %66'lara varan değişimler meydana getirmiştir. Bu hasar durumu için gerçekleştirilen değerlendirmeden, gerçeğe oldukça yakın bir dağılım gösteren hasar durumu elde edilmiştir. Baraj modelde hasarsız ve hasarlı durum için gerçekleştirilen statik analizlerden, hasarın yerdeğiştirmeyi de oldukça fazla bir düzeyde arttırdığı belirlenmiştir.

Bu tez çalışması süresince gözlemlenen ve gelecekte yapılacak çalışmalara ışık tutması ümit edilen öneriler aşağıda verilmektedir.

✓ Hasarsız ve hasarlı modeller üzerinde statik yüklemeler yapılarak, gerçekleştirilen hasar değerlendirmesinin etkinliği kontrol edilebilir.

✓ Hasarsız ve hasarlı güncelleştirilmiş modellerin deprem, patlatma ve diğer dış etkiler için lineer olmayan davranışlar incelenebilir.

✓ Oluşturulan hasar etkilerine karşı güçlendirme çalışmaları yapılarak ve güçlendirilmiş sistem üzerinde ölçümler tekrarlanarak, güçlendirmenin yapı davranışına etkisi belirlenebilir.

✓ Yapıların hasarsız durumlarına ait ölçüm sonuçlarının mevcut olmaması durumu için hasar değerlendirme yaklaşımları geliştirilebilir.

✓ Sıcaklık değişimi, nem gibi çevresel etkilerin hasar değerlendirme işlemine etkisi belirlenebilir.

✓ Yapıların hasar durumlarının değerlendirilmesinde, analitik modellerin yapının gerçek davranışını temsil edecek şekilde oluşturulmasının önemli olduğu görülmüştür. Bu amaçla, özellikle de önemli mühendislik yapılarının inşa süresince ve sonrasında dinamik karakteristiklerdeki değişimin takip edilmesinin önemli olduğu ve periyodik veya sürekli ölçümler yapılarak yapı davranışının değerlendirilmesinin önem arz ettiği düşünülmektedir.

## 5. KAYNAKLAR

- Agardh, L., 1991. Modal Analyses of Two Concrete Bridges, Structural Engineering International, 1, 4, 35-39.
- Aktan, A., E., Lee, K., L., Chuntavan, C. ve Aksel, T., 1994. Modal Testing for Structural Identification and Condition Assessment of Constructed Facilities, In Proceedings, 12th International Modal Analysis Conference, Honolulu, Hawaii, 1, 462-468.
- Allemang, R., J. ve Brown, D., L., 1982. A Correlation Coefficient for Modal Vector Analysis, 1st, IMAC, Orlando, Florida, USA.
- Altunışık, A. C., 2010. Karayolu Köprülerinin Yapısal Davranışlarının Analitik ve Deneysel Yöntemlerle Belirlenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Awkar, J., C. ve Lui, E., M., 1997. Seismic Analysis and Response of Multi-Story Semi-Rigid Frames, Journal of Engineering Structures, 30, 425-441.
- Baghiee, N., Esfahani, M., R. ve Moslem, K., 2009. Studies on Damage and FRP Strengthening of Reinforced Concrete Beams by Vibration Monitoring, Engineering Structures, 31, 875-893.
- Bendat, J., S. ve Piersol, A., G., 2004. Random Data: Analysis and Measurement Procedures, 3th Edition, John Wiley and Sons, USA.
- Bernal, D., 2002. Load Vectors for Damage Localization, Journal of Engineering Mechanics, 128, 1, 7-14.
- Bjorhovde, R., Colson, A. ve Brozzetti, J., 1990. Classification System for Beam-To-Column Connections, Journal of Structural Engineering, 116, 11, 3059-3076.
- Blakely, K., D. ve Walton, W., B., 1984. Selection of Measurement and Parameter Uncertainties for Finite Element Model Revision, Proc. 3rd. IMAC, Orlando, Florida.
- Bolton, A., 1994. Structural Dynamics in Practice, 1st Ed., McGraw-Hill International, London.
- Brincker, R., Andersen, P., Kirkegaard, P., H. ve Ulfkjaer, J., P., 1995. Damage Detection in Laboratory Concrete Beams, Proceedings of the 13th International Modal Analysis Conference, 668-674.
- 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.

- Brincker, R., Ventura, C., E. ve Andersen, P., 2003. Why Output-Only Modal Testing is A Desirable Tool for A Wide Range of Practical Applications, Proceeding of the 21st International Modal Analysis Conference (IMAC XXI), Kissimmee, Florida.
- Cantieni, R., 2001. Assessing A Dam's Structural Properties Using Forced Vibration Testing, Proc. IABSE International Conference on Safety, Risk and Reliability-Trends in Engineering, Malta.
- Casas, J., R. ve Aparicio, A., C., 1994. Structural Damage Identification from Dynamic-Test Data, Journal of Structural Engineering, 120, 8, 2437-2450.
- Cawley, P. ve Adams, R., D., 1979. The Locations of Defects in Structures from Measurements of Natural Frequencies, Journal of Strain Analysis, 14, 2, 49-57.
- Chellini, G., Roeck, G., D., Nardini, L. ve Salvatore, W., 2010. Damage Analysis of A Steel-Concrete Composite Frame by Finite Element Model Updating, Journal of Constructional Steel Research, 66, 398-411.
- Chinchalkars, S., 2001. Determination of Crack Location in Beams using Natural Frequencies, Journal of Sound and Vibration, 247, 3, 417-429.
- Choy, F., K., Liang, R. ve Xu, P., 1995. Fault Identification of Beams on Elastic Foundation, Computers and Geotechnics, 17, 157-176.
- Dascotte, E. ve Vanhonacker, P., 1989. Development of An Automatic Mathematical Model Updating Program, Proc. 7th IMAC, Las Vegas, Nevada.
- Doebling, S., W., Farrar, C., R., Prime, M., B. ve Shevitz, D., W., 1996. Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in Their Vibration Characteristics: A Literature Review, Los Alamos National Laboratory Report LA-13070-MS.
- Doebling, S., W., Farrar, C., R. ve Prime M., B., 1998a. A Summary Review of Vibration-Based Damage Identification Methods, the Shock and Vibration Digest, 30, 2, 91-105.
- Doebling, S., W., Farrar, C., R. ve Cornwell, P., J., 1998b. Development of A General Purpose Code to Couple Experimental Modal Analysis and Damage Identification Algorithms, Structural Engineering World Wide, Proc. of Structural Engineers World Congress, San Francisco, CA.
- Duan, Z., Yan, G., Ou, J. ve Spence, B., F., 2005. Damage Localization in Ambient Vibration by Constructing Proportional Flexibility Matrix, Journal of Sound and Vibration, 284, 455-466.
- Dyke, S., J. ve Johnson, E., A., 2000. Monitoring of Benchmark Structure for Damage Identification, Proc. of the Engineering Mechanics Specialty Conference, Austin, Texas.

- Escobar, J., A., Sosa, J., J. ve Gomez, R., 2005. Structural Damage Detection using the Transformation Matrix, Computers and Structures, 83, 357-368.
- Ewins, D., J., 1995. Modal Testing: Theory and Practice, John Wiley & Sons, New York.
- Farrar, C., R. ve Doebling, S. W., 1997. Lessons Learned from Applications of Vibration-Based Damage Identification Methods to Large Bridge Structures, Proc. of the International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford, CA, 351-370.
- Farrar, C., R. ve Jauregui, D., A., 1998a. Comparative Study of Damage Identification Algorithms Applied to A Bridge: I, Experiment, Smart Materials Structure, 7, 704-719.
- Farrar, C., R. ve Jauregui, D., A., 1998b. Comparative Study of Damage Identification Algorithms Applied to A Bridge: II. Numerical Study, Smart Materials Structure, 7, 720-731.
- Faverjon, B. ve Sinou, J., J., 2008. Robust Damage Assessment of Multiple Cracks Based on the Frequency Response Function and the Constitutive Relation Error Updating Method, Journal of Sound and Vibration, 312, 821-837.
- Femtools, 2003a. Femtools Model Updating Theoretical Manual, Version 3.3, Dynamic Design Solutions, Leuven, Belgium.
- Femtools, 2003b. Femtools Software, Version 3.3, Dynamic Design Solutions, Leuven, Belgium.
- Friswell, M., J. ve Mottershead J. E., 1995. Finite Element Model Updating In Structural Dynamics, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, the Netherlands, 286 s.
- Gentile, C. ve Saisi, A., 2007. Ambient Vibration Testing of Historic Masonry Towers for Structural Identification and Damage Assessment, Construction and Building Materials, 21, 1311-1321.
- Gomes, A., J., M. ,A. ve Silva, J., M. ,M. ,E., 1990. The Use of Modal Analysis for Crack Identification, In Proceedings, 8th International Modal Analysis Conference, Florida, 2, 1108-1115.
- Görl, E. ve Link, M., 2001. Identification of Damage Parameters of A Full-Scale Steel Structure Damaged by Seismic Loading, Smart Mater. Struct, 10, 459-465.
- Haroun, M., A., Mourad, S., A. ve Flynn, N., H., 1993. Modal Characteristics of Reinforced Concrete Pier Walls before and after Cyclic Testing, In Proceedings, 11th International Modal Analysis Conference, Kissimmee, Florida, 2, 1299-1302.
- Haug, E., Choi, K. ve Komkov, V., 1986. Design Sensitivity Analysis of Structural Systems, Academic Press.

- Heylen, W., Lammens, S. ve Sas, P., 2007. Modal Analysis Theory and Testing, Leuven Katholieke Universtiy, Department of Mechanical Engineering, Leuven, Belgium.
- Hwang, H., Y. ve Kim, C., 2004. Damage Detection in Structures Using a Few Frequency Response Measurements, Journal of Sound and Vibration, 270, 1-14.
- Ibrahim, S., R. ve Stavriniadis, C., 1993. An Approach to Improve Numerical Condition of Dynamic Matrices in Model Updating, Proceedings of the Int. Forum on Aeroelastic and Structural Dynamics, Strasbourg, France.
- Imregun, M. ve Visser, W., J., 1991. A Review of Model Updating Techniques, Shock and Vibration Digest, 23, 1.
- 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., X., 2005. Structural Finite Element Model Updating Using Ambient Vibration Test Results, Journal of Structural Engineering, ASCE, 131, 617-628.
- Ju, F., D. ve Mimovich, M., 1986. Modal Frequency Method in Diagnosis of Fracture Damage in Structures, In Proceedings, 4th International Modal Analysis Conference, Los Angeles, 2, 1168-1174.
- Katafygiotis, L., S. ve Lam, H., F., 2000. Application of a Statistical Approach on a Benchmark Damage Detection Problem, EM2000 Fourteenth Engineering Mechanics Conference, Austin, Texas.
- Kharrazi, M., H., K., Ventura, C., E., Bricker, R. ve Dascotte, E., 2002. A Study on Damage Detection Using Output-Only Modal Data, Proceedings of The 20th International Modal Analysis Conference (IMAC XX), Los Angeles, California, USA.
- Kim, J., Ryu, Y., Cho, H. ve Stubbs, N., 2003. Damage Identification in Beam-Type Structures: Frequency-Based vs. Mode-Shape-Based Method, Engineering Structures, 25, 1, 57-67.
- Kroggel, O., 1993. Nondestructive Testing of the Integrity of Bridges: An EC Project, In Bridge Management, 2, 727-737.
- Lauwagie, T., Sol, H. ve Dascotte, E., 2002. Damage Identification in Beams Using Inverse Methods, Proceedings of the International Seminar on Modal Analysis, (ISMA), 715-722.
- Lee U. ve Shin J., 2002. A Frequency Response Function-Based Structural Damage Identification Method, Computers & Structures, 80, 117-132.

- Liszkai, T., R. ve Raich, A., M., 2005. Solving Inverse Problems in Structural Damage Identification using Advanced Genetic Algorithm Representations, 6th World Congresses of Structural and Multidisciplinary Optimization Rio De Janeiro, Brazil.
- Lord, J., F., Ventura, C., E., Dascotte, E., Brincker, R. ve Anderson, P., 2003. FEM Updating Using Ambient Vibration Data From a 48 Storey Building in Vancouver British Columbia Canada, The 32nd International Congress And Exposition On Noise Control Engineering, Jeju International Convention Center, Segowipo, Korea.
- Luş, H., Betti, R. ve Longman, R., W., 2000. Damage Identification in Linear Structural Systems, Proceedings of the 14th ASCE Engineering Mechanics Conference, Austin, Texas.
- Ma, T., W., Yang, H., T., ve Chang, C., C., 2005. Structural Damage Diagnosis and Assessment under Seismic Excitations, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, October, 1036-1045.
- Maia, N., M., M., Silva, J., M., M. ve He, J., 1997. Theoretical and Experimental Modal Analysis, Research Studies Press Ltd., Somerset, England, 468 s.
- Mazurek, D., F. ve Dewolf, J., T., 1990. Experimental Study of Bridge Monitoring Technique, Journal of Structural Engineering, ASCE, 16, 9, 2532-2549.
- Messina, A., Williams, E., J. ve Contursi, T., 1998. Structural Damage Detection by a Sensitivity and Statistical Based Method, Journal of Sound and Vibration, 216, 5, 791-808.
- Mirza, M., S., Ferdjani, O., Hadj-Arab, A., Joucdar, K., Khaled, A. ve Razaqpur, A., G., 1990. An Experimental Study of Static and Dynamic Responses of Prestressed Concrete Box Girder Bridges, Canadian Journal of Civil Engineering, 17, 3, 481-493.
- Modena, C., Sonda, D. ve Zonta, D., 1999. Damage Localization in Reinforced Concrete Structures by Using Damping Measurements, Proceedings of DAMAS 99 International Conference of Damage Assessment of Structures, Dublin, Ireland, 132–141.
- Moradalizadeh, M., 1990. Evaluation of Crack Defects In Frames Structures Using Resonant Frequency Techniques, Msc. Thesis, Civil Engineering Department, University Of Newcastle Upon Tyne, Newcastle.
- Morassi A., 2001. Identification of a Crack in a Rod Based on Changes in a Pair of Natural Frequencies, Journal of Sound and Vibration, 242, 4, 577–596.
- Morgan, B., J. ve Oesterle, R., G., 1994. On-Site Modal Analysis-A New Powerful Inspection Technique, In Proceedings of the 2nd International Bridge Conference, Pittsburg, Pennsylvania, 108-114.



- Mottershead, J., E. ve Friswell, M., I., 1995. Finite Element Model Updating in Structural Dynamics, Kluwer Academic Publishers.
- Ndambi, J., M., 2002. Damage Assessment in Reinforced Concrete Beams by Damping Analysis, Ph.D. Dissertation, Mechanics of Materials and Constructions, Vrije Universiteit Brussel, Belgium.
- Oliveira, S. ve Faria, R., 2006. Numerical Simulation of Collapse Scenarios in Reduced Scale Tests of Arch Dams, Engineering Structures, 28, 1430-1439.
- OMA, 2006. Operational Modal Analysis, Release 4.0. Structural Vibration Solution A/S, Denmark.
- Ovanesova, A. ve Suarez, L., E., 2004. Application of Wavelet Transforms to Damage Detection in Frame Structures, Engineering Structure, 26, 1, 39-49.
- Overschee, P., V. ve Moor, B., D., 1996. Subspace Identification for Linear Systems: Theory, Implementation and Applications, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands.
- Owen, J., S. ve Haritos, N., 2003. Damage Detection in Large-Scale Laboratory Bridge Models, Key Engineering Materials, 245-246, 35-42.
- Pandey, A., K. ve Biswas, M., 1994. Damage Detection in Structures Using Changes in Flexibility, Journal of Sound and Vibration, 169, 1, 3-17.
- 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.
- Park, S., Bolton, R., W. ve Stubbs, N., 2006. Blind Test Results for Nondestructive Damage Detection in A Steel Frame, Journal of Structural Engineering, ASCE, May, 800-809.
- Peeters, B. ve Roeck, G. D., 2000. Reference Based Stochastic Subspace Identification in Civil Engineering, Inverse Problems in Civil Engineering, 8, 47-74.
- Peeters, B., 2000. System Identification and Damage Detection in Civil Engineering, Doktora Tezi, K.U, Leuven, Belgium.
- Peters, B., Maeck, J. ve Roeck, G., D., 2001. Vibration-Based Damage Detection in Civil Engineering: Excitation Sources and Temperature Effects, Smart Materials and Structures, 10, 518-527.
- Petyt, M., 1990. Introduction to Finite Element Vibration Analysis, Cambridge University Pres, Cambridge.
- PULSE, 2006. Analyzers And Solutions, Release 11.2. Bruel and Kjaer, Sound And Vibration Measurement A/S, Denmark.

- Raghavendrachar, M. ve Aktan, A., E., 1992. Flexibility by Multireference Impact Testing for Bridge Diagnostics, Journal of Structural Engineering, 118, 8, 2186–2203.
- Ramos, J., L., F., S., 2007. Damage Identification on Masonry Structures Based On Vibration Signatures, Doktora Tezi, University of Minho, Portugal.
- Ramos, L., F., Roeck, G., D., Lourenço, P., B. ve Campos-Costa, A., 2010. Damage Identification on Arched Masonry Structures using Ambient and Random Impact Vibrations, Engineering Structures, 32, 146-162.
- Rizos, P., F., Aspragathos, N. ve Dimarogonas, A., D., 1990. Identification of Crack Location and Magnitude in a Cantilever Beam from the Vibration Modes, Journal of Sound and Vibration, 138, 3, 381–388.
- Ruotolo, R. ve Surace, C., 1997. Damage Assessment of Multiple Cracked Beams: Numerical Results and Experimental Validation, Journal of Sound and Vibration, 206, 4, 567–588.
- Rytter, A., 1993. Vibration Based Inspection of Civil Engineering Structures, Ph.D. Dissertation, Department of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University, Denmark.
- Rytter, A. ve Kirkegaard, P., H., 1994. Vibrational-Based Inspection of a Steel Mast, In Proceedings, 12th International Modal Analysis Conference, Honolulu, Hawaii, 2, 1602-1608.
- Salane, H., J. ve Baldwin, J., W., 1990. Identification of Modal Properties of Bridges, Journal of Structural Engineering, ASCE, 116, 7, 2008-2021.
- Salawu, O., S., 1997a. Integrity Index Method for Structural Assessment of Engineering Structures Using Modal Testing, Insight: The Journal of The British Institute of Non-Destructive Testing, 39, 1.
- Salawu O., S., 1997b. Detection of Structural Damage through Changes in Frequency: A Review, Engineering Structures, 19, 9, 718–723.
- Salawu, O. S. ve Williams, C., 1995. Review of Full-Scale Testing of Bridge Structures, Engineering Structures, 17, 2, 113–121.
- Sampaio, R., P., C., Maia, N., M., M. ve Silva, J., M., M., 1999. Damage Detection Using the Frequency-Response- Function Curvature Method, Journal of Sound and Vibration, 226, 5, 1029-1042.
- Sanchez, J., C., H., 2005. Evaluation of Structural Damage Identification Methods Based on Dynamic Characteristics, Ph.D. Thesis, Department Of Civil Engineering, University of Puerto Rico, Puerto Rico.
- SAP2000, 2008. Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures, Computers and Structures Inc, Berkeley, California, 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.
- Shi, Z., H., Law, S., S. ve Zhang, L., M., 2002. Structural Damage Detection from Modal Strain Energy Change, Journal of Engineering Mechanics, 126, 12, 1216–1223.
- Stubbs, N. ve Osegueda, R., 1990a. Global Non-Destructive Damage Evaluation in Solids, the International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis, 5, 2, 67-79.
- Stubbs, N. ve Osegueda, R., 1990b. Global Damage Detection in Solids-Experimental Verification, the International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis, 5, 2, 81–97.
- Stubbs, N., Kim, J., T. ve Topole, K., 1992. An Efficient and Robust Algorithm for Damage Localization in Offshore Platforms, Proceedings ASCE 10th Structures Congress, 543–546.
- Teughels, A. ve Roeck, G., D., 2003. Damage Assessment of the Z24 Bridge by FE Model Updating, Key Engineering Materials, 245-246, 19-26.
- Thyagarajan, S., K., Schulz, M., J., Pai, P., F. ve Chung, J., 1998. Detecting Structural Damage using Frequency Response Functions, Journal of Sound and Vibration, 210, 1, 162–170.
- Türker, T., Kartal, M., E., Bayraktar, A. ve Muvafık, M., 2009. Assessment of Semi-Rigid Connections in Steel Structures by Modal Testing, Journal of Constructional Steel Research, 65, 7, 1538-1547.
- Unger, J., F., Teughels, A. ve Roeck, G., D., 2006. System Identification and Damage Detection of a Prestressed Concrete Beam, Journal of Structural Engineering, ASCE November, 1691-1698.
- Uzgider, Z., Sanli, A., K., Piroglu, F. ve Caglayan, D., B., 1993. Identification of Railway Bridges using Locomotive-Induced Vibrations, In Bridge Management 2, Thomas Telford, London, 833-841.
- Vanhonacker, P., 1980. The Use of Modal Parameters of Mechanical Structures In Sensitivity Analysis, System Synthesis And System Identification Methods, Ph.D. Dissertation, 80D04, Mechanical Engineering Department, K.U. Leuven.
- Vestroni, F. ve Capecchi, D., 2000. Damage Detection in Beam Structures Based on Frequency Measurements, Journal Engineering Mechanics, 126, 7, 761-768.
- Wang, X., Ross, R., J., Hunt, M., O., Erickson, J., R. ve Forsman, J., W., 2005. Low Frequency Vibration Approach for Assessing Performance of Wood Floor System, Wood and Fiber Science, 37, 3, 371-378.

- Xia, Y. ve Hao, H., 2000. Measurement Selection for Vibration-Based Structural Damage Identification, Journal of Sound and Vibration, 236, 1, 89-104.
- Yu, D., J. 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 IMAC.
- Zhang, L., Brincker, R. ve Andersen, P., 2002. An Overview of Operational Modal Analysis: Major Development and Issues, B&K Technical Paper, 152-161.
- Zienkiewicz, O., C., 2000. The Finite Element Method, Mcgraw Hill Book Company.

## ÖZGEÇMİŞ

Temel TÜRKER, 1980 yılında Trabzon ilinin Akçaabat ilçesinde doğdu. İlk ve orta öğrenimini Akçaabat'ta, lise öğrenimini Trabzon'da tamamladı. 1998 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimine başladı. 2002 yılında İnşaat Mühendisliği Bölümü'ndeki lisans eğitimini tamamladı. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı ve 2005 yılında "Çelik Çerçeve Sistemlerin Dinamik Karakteristiklerinin Deneysel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi" başlıklı yüksek lisans tezi hazırlayarak yüksek lisans eğitimini tamamladı. 2005 yılında aynı bölümde doktora eğitimine başladı ve araştırma görevlisi olarak atandı.

İyi derecede İngilizce bilen TÜRKER'in, bugüne kadar birçok akademik çalışmasından yayınladığı SCI/SCI-E indeksli yayınlarının listesi aşağıda sunulmaktadır.

1. Bayraktar, A., Altunışık, A., C., Sevim, B. ve **Türker, T.**, 2007. Modal Testing and Finite Element Model Calibration of an Arch Type Steel Footbridge, Steel and Composite Structures, 7, 6 487-502.
2. **Türker, T.** ve Bayraktar, A., 2008. Structural Parameter Identification of Fixed End Beams by Inverse Method Using Measured Natural Frequencies, Shock and Vibration, 15, 5, 505-515.
3. Bayraktar, A., Altunışık, A., C., Sevim, B., Kartal, M., E. ve **Türker, T.**, 2008. Near-Fault Ground Motion Effects on the Nonlinear Response of Dam-Reservoir-Foundation Systems, Structural Engineering and Mechanics, 28, 4, 411-442.
4. Bayraktar, A., Altunışık, A., C., Sevim, B., **Türker, T.**, Akköse, M. ve Coşkun, N., 2008. Modal Analysis, Experimental Validation and Calibration of a Historical Masonry Minaret, Journal of Testing and Evaluation, 36, 6, 516-524.
5. **Türker, T.**, Kartal, M., E., Bayraktar, A. ve Muvafık, M., 2009. Assessment of Semi-Rigid Connections in Steel Structures by Modal Testing, Journal of Constructional Steel Research, 65, 7, 1538-1547.
6. Bayraktar, A., Sevim, B., Altunışık, A., C. ve **Türker, T.**, 2009. Analytical and Operational Modal Analyses of Turkish Style Reinforced Concrete Minarets for Structural Identification, Experimental Techniques, 33, 2, 65-75.

7. Bayraktar, A., Altunışık, A., C., Sevim, B., Kartal, M.E., **Türker, T.** ve Bilici, Y., 2009. Comparison of Near and Far Fault Ground Motion Effects on the Nonlinear Response of Dam-Reservoir-Foundation Systems, Nonlinear Dynamics, 58, 655-673.
8. Bayraktar, A., Altunışık, A., C., Sevim, B. ve **Türker, T.**, 2009. Modal Testing, Finite Element Model Updating and Dynamic Analysis of an Arch Type Steel Footbridge, Journal of Performance of Constructed Facilities, 23, 2, 81-89.
9. Bayraktar, A., Altunışık, A., C., Sevim, B., **Türker, T.**, Domaniç, A. ve Taş, Y., 2009. Vibration Characteristics of Kömürhan Highway Bridge Constructed with Balanced Cantilever Method, Journal of Performance of Constructed Facilities, 23, 2, 90-99.
10. Bayraktar, A., **Türker, T.**, Sevim, B., Altunışık, A., C. ve Yıldırım, F., 2009. Modal Parameter Identification of Hagia Sophia Bell-Tower via Ambient Vibration Test, Journal of Nondestructive Evaluation, 28, 1, 37-47.
11. Bayraktar, A., Birinci, F., Altunışık, A., C., **Türker, T.** ve Sevim, B., 2009. Finite Element Model Updating of Senyuva Historical Arch Bridge using Ambient Vibration Tests, The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, 4, 4, 177-185.
12. Bayraktar, A., Altunışık, A., C., Sevim, B., **Türker, T.** ve Domaniç, A., 2009. Kömürhan Köprüsünün Sonlu Eleman Model İyileştirilmesi, Teknik Dergi, 20, 2, 4675-4700.
13. Özcan, D., M., Bayraktar, A., Şahin, A., Haktanır, T. ve **Türker, T.**, 2009. Experimental and Finite Element Analysis on the Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC) Beams Ultimate Behavior, Construction and Building Materials, 23, 2, 1064-1077.
14. Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B., **Türker, T.** ve Domaniç, A., 2009. Kömürhan Köprüsünün Sonlu Eleman Model İyileştirilmesi, Teknik Dergi, 20, 2, 4675-4700.
15. Bayraktar, A., **Türker, T.**, Akköse, M., Ateş, Ş., 2010. The Effect of Reservoir Length on Seismic Performance of Gravity Dams to Near- and Far-Fault Ground Motions, Natural Hazards, 52, 2, 257-275.
16. Bayraktar, A., **Türker, T.**, Altunışık, A., C. ve Sevim, B., 2010. Evaluation of Blast Effects on Reinforced Concrete Buildings Considering Operational Modal Analysis Results, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 30, 310-319.
17. Bayraktar, A., Sevim, B., Altunışık, A., C. ve **Türker, T.**, 2010. Effect of the Model Updating on Earthquake Behavior of Steel Storage Tanks, Journal of Constructional Steel Research, 66, 462-469.
18. Bayraktar, A., Sevim, B., Altunışık, A., C. ve **Türker, T.**, 2010. Earthquake Analysis of Reinforced Concrete Minarets using Ambient Vibration Test Results, The Structural Design of Tall and Special Buildings, 19, 3, 257-273.

19. Bayraktar, A., Altunışık, A., C., Sevim, B. ve **Türker, T.**, 2010. Finite Element Model Updating of Kömürhan Highway Bridge based on Experimental Measurements, Journal of Smart Structures and Systems, 6, 4, 373-388.
20. Bayraktar, A., Altunışık, A., C., Sevim, B. ve **Türker, T.**, 2010. Earthquake Behaviour of Kömürhan Highway Bridge using Validated Finite Element Model, Journal of Testing and Evaluation, 38, 4.
21. Bayraktar, A., **Türker, T.**, Altunışık, A., C., Sevim, B., Şahin, A. ve Özcan, D., M., 2010. Binaların Dinamik Parametrelerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi, Teknik Dergi, 337, 5185-5205.
22. Şahin, A., Bayraktar, A., Özcan, D. M., Sevim, B., Altunışık, A., C. ve **Türker, T.** 2010. Dynamic Field Test, System Identification and Modal Validation of a RC Minaret: Pre and Post Processing the Wind-Induced Ambient Vibration Data, Journal of Performance of Constructed Facilities, ASCE, (baskıda).
23. Bayraktar, A., Altunışık, A., C., Birinci, F., Sevim, B. ve **Türker, T.**, 2010. Finite Element Analysis and Vibration Testing of a Two-Span Masonry Arch Bridge, Journal of Performance of Constructed Facilities ASCE, 24, 1, 46-52.
24. Bayraktar, A., Altunışık, A., C., Sevim, B. ve **Türker, T.**, 2010. Ambient Vibration Tests of a Steel Footbridge, Journal of Nondestructive Evaluation, 29, 1, 14-24.
25. Hacıfendioğlu, K., Bayraktar, A., **Türker, T.**, 2010. Seismic Response of Concrete Gravity Dam-Ice Covered Reservoir-Foundation Interaction Systems, Structural Engineering and Mechanics, 36,4.
26. **Türker, T.**, Bayraktar, A., 2010. Experimental and Numerical Investigation of Brace Configuration Effects on Steel Structures, Journal of Constructional Steel Research, 67, 5, 854-865.
27. Bayraktar, A., Altunışık, A., C., Sevim, B. ve **Türker, T.**, 2011. Seismic Response of a Historical Masonry Minaret using a FE Model Updated with Operational Modal Testing, Journal of Vibration and Control, 17, 1, 129-149.
28. **Türker, T.**, Bayraktar, A., 2011. An Approach on Damage Detection of Beams Using Operational and Numerical Modal Analyses, Journal of Testing and Evaluation, 39, 4.