

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**BETONARME BİNALARIN DİNAMİK DAVRANIŞINA LİFLİ POLİMER
KOMPOZİT MALZEME ETKİSİNİN DENEYSEL VE ANALİTİK YÖNTEMLERLE
BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Olguhan Şevket KARAHASAN

**HAZİRAN 2017
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**BETONARME BİNALARIN DİNAMİK DAVRANIŞINA LİFLİ POLİMER KOMPOZİT
MALZEME ETKİSİNİN DENEYSEL VE ANALİTİK YÖNTEMLERLE BELİRLENMESİ**

Olguhan Şevket KARAHASAN

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

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 30 / 05 / 2017

Tezin Savunma Tarihi : 16 / 06 / 2017

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK

Trabzon 2017

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında
Olguhan Şevket KARAHASAN Tarafından Hazırlanan

BETONARME BİNALARIN DİNAMİK DAVRANIŞINA LİFLİ POLİMER KOMPOZİT
MALZEME ETKİSİNİN DENEYSEL VE ANALİTİK YÖNTEMLERLE BELİRLENMESİ



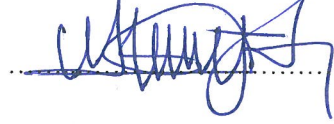
başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 31 / 05 / 2017 gün ve 1704 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Doç. Dr. Süleyman ADANUR

Üye : Doç. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK

Üye : Yrd. Doç. Dr. Murat GÜNAYDIN


.....

.....

.....

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır.

“Betonarme Binaların Dinamik Davranışına Lifli Polimer Kompozit Malzeme Etkisinin Deneysel ve Analitik Yöntemlerle Belirlenmesi” isimli tez çalışmasını bana öneren ve her aşamasında gerek bilgi ve tecrübelerini gerekse manevi desteğini benden esirgemeyen Hocam Sayın Doç. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamı başından beri takip eden, inceleyen ve değerli görüş ve bilgilerini benimle paylaşan, laboratuvar modelinin oluşturulması kısmında, gece-gündüz demeden, değerli zamanını ve emeğini benim için harcamaktan kaçınmayan değerli Hocam Sayın Doç. Dr. Süleyman ADANUR'a çok teşekkür ederim.

Tez çalışmamın her aşamasında bana yardımcı olan, değerli bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan Hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Murat GÜNAYDIN'a ve çalışmamın özellikle analitik kısmında bilgilerini benimle paylaşarak yardımcı olan Hocam Sayın Arş. Gör. Ali Fuat GENÇ'e çok teşekkür ederim.

Tez çalışmamın her aşamasında yanımda olan ve yardımlarıyla bu çalışmanın başarıya ulaşmasında büyük katkıları olan İnş. Yük. Müh. Fatih Yesevi OKUR, İnş. Yük. Müh. Ebru KALKAN, İnş. Yük. Müh. Ali YETİŞKEN, Arş. Gör. Fatma ÖNALAN, İnş. Müh. Yunus Emrahan AKBULUT, İnş. Müh. Özgün BIÇAK, İnş. Müh. Onur Oğuz ÖZTÜRK'e teşekkür ederim.

Tez çalışmamın sağlıklı bir şekilde yürütülmesi için maddi destek sağlayan BASF Yapı Kimyasalları Sanayi A.Ş.'ye teşekkür ederim.

Öğrenim hayatım boyunca bana her türlü desteği veren babam Ercüment Kaşif KARAHASAN'a, annem Leyla KARAHASAN'a ve kardeşim Alghan Kaşif KARAHASAN'a göstermiş oldukları sabırdan dolayı teşekkür eder, bu çalışmanın, yeni çalışmalara ışık tutmasını ve ülkemize faydalı olmasını temenni ederim.

Olguhan Şevket KARAHASAN
Trabzon 2017

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “BETONARME BİNALARIN DİNAMİK DAVRANIŞINA LİFLİ POLİMER KOMPOZİT MALZEME ETKİSİNİN DENEYSEL VE ANALİTİK YÖNTEMLERLE BELİRLENMESİ” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 16/06/2017

Olguhan Şevket KARAHASAN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	IX
SUMMARY	X
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XI
TABLolar DİZİNİ.....	XIX
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XXI
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş	1
1.2. Konu ile İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar.....	2
1.2.1. Mühendislik Yapılarının Dinamik Davranışlarının Belirlenmesi ile İlgili Çalışmalar	3
1.2.2. Mühendislik Yapılarının LP Kompozit Malzemelerle Onarılması ve Güçlendirilmesi ile İlgili Çalışmalar.....	8
1.3. Tezin Amacı ve İçeriği	16
1.4. Deneysel Modal Analiz Yöntemi	17
1.4.1. Deneysel Modal Analiz Yönteminde Kullanılan Ölçüm Sistemi.....	18
1.4.1.1. Titreştiriciler	18
1.4.1.1.1. Darbe Çekiçleri.....	18
1.4.1.2. İvmeölçerler.....	19
1.4.1.3. Veri Toplama Sistemi ve Sinyal İşleme	21
1.4.2. Deneysel Modal Analiz Yöntemi ile İlgili Genel Kurallar.....	25
1.4.3. Deneysel Modal Analiz Yöntemine Ait Formülasyon	27
1.4.3.1. Çevresel Titreşim Yöntemi.....	27
1.4.3.1.1. Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayrıştırma (GFOA) Yöntemi.....	29
1.4.3.1.2. Stokastik Altalan Belirleme (SAB) Yöntemi	31
1.4.3.2. Zorlanmış Titreşim Yöntemi	34
1.5. Sonlu Eleman Yöntemine Dayalı Dinamik Formülasyon	35

1.5.1.	Analitik Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi.....	37
1.5.2.	Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Dinamik Davranışın Belirlenmesi	39
1.5.2.1.	Newmark Yöntemine Göre Zaman Tanım Alanında Dinamik Analiz.....	41
1.5.3.	Yapı Malzemesi Davranışının Modellenmesi	46
1.5.3.1.	Drucker-Prager Malzeme Modeli	47
1.5.3.2.	William ve Warnke kırılma Modeli.....	49
1.6.	Analitik ve Deneysel Dinamik Karakteristiklerin Modal Güvence Kriterine (MGK) Göre Değerlendirilmesi	52
1.7.	Lifli Polimerler	52
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR.....	55
2.1.	Giriş	55
2.2.	Deneysel Çalışmalar	55
2.2.1.	Betonarme Düzlem Çerçeve Modelinin Geometrik Özellikleri	55
2.2.2.	Betonarme Düzlem Çerçeve Modelinin Malzeme Özellikleri	57
2.2.3.	Betonarme Düzlem Çerçeve Modelinin İnşa Detayları.....	57
2.3.	Deneysel Çalışmalar	59
2.3.1.	Çevresel Titreşim Yöntemiyle (ÇTY) Hasarsız Durumdaki Betonarme Düzlem Çerçeve Modelinin Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi	59
2.3.2.	Çevresel Titreşim Yöntemiyle (ÇTY) Hasarlı Durumdaki Betonarme Düzlem Çerçeve Modelinin Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi	66
2.3.3.	Çevresel Titreşim Yöntemiyle (ÇTY) Onarılmış Durumdaki Betonarme Düzlem Çerçeve Modelinin Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi	73
2.3.4.	Çevresel Titreşim Yöntemiyle (ÇTY) Güçlendirilmiş Durumdaki Betonarme Düzlem Çerçeve Modelinin Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi	80
2.4.	Analitik Çalışmalar	92
2.4.1.	Hasarsız Durumdaki Betonarme Düzlem Çerçevenin Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması	92
2.4.2.	Hasarlı Durumdaki Betonarme Düzlem Çerçevenin Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması	105
2.4.3.	Onarılmış Durumdaki Betonarme Düzlem Çerçevenin Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması	109
2.4.4.	Güçlendirilmiş Durumdaki Betonarme Düzlem Çerçevenin Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması	114
2.4.5.	Betonarme Düzlem Çerçeve Modelinin Doğrusal Olmayan Dinamik Davranışlarının Belirlenmesi	119
2.4.5.1.	Hasarsız Başlangıç Sonlu Eleman Modelinin Doğrusal Olmayan Dinamik Analizi	120

2.4.5.1.1.	Yerdeğiştirmeler	120
2.4.5.1.2.	Asal Gerilmeler.....	122
2.4.5.1.3.	Asal Şekildeğiştirmeler.....	123
2.4.5.2.	Hasarsız Bütünsel Güncelleştirilmiş Sonlu Eleman Modelinin Doğrusal Olmayan Dinamik Analizi	126
2.4.5.2.1.	Yerdeğiştirmeler	126
2.4.5.2.2.	Asal Gerilmeler.....	127
2.4.5.2.3.	Asal Şekildeğiştirmeler.....	129
2.4.5.3.	Hasarsız Yerel Güncelleştirilmiş Sonlu Eleman Modelinin Doğrusal Olmayan Dinamik Analizi	131
2.4.5.3.1.	Yerdeğiştirmeler	131
2.4.5.3.2.	Asal Gerilmeler.....	133
2.4.5.3.3.	Asal Şekildeğiştirmeler.....	134
2.4.5.4.	Betonarme Düzlem Çerçevenin Hasarlı Durumunun Doğrusal Olmayan Dinamik Analizi.....	137
2.4.5.4.1.	Yerdeğiştirmeler	137
2.4.5.4.2.	Asal Gerilmeler.....	138
2.4.5.4.3.	Asal Şekildeğiştirmeler.....	140
2.4.5.5.	Betonarme Düzlem Çerçevenin Onarılmış Durumunun Doğrusal Olmayan Dinamik Analizi.....	142
2.4.5.5.1.	Yerdeğiştirmeler	142
2.4.5.5.2.	Asal Gerilmeler.....	144
2.4.5.5.3.	Asal Şekildeğiştirmeler.....	145
2.4.5.6.	Betonarme Düzlem Çerçevenin Güçlendirilmiş Durumunun Doğrusal Olmayan Dinamik Analizi	148
2.4.5.6.1.	Yerdeğiştirmeler	148
2.4.5.6.2.	Asal Gerilmeler.....	149
2.4.5.6.3.	Asal Şekildeğiştirmeler.....	151
2.4.5.7.	Betonarme Düzlem Çerçevenin Güçlendirilmiş Durumunun Yüzde Beş Sönüm Oranı Dikkate Alınarak Yapılan Doğrusal Olmayan Dinamik Analizi.....	153
2.4.5.7.1.	Yerdeğiştirmeler	153
2.4.5.7.2.	Asal Gerilmeler.....	155
2.4.5.7.3.	Asal Şekildeğiştirmeler.....	157
2.4.6.	Doğrusal Olmayan Dinamik Analiz ile Betonarme Çerçeve de Hasar Neticesinde Oluşan Çatlakların Değerlendirilmesi	159

3.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	161
4.	KAYNAKLAR	168
ÖZGEÇMİŞ		



Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

BETONARME BİNALARIN DİNAMİK DAVRANIŞINA LİFLİ POLİMER KOMPOZİT MALZEME ETKİSİNİN DENEYSEL VE ANALİTİK YÖNTEMLERLE BELİRLENMESİ

Olguhan Şevket KARAHASAN

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Ahmet Can Altunışık
2017, 178 Sayfa

Bu tez çalışmasında, betonarme binaların dinamik davranışına lifli polimer kompozit malzeme etkisi deneysel ve analitik yöntemlerle belirlenmiştir. Bu amaçla, laboratuvar ortamında inşa edilen betonarme düzlem çerçeve üzerinde analitik ve deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Yüksek lisans tez çalışması üç bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm genel bilgiler bölümü olup, mühendislik yapılarının dinamik davranışı ile ilgili çalışmalar, sonlu eleman ve deneysel modal analiz yöntemleri ile ilgili genel bilgiler ve bu yöntemlere ait formülasyonlar, bu bölümde sunulmaktadır. İkinci bölümde; yapılan çalışmalar ve bu çalışmalardan elde edilen bulgulara yer verilmektedir. İkinci bölümde yapılan çalışmalar iki kısma ayrılmıştır. İlk kısımda; laboratuvar modelinin hasarsız, hasarlı, onarılmış ve güçlendirilmiş durumları için dinamik davranışlar deneysel modal analiz yöntemi ile belirlenmiş ve karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. İkinci kısımda ise; betonarme düzlem çerçevenin sonlu eleman modeli aynı durumlar için oluşturularak dinamik davranışlar analitik olarak belirlenmiş ve deneysel sonuçlara göre sonlu eleman modellerinde iyileştirme yapılmıştır. Ayrıca, binaların iyileştirilmiş sonlu eleman modellerinin bu dört durumu için doğrusal olmayan dinamik davranışlar elde edilmiştir. Üçüncü bölümde; tez çalışmasından elde edilen sonuçlara ve yapılan önerilere yer verilmektedir. Bu bölümü kaynaklar ve özgeçmiş izlemektedir.

Anahtar Kelimeler : Deneysel Modal Analiz Yöntemi, Sonlu Eleman Model İyileştirme, Doğrusal Olmayan Dinamik Davranış, Lifli Polimer Kompozit Malzeme.

Master Thesis

SUMMARY

DETERMINATION OF THE EFFECT OF FIBER REINFORCED POLYMERS
COMPOSITE MATERIAL ON EXPERIMENTAL AND ANALYTIC METHODS OF
REINFORCED CONCRETE BUILDINGS OF DYNAMIC BEHAVIORS

Olguhan Şevket KARAHASAN

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK
2017, 178 Page

In thesis, the effect of fiber reinforced polymer material on the dynamic behavior of reinforced concrete buildings is determined by experimental and analytical methods. For this purpose, analytical and experimental studies have been carried out on reinforced concrete plane frame built in the laboratory conditions.

The master thesis work consist of three chapters. The first chapter is the general information section, general information about the dynamic behavior of engineering structures, finite elements and experimental modal analysis methods and formulations of these methods are presented in this section. In the second chapter; are given made works and the findings obtained from these studies. The works carried out in the second chapter is divided into two parts. In the first part, the dynamic behavior of the laboratory model for undamaged, damaged, repaired and strengthened states was determined by experimental modal analysis method and examined comparatively. In the second part; the finite element model of the reinforced concrete plane frame is established for the same conditions and the dynamic behavior is determined analytically, the finite element models are updated according to the experimental results. In addition, dynamic behaviors are obtained for these four states of the updating finite element models of buildings and the initial finite element model. In the third chapter; the results obtained from the thesis study and suggestions are given. Lastly, references and autobiography are represented.

Key Words: Experimental Modal Analysis Method, Finite Element Model Update, Nonlinear Dynamic Behavior, Fiber Reinforced Polymers.

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1.	B&K 8210 tipi darbe çekici 19
Şekil 1.2.	Piezoelektrik tipi ivmeölçerin iç mekanizması 20
Şekil 1.3.	B&K 8340 tipi tek eksenli ve B&K 4507 tipi tek eksenli ivmeölçerler 21
Şekil 1.4.	B&K 3560 C tipi 17 kanallı veri toplama ünitesi 23
Şekil 1.5.	Çevresel Titreşim Yöntemi'ne göre yapıların dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi 29
Şekil 1.6.	Zorlanmış Titreşim Yöntemi'nin şematik gösterimi ve frekans davranış fonksiyonunun belirlenmesi 34
Şekil 1.7.	Darbe çekici ile dinamik karakteristiklerin belirlenmesi 35
Şekil 1.8.	Tanjant ve sekant rijitliği 45
Şekil 1.9.	Malzeme davranış modelleri 47
Şekil 1.10.	Drucker-Prager yaklaşımının asal gerilme uzayındaki akma yüzeyi 49
Şekil 2.1.	Betonarme çerçeve modeline ait şematik kesit ve kat kalıp planı 56
Şekil 2.2.	Model çerçeveye ait eleman boyutları ve donatı yerleşim planları 58
Şekil 2.3.	Betonarme bina modeli 59
Şekil 2.4.	Betonarme düzlem çerçeve modeli 59
Şekil 2.5.	Deneysel ölçümler için ivmeölçer bağlantı noktalarının hazırlanması 60
Şekil 2.6.	Çevresel titreşim testlerinde kullanılan ivmeölçer yönleri ve yerleşim planı 61
Şekil 2.7.	Çerçeve modeli için elde edilen spektral yoğunluk matrisleri 62
Şekil 2.8.	Çerçeve modeli için GFOA yöntemine göre elde edilen mod şekilleri 63
Şekil 2.9.	Çerçeve modeli kararlılık ve spektral yoğunluk fonksiyonu diyagramları 64
Şekil 2.10.	Çerçeve modeli için SAB yöntemine göre elde edilen mod şekilleri 65
Şekil 2.11.	Çerçeve modelinin hasar durumuna ait bazı fotoğraflar 67
Şekil 2.12.	Hasarlı betonarme düzlem çerçeve modeli üzerinde gerçekleştirilen ölçümlere ait bazı fotoğraflar 68

Şekil 2.13.	Çerçeve modelinin hasarlı durumu için elde edilen spektral yoğunluk matrisleri	69
Şekil 2.14.	Çerçeve modelinin hasarlı durumu için GFOA yöntemine göre elde edilen mod şekilleri	70
Şekil 2.15.	Çerçeve modelinin hasarlı durumu için kararlılık ve spektral yoğunluk fonksiyonu diyagramları	71
Şekil 2.16.	Çerçeve modelinin hasarlı durumu için SAB yöntemine göre elde edilen mod şekilleri	72
Şekil 2.17.	Çerçeve modelinin enjeksiyon uygulamasına ait bazı fotoğraflar	74
Şekil 2.18.	Onarılmış betonarme çerçeve modeli üzerinde gerçekleştirilen ölçümlere ait bazı fotoğraflar	75
Şekil 2.19.	Çerçeve modeline enjeksiyon uygulandıktan sonra GFOA yönteminden elde edilen spektral yoğunluk matrisleri	76
Şekil 2.20.	Çerçeve modeline enjeksiyon uygulandıktan sonra GFOA yöntemine göre elde edilen mod şekilleri	77
Şekil 2.21.	Çerçeve modeline enjeksiyon uygulandıktan sonra SAB yöntemine göre elde edilen mod şekilleri	77
Şekil 2.22.	Çerçeve modeline enjeksiyon uygulandıktan sonra SAB yöntemine göre elde edilen mod şekilleri	78
Şekil 2.23.	Lifli polimer kompozit malzeme yapısı	81
Şekil 2.24.	Çerçeve modelinin LP kumaş ile güçlendirilmesi aşamalarına ait bazı fotoğraflar	85
Şekil 2.25.	LP kompozit güçlendirmeden sonra çerçeve modeli için gerçekleştirilen çevresel titreşim testi	87
Şekil 2.26.	Çerçeve modelinin güçlendirilmesinden sonra GFOA yönteminden elde edilen spektral yoğunluk matrisleri	88
Şekil 2.27.	Çerçeve modelinin güçlendirilmesinden sonra GFOA yöntemine göre elde edilen mod şekilleri	89
Şekil 2.28.	Çerçeve modelinin güçlendirilmesinden sonra SAB yönteminden elde edilen kararlılık ve spektral yoğunluk fonksiyonu diyagramları	90
Şekil 2.29.	Çerçeve modelinin güçlendirilmesinden sonra SAB yöntemine göre elde edilen mod şekilleri	91
Şekil 2.30.	Beton ve donatının sonlu eleman modeli	93
Şekil 2.31.	Çerçeve modelinin sonlu eleman modeli için oluşturulan temel, kolon, kiriş elemanlar ve bu elemanlara yerleştirilen donatı kafesi	93
Şekil 2.32.	Çerçeve modeline ait sonlu eleman modeli	95
Şekil 2.33.	ANSYS programında çerçeve modelinin analitik mod şekilleri...	96

Şekil 2.34.	Analitik ve deneysel yolla elde edilen hasarsız duruma ait MGK değerleri	97
Şekil 2.35.	Hasarsız betonarme çerçeve modelinin analitik ve deneysel yolla elde edilen mod şekillerinin karşılaştırılması	97
Şekil 2.36.	Çerçeve modelinin hasarsız durumuna ait Bütünsel Güncelleme için elde edilen Duyarlılık Analizi sonuçları	99
Şekil 2.37.	Analitik ve deneysel yolla elde edilen hasarsız duruma ait bütünsel güncelleme sonrası MGK değerleri.....	101
Şekil 2.38.	Hasarsız durumdaki betonarme çerçeveye ait yerel güncelleme için elde edilen duyarlılık analizi sonuçları	102
Şekil 2.39.	Çerçeve modelinin hasarsız durumuna ait yerel güncelleme ile elde edilen parametre değişimleri	102
Şekil 2.40.	Analitik ve deneysel yolla elde edilen hasarsız duruma ait yerel güncelleme sonrası MGK değerleri	103
Şekil 2.41.	Hasarsız durumdaki betonarme düzlem çerçeve modeline ait Yerel Güncelleme ile elde edilen parametre değişimlerinin sonlu eleman modeli üzerindeki değişimleri	104
Şekil 2.42.	Başlangıç haldeki hasarsız betonarme düzlem çerçeve sonlu eleman modeli ile hasarlı betonarme düzlem çerçeveye ait deneysel mod şekilleri arasındaki MGK değerleri.....	105
Şekil 2.43.	Hasarlı durumdaki betonarme düzlem çerçeveye ait yerel güncelleme için elde edilen duyarlılık analizi sonuçları.....	106
Şekil 2.44.	Hasarlı durumdaki betonarme çerçeve modeline ait yerel güncelleme ile elde edilen parametre değişimleri.....	106
Şekil 2.45.	Yerel güncelleme yapılmış hasarsız betonarme düzlem çerçeve sonlu eleman modeli ile hasarlı betonarme düzlem çerçeveye ait deneysel mod şekilleri arasındaki MGK değerleri.....	107
Şekil 2.46.	Hasarlı durumdaki betonarme düzlem çerçeveye ait yerel güncelleme ile elde edilen parametre değişimlerinin sonlu eleman modeli üzerindeki görüşleri.....	108
Şekil 2.47.	Hasarlı durumdaki betonarme düzlem çerçeveye ait yerel güncellenmiş analitik model ve deney modelinden elde edilen mod şekillerinin karşılaştırılması.....	109
Şekil 2.48.	Hasarlı durumdaki yerel güncelleme yapılmış betonarme düzlem çerçeveye ait analitik mod şekilleri ile onarılmış deneysel modelden elde edilen mod şekilleri arasındaki MGK değerleri ...	110
Şekil 2.49.	Onarılmış durumdaki betonarme düzlem çerçeveye ait yerel güncelleme için elde edilen duyarlılık analizi sonuçları.....	111
Şekil 2.50.	Onarılmış durumdaki betonarme çerçeve modeline ait yerel güncelleme ile elde edilen parametre değişimleri.....	111

Şekil 2.51.	Yerel güncelleme yapılan onarılmış modelin mod şekilleri ile onarılmış olan deney modelinden elde edilen mod şekilleri arasındaki MGK değerleri.....	112
Şekil 2.52.	Onarılmış durumdaki betonarme düzlem çerçeveye ait yerel güncelleme ile elde edilen parametre değişimlerinin sonlu eleman modeli üzerindeki görünüşleri.....	113
Şekil 2.53.	Onarılmış durumdaki betonarme düzlem çerçevenin yerel güncelleme ile elde edilen mod şekilleri ve deneysel olarak elde edilen mod şekillerinin karşılaştırılması	114
Şekil 2.54.	Beton ve LP kompozit tabakanın sonlu eleman modeli.....	115
Şekil 2.55.	Betonarme çerçeve modelin güçlendirilmesinde SHELL41 elemanı ile oluşturulan alanlar	115
Şekil 2.56.	Betonarme düzlem çerçevenin LP kumaşla güçlendirilmiş bazı elemanlarının görünümü	116
Şekil 2.57.	Betonarme düzlem çerçevenin LP kumaşla güçlendirilmiş halinin genel görünümü	117
Şekil 2.58.	Betonarme çerçeve modelinin güçlendirilmesinden sonra elde edilen analitik ve deneysel mod şekillerinin karşılaştırılması	118
Şekil 2.59.	Hasarsız, hasarlı, onarılmış ve güçlendirilmiş durumlardan elde edilen frekans değerlerinin karşılaştırılması	118
Şekil 2.60.	Kocaeli depreminin yatay bileşeninin ivme kaydı.....	119
Şekil 2.61.	Hasarsız başlangıç sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen yerdeğiştirme kontur diyagramları.....	121
Şekil 2.62.	Hasarsız başlangıç sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen maksimum yerdeğiştirmenin zamanla değişimi.....	121
Şekil 2.63.	Hasarsız başlangıç sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen maksimum asal gerilme kontur diyagramı	122
Şekil 2.64.	Hasarsız başlangıç sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen minimum asal gerilme kontur diyagramı	123
Şekil 2.65.	Hasarsız başlangıç sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi.....	123
Şekil 2.66.	Hasarsız başlangıç sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen maksimum asal şekildeğiştirme kontur diyagramı	124
Şekil 2.67.	Hasarsız başlangıç sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen minimum asal şekildeğiştirme kontur diyagramı	125

Şekil 2.68.	Hasarsız başlangıç sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen maksimum ve minimum asal şekildeğişirmelerin zamanla değişimi.....	125
Şekil 2.69.	Hasarsız bütünsel güncelleştirilmiş sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen yerdeğiştirme kontur diyagramları	126
Şekil 2.70.	Hasarsız bütünsel güncelleştirilmiş sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen maksimum yerdeğiştirmenin zamanla değişimi	127
Şekil 2.71.	Hasarsız bütünsel güncelleştirilmiş sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen maksimum asal gerilme kontur diyagramı	128
Şekil 2.72.	Hasarsız bütünsel güncelleştirilmiş sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen minimum asal gerilme kontur diyagramı	128
Şekil 2.73.	Hasarsız bütünsel güncelleştirilmiş sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi	129
Şekil 2.74.	Hasarsız bütünsel güncelleştirilmiş sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen maksimum asal şekildeğiştirme kontur diyagramı	130
Şekil 2.75.	Hasarsız bütünsel güncelleştirilmiş sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen minimum asal şekildeğiştirme kontur diyagramı	130
Şekil 2.76.	Hasarsız bütünsel güncelleştirilmiş sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen maksimum ve minimum asal şekildeğişirmelerin zamanla değişimi.....	131
Şekil 2.77.	Hasarsız yerel güncelleştirilmiş sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen yerdeğiştirme kontur diyagramları	132
Şekil 2.78.	Hasarsız yerel güncelleştirilmiş sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen maksimum yerdeğiştirmenin zamanla değişimi	132
Şekil 2.79.	Hasarsız yerel güncelleştirilmiş sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen maksimum asal gerilme kontur diyagramı	133
Şekil 2.80.	Hasarsız yerel güncelleştirilmiş sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen minimum asal gerilme kontur diyagramı	134
Şekil 2.81.	Hasarsız yerel güncelleştirilmiş sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi	134

Şekil 2.82.	Hasarsız yerel güncelleştirilmiş sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen maksimum asal şekildeğiştirme kontur diyagramı	135
Şekil 2.83.	Hasarsız yerel güncelleştirilmiş sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen minimum asal şekildeğiştirme kontur diyagramı	136
Şekil 2.84.	Hasarsız yerel güncelleştirilmiş sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen maksimum ve minimum asal şekildeğiştirmelerin zamanla değişimi.....	136
Şekil 2.85.	Betonarme düzlem çerçevenin hasarlı durumunun dinamik davranışından elde edilen yerdeğiştirme kontur diyagramları.....	137
Şekil 2.86.	Betonarme düzlem çerçevenin hasarlı durumunun dinamik davranışından elde edilen maksimum yerdeğiştirmenin zamanla değişimi.....	138
Şekil 2.87.	Betonarme düzlem çerçevenin hasarlı durumunun dinamik davranışından elde edilen maksimum asal gerilme kontur diyagramı	139
Şekil 2.88.	Betonarme düzlem çerçevenin hasarlı durumunun dinamik davranışından elde edilen minimum asal gerilme kontur diyagramı	139
Şekil 2.89.	Betonarme düzlem çerçevenin hasarlı durumunun dinamik davranışından elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi.....	140
Şekil 2.90.	Betonarme düzlem çerçevenin hasarlı durumunun dinamik davranışından elde edilen maksimum asal şekildeğiştirme kontur diyagramı	141
Şekil 2.91.	Betonarme düzlem çerçevenin hasarlı durumunun dinamik davranışından elde edilen minimum asal şekildeğiştirme kontur diyagramı	141
Şekil 2.92.	Betonarme düzlem çerçevenin hasarlı durumunun dinamik davranışından elde edilen maksimum ve minimum asal şekildeğiştirmelerin zamanla değişimi.....	142
Şekil 2.93.	Betonarme düzlem çerçevenin onarılmış durumunun dinamik davranışından elde edilen yerdeğiştirme kontur diyagramları.....	143
Şekil 2.94.	Betonarme düzlem çerçevenin onarılmış durumunun dinamik davranışından elde edilen maksimum yerdeğiştirmenin zamanla değişimi.....	143
Şekil 2.95.	Betonarme düzlem çerçevenin onarılmış durumunun dinamik davranışından elde edilen maksimum asal gerilme kontur diyagramı	144
Şekil 2.96.	Betonarme düzlem çerçevenin onarılmış durumunun dinamik davranışından elde edilen minimum asal gerilme kontur diyagramı	145

Şekil 2.97.	Betonarme düzlem çerçevenin onarılmış durumunun dinamik davranışından elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi.....	145
Şekil 2.98.	Betonarme düzlem çerçevenin onarılmış durumunun dinamik davranışından elde edilen maksimum asal şekildeğiştirme kontur diyagramı	146
Şekil 2.99.	Betonarme düzlem çerçevenin onarılmış durumunun dinamik davranışından elde edilen minimum asal şekildeğiştirme kontur diyagramı	147
Şekil 2.100.	Betonarme düzlem çerçevenin onarılmış durumunun dinamik davranışından elde edilen maksimum ve minimum asal şekildeğiştirmelerin zamanla değişimi.....	147
Şekil 2.101.	Betonarme düzlem çerçevenin güçlendirilmiş durumunun dinamik davranışından elde edilen yerdeğiştirme kontur diyagramları	148
Şekil 2.102.	Betonarme düzlem çerçevenin güçlendirilmiş durumunun dinamik davranışından elde edilen maksimum yerdeğiştirmenin zamanla değişimi	149
Şekil 2.103.	Betonarme düzlem çerçevenin güçlendirilmiş durumunun dinamik davranışından elde edilen maksimum asal gerilme kontur diyagramı.....	150
Şekil 2.104.	Betonarme düzlem çerçevenin güçlendirilmiş durumunun dinamik davranışından elde edilen minimum asal gerilme kontur diyagramı	150
Şekil 2.105.	Betonarme düzlem çerçevenin güçlendirilmiş durumunun dinamik davranışından elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi.....	151
Şekil 2.106.	Betonarme düzlem çerçevenin güçlendirilmiş durumunun dinamik davranışından elde edilen maksimum asal şekildeğiştirme kontur diyagramı	152
Şekil 2.107.	Betonarme düzlem çerçevenin güçlendirilmiş durumunun dinamik davranışından elde edilen minimum asal şekildeğiştirme kontur diyagramı	152
Şekil 2.108.	Betonarme düzlem çerçevenin güçlendirilmiş durumunun dinamik davranışından elde edilen maksimum ve minimum asal şekildeğiştirmelerin zamanla değişimi.....	153
Şekil 2.109.	Betonarme düzlem çerçevenin güçlendirilmiş durumunun yüzde beş sönüm oranı için dinamik davranışından elde edilen yerdeğiştirme kontur diyagramları.....	154
Şekil 2.110.	Betonarme düzlem çerçevenin güçlendirilmiş durumunun yüzde beş sönüm oranı için dinamik davranışından elde edilen maksimum yerdeğiştirmenin zamanla değişimi.....	154

Şekil 2.111.	Betonarme düzlem çerçevenin güçlendirilmiş durumunun yüzde beş sönüm oranı için dinamik davranışından elde edilen maksimum asal gerilme kontur diyagramı.....	155
Şekil 2.112.	Betonarme düzlem çerçevenin güçlendirilmiş durumunun dinamik davranışından elde edilen minimum asal gerilme kontur diyagramı	156
Şekil 2.113.	Betonarme düzlem çerçevenin güçlendirilmiş durumunun yüzde beş sönüm oranı için dinamik davranışından elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi.....	156
Şekil 2.114.	Betonarme düzlem çerçevenin güçlendirilmiş durumunun yüzde beş sönüm oranı için dinamik davranışından elde edilen maksimum asal şekildeğiştirme kontur diyagramı	157
Şekil 2.115.	Betonarme düzlem çerçevenin güçlendirilmiş durumunun yüzde beş sönüm oranı için dinamik davranışından elde edilen minimum asal şekildeğiştirme kontur diyagramı.....	158
Şekil 2.116.	Betonarme düzlem çerçevenin güçlendirilmiş durumunun yüzde beş sönüm oranı için dinamik davranışından elde edilen maksimum ve minimum asal şekildeğiştirmelerin zamanla değişimi.....	158
Şekil 2.117.	Dinamik analizler sonucu oluşan çatlakların karşılaştırılması.....	159

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. B&K 8210 tipi darbe çekicisine ait bazı özellikler.....	19
Tablo 1.2. B&K 4507 B 005 ve B&K 8340 tipi tek eksenli ivmeölçerlere ait bazı özellikler.....	21
Tablo 1.3. ÇTY'e dayalı bazı dinamik karakteristik belirleme yöntemleri ...	28
Tablo 1.4. Beton malzeme tanım tablosu.....	50
Tablo 1.5. Farklı türdeki liflerin birbirine göre avantaj ve dezavantajları	53
Tablo 2.1. Çerçeve modelinin inşasında kullanılan malzeme karışım miktarları.....	57
Tablo 2.2. Çerçeve modeli için GFOA yöntemine göre elde edilen dinamik karakteristikler	64
Tablo 2.3. Çerçeve modeli için SAB yöntemine göre elde edilen dinamik karakteristikler	66
Tablo 2.4. Çerçeve modelinin hasarlı durumuna ait GFOA ve SAB yöntemlerine göre elde edilen doğal frekansları.....	72
Tablo 2.5. Betonarme çerçeve sistemine ait hasarsız ve hasarlı durumlar için deneysel olarak elde edilen frekansların karşılaştırılması	73
Tablo 2.6. Concrecive 1302 epoksi enjeksiyon malzemesine ait bazı teknik özellikler	74
Tablo 2.7. Çerçeve modeline enjeksiyon uygulamasından sonra GFOA ve SAB yöntemleri için elde edilen dinamik karakteristikler.....	79
Tablo 2.8. Betonarme çerçeve sistemine ait hasarlı ve onarımlı durumlar için deneysel olarak elde edilen frekansların karşılaştırılması	79
Tablo 2.9. Seçilen bazı termositlerin fiziksel ve mekanik özellikleri	82
Tablo 2.10. Farklı tür liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri	82
Tablo 2.11. Karbon lifli polimer kumaşın bazı teknik özellikleri.....	83
Tablo 2.12. Mbrace Fibre Saturant yapıştırıcıya ait bazı teknik özellikler	84
Tablo 2.13. Çerçeve modelinin güçlendirilmesinden sonra GFOA ve SAB yöntemlerinden elde edilen frekans değerleri	91
Tablo 2.14. Betonarme çerçeve sistemine ait onarılmış ve güçlendirilmiş durumlar için deneysel olarak elde edilen frekansların karşılaştırılması	92
Tablo 2.15. Çerçeve modelinin başlangıç sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme özellikleri.....	94

Tablo 2.16.	Hasarsız durumdaki çerçeve modeli için analitik ve deneysel yolla elde edilen frekans değerlerinin karşılaştırılması	96
Tablo 2.17.	Bütünsel Güncelleme için seçilen belirsiz parametrelerin özellikleri	98
Tablo 2.18.	Hasarsız duruma ait Bütünsel Güncelleme ile parametrelerin değişim sonuçları	100
Tablo 2.19.	Hasarsız duruma ait Bütünsel Güncelleme sonucu elde edilen ve deneysel olarak elde edilen frekans değerleri arasındaki farklılıklar	100
Tablo 2.20.	Hasarsız durumdaki betonarme çerçeve modeline ait yerel güncelleme sonucu ve deneysel olarak elde edilen frekans değerlerinin karşılaştırılması.....	103
Tablo 2.21.	Hasarsız durumdaki betonarme çerçeve modeline ait başlangıç durum, bütünsel ve yerel güncelleme sonucu durum ile deneysel olarak elde edilen frekans değerlerinin karşılaştırılması	104
Tablo 2.22.	Başlangıç haldeki hasarsız betonarme düzlem çerçeve sonlu eleman modeli ile hasarlı betonarme düzlem çerçeveye ait deneysel frekans değerlerinin karşılaştırılması.....	105
Tablo 2.23.	Hasarlı durumdaki betonarme düzlem çerçeveye ait yerel güncelleme sonucu ve deneysel olarak elde edilen frekansların karşılaştırılması.....	107
Tablo 2.24.	Hasarlı durumdaki yerel güncelleme yapılmış betonarme düzlem çerçeveye ait başlangıç frekans değerleri ve onarılmış modelden deneysel olarak elde edilen frekansların karşılaştırılması	110
Tablo 2.25.	Onarılmış durumdaki betonarme düzlem çerçeveye ait yerel güncelleme sonucu ve deneysel olarak elde edilen frekansların karşılaştırılması	112
Tablo 2.26.	Betonarme düzlem çerçevenin güçlendirilmesinden sonra analitik olarak ve deneysel olarak elde edilen frekansların karşılaştırılması	117

SEMBOLLER DİZİNİ

A_k	: Tepki sinyalinin GSY fonksiyonuna ait k. artık değer matrisi
A_*	: Durum matrisi
B_*	: Veri matrisi
c	: Kohezyon
C	: Sönüm
C_*	: Sistem davranış matrisi
d_{maks}	: Maksimum agrega boyutu
D_*	: Doğrudan iletim matrisi
E_*	: Beklenen değer operatörü
f_c	: Tek eksenli basınç dayanımı
$G_{xx}(j\omega)$: Etki sinyalinin Güç Spektral Yoğunluk (GSY) fonksiyonu
$G_{yy}(j\omega)$: Tepki sinyalinin Güç Spektral Yoğunluk fonksiyonu
$H(j\omega)$: Frekans davranış fonksiyonu
\bar{H}	: Kompleks eşlenik
$-H_{ik}(i\omega)$: Transfer Matrisi
I_1	: Gerilme tansörünün birinci invaryantı
J_2	: Deviatorik gerilme tansörünün ikinci invaryantı
K	: Rijitlik
K_L	: Doğrusal sistemin tanjant rijitlik matrisi
K_{NL}	: Doğrusal olmayan sistemin tanjant rijitlik matrisi
M	: Kütle
n	: Mod sayısı
R	: Sisteme etkiyen ve zamanla değişen dış yük vektörü
$R(t)$: Kuvvet vektörü
R_k	: Artık değer fonksiyonu
$R(t)$: Kuvvet vektörü
s	: Tekil değerler
s_{ij}	: Skaler tekil değerler
u_{ij}	: Tekil vektörler

u_k	: Belirgin etki sinyal vektörü
$U(t)$: Zamana bağlı yerdeğiştirme
$\dot{U}(t)$: Zamana bağlı hız
$\ddot{U}(t)$: Zamana bağlı ivme
v_k	: İvmeölçer kusurlarından dolayı işlenen gürültü sinyali
ω_n	: Doğal açısal frekans
w_k	: Modeldeki belirsizlikler ve kusurlar nedeniyle işlenen gürültü sinyalleri
ω_n	: Doğal açısal frekans
x_k	: Ayrık-zaman durum vektörü
$x(t)$: Durum vektörü
$X_i(t)$: Yapay bir kuvvet
$-X_i(t)$: Yapay kuvvet sinyali
$-Y_k(t)$: Yapının etkiye göstermiş olduğu tepki
λ_k	: Kutup fonksiyonu
δ_{pq}	: Kronecker delta
α	: Faz açısı
ϕ	: Hareketin genlik vektörü
ψ_a	: Analitik mod şekil vektörü
ψ_d	: Deneysel mod şekil vektörü

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Ülkemizin tamamına yakın bölümü aktif deprem kuşağı üzerinde yer almaktadır. Buna rağmen yapılaşmadaki yetersizlikler ve hatalar depremlerde büyük hasarlara yol açmakta olup, çok sayıda can ve mal kayıplarına sebep olmaktadır. Ülkemizde yıkıcı depremler olmuştur ve olacaktır; bu durumda depreme karşı önlem alınması zorunluluğu ortaya çıkmaktadır. Ülkemizin depremselliği bilinmesine rağmen uzun yıllar “depreme dayanıklı yapı” kavramına önem verilmemiş, depreme karşı durumu belirsiz, yeterliliği şüpheli büyük bir yapı stoğu ortaya çıkmıştır (Özgen vd., 2001).

Depreme dayanıklı yapı tasarımı kapsamında, depremin şiddetine göre yapıların ve taşıyıcı sistem elemanlarının kabul edilebilir sınırlar içerisinde hasar alabileceği dikkate alınmaktadır. Deprem yönetmeliğimizde de belirtildiği gibi; kolon, kiriş, perde gibi taşıyıcı sistem elemanlarında, yapının ekonomik ömrü içinde meydana gelebilecek hafif şiddetteki depremlerde yapısal hasarların oluşmaması istenmektedir. Orta şiddetteki depremlerde, taşıyıcı olan elemanlarda onarılabilir düzeyde, taşıyıcı olmayan bölümlerde ise yapısal hasarlara izin verilmektedir. Yapının ekonomik ömrü içinde en çok bir kez olabilecek çok şiddetli depremlerde ise taşıyıcı elemanlar onarılamayacak derecede hasar görebilir. Fakat bu durumda bile can kaybı meydana getirecek yıkımlar olmamalıdır. Depreme dayanıklı bir yapı, bu kavrama uygun bir yapı olarak kabul edilmektedir (Başegmez 2007).

Güçlendirmenin amacı, yapıyı yalnızca deprem öncesi sahip olduğu güvenliğe ulaştırmak değil, yapının şiddetli yer hareketlerine karşı koyabilecek performansa ulaştırılmasıdır. Yapıların güçlendirilmesi için pek çok yöntem uygulanmaktadır. Yapının içinde bulunduğu koşullara göre en uygun olan yöntem seçilerek uygulanmalıdır. Zaman ve maliyet gibi çeşitli kriterlere göre yapılacak bu güçlendirme yöntemlerinden bir tanesi de, lifle kuvvetlendirilmiş polimer kompozit malzeme (FRP) kullanılmasıdır. Karbon, cam ve aramid gibi malzemelerden üretilen bu lifler yüksek elastisite modülüne ve dayanıma sahip olup, hafif, kolay, çabuk uygulanabilir ve çevre koşullarına dayanıklı malzemelerdir. Lifle kuvvetlendirilmiş polimer kompozit malzemeler ile güçlendirme, yeni bir yöntem olmasına rağmen, bugüne kadar yapılmış çalışmalar oldukça fazladır. Özellikle betonarme

elemanlar üzerinde, birçok değişkene bağlı olarak lifli polimer (LP) kompozit malzemeler ile güçlendirilmenin etkileri incelenmiştir (Bulut 2006). Lifli polimerler, yapıların depreme karşı performansının arttırılmasında, mevcut yapıdaki fonksiyonel değişikliklerde, yapıların değişen yönetmeliklere uygun hale getirilmesinde, kiriş, döşeme, duvar, kolon, baca, silo, tünel, boru, tank gibi farklı yapıların veya taşıyıcı sistem elemanlarının güçlendirilmesinde kullanılabilir. Bu malzeme, plakalar halinde uygulanabilmekte olup, lif doğrultusuna bağlı olarak tek ve çift yönlü kumaş şeklinde de kullanılabilir. Özellikle düzgün olmayan kesite sahip yapı elemanlarının güçlendirilmesinde, lifli polimer kompozit malzemeler yaygın olarak kullanım alanı bulmaya başlamıştır (Karaşın vd., 2010).

Mühendislik yapıların yapısal davranışları dinamik karakteristiklere bağlı olarak belirlenmektedir. Dinamik karakteristikler, analitik ve deneysel yöntemler kullanılarak elde edilebilir. Analitik yöntemde, yapının geometrisi, malzeme özellikleri ve mesnet şartları dikkate alınarak oluşturulan sonlu eleman modellerinin serbest titreşim (modal) analizleri gerçekleştirilmekte ve doğal frekanslar ile mod şekilleri elde edilmektedir.

Dinamik karakteristiklerin deneysel olarak belirlenmesinde, “Deneysel Modal Analiz Yöntemi” özellikle son yıllarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde, yapı üzerinde maksimum genliklerin oluştuğu noktalara hassas ivmeölçerler yerleştirilmekte, elde edilen titreşim sinyalleri veri toplama ünitesinde toplanmaktadır. Toplanan sinyaller, çeşitli yazılımlar aracılığıyla işlendikten sonra dinamik karakteristikler elde edilmektedir.

Analitik ve deneysel olarak elde edilen dinamik karakteristikler, genellikle işçilik hataları, hedef dayanımın sağlanamaması, sıcaklık etkileri gibi nedenlerden dolayı birebir aynı elde edilememektedir. Deneysel yöntemlerle elde edilen veriler yapının o anki mevcut durumunu yansıttığından dolayı, tespit edilem farklılıkları gidermek için sonlu eleman modelinde iyileştirme yapılması gerekmektedir. Bu amaçla yapılan işleme “Sonlu Eleman Model İyileştirme” adı verilmektedir.

1.2. Konu ile İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar

Bu kısımda, konu ile ilgili daha önce gerçekleştirilen çalışmalara yer verilmektedir. Yapılan çalışmalar iki kısma ayrılmıştır. Birinci kısımda, mühendislik yapılarının dinamik davranışlarının analitik ve deneysel yöntemlerle elde edildiği, ikinci kısımda ise onarılması veya kompozit malzemelerle güçlendirilmesi ile ilgili çalışmalar özetlenmektedir.

1.2.1. Mühendislik Yapılarının Dinamik Davranışlarının Belirlenmesi ile İlgili Çalışmalar

Brughmans vd. (1995), iki yolcu kapasiteli bir araba karoseri üzerinde deneysel ve teorik modal analiz çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Deneysel modal analiz yöntemiyle elde edilen sonuçlar, MSC/NASTRAN sonlu elemanlar programıyla elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmış ve araba karoserinin analitik modeli geliştirilmeye çalışılmıştır.

Telaghani ve Pappa (1996), kauçuk tabakaların modal parametreler üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla grafit epoksi tüpler üzerinde deneysel modal analiz ölçümleri gerçekleştirmişlerdir. Çekiç testi kullanılarak gerçekleştirilen deneysel modal analiz ölçümlerinden elde edilen sonuçlar, NASTRAN sonlu eleman analiz programıyla elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Çalışma kapsamında, kauçuk tabakaların yapısal sönümü arttırdığı ve doğal frekansları ise azalttığı gözlemlenmiştir.

Farrar ve Doebling (1997), büyük mühendislik yapıları üzerinde hasar tespiti amaçlı gerçekleştirdikleri ölçümler sonucunda elde ettikleri deneyimlerini bu çalışmalarında sunmuşlardır. Büyük yapılarda test yapmanın hem test yapılacak yapıların azlığı hem de test için gerekli parasal kaynağın fazlalığı nedeniyle oldukça zor olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmada, Amerika'nın Albuquerque şehrindeki Rio Grande köprüsünde gerçekleştirilen deneysel modal analiz ölçümleri ve elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

Ceballos vd. (1998), Arjantin'deki Atucha II NPP reaktör binasının dinamik karakteristiklerini, tesisin sismik özellikleri hakkında bilgi almak ve dört katmanlı bir toprak tabakası üzerine inşa edilen nükleer tesislerin deneysel ve teorik analizleri için yöntemler geliştirmek amacıyla elde etmeye çalışmışlardır. Kararlı durum ve darbe testlerine tabi tutulan yapıda özellikle doğal frekanslar ve modal sönüm oranlarını belirlemek amacıyla darbe testi üzerinde durulmuştur. Teorik analizler, başka bir çalışmada kararlı durum davranışından elde edilen temel rijitlik katsayısı kullanılarak oluşturulan üç boyutlu model üzerinde gerçekleştirilmiştir. Hesaplanan temel rijitlik katsayısı, ölçüm sonuçlarıyla ve eksenel simetrik analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Çalışmadan, sonlu eleman yöntemi kullanılarak yapılan analizler neticesinde elde edilen temel rijitlik katsayılarının kararlı durum davranışından elde edilenden oldukça düşük olduğu gözlemlenmiştir.

Pavic vd. (1998), çalışmalarında öncelikle inşaat mühendisliği alanındaki deneysel modal analiz uygulamalarını mekanik, otomotiv ve havacılık alanındaki uygulamalarla

karşılaştırmış ve aralarındaki temel farklılıkları belirlemişlerdir. Çekiç testi zaman ve maliyet açısından avantajlı görülse de, inşaat mühendisliği yapılarının genellikle düşük frekanslı, birbirine yakın modlara sahip olmaları ve yüksek sönüm oranlı olmaları nedeniyle özel dikkat gerektirdiği belirtilmiştir.

Ashory (1999), deneysel modal analiz ölçümleriyle ilgili oluşan mekanik hataları dikkate alarak bu hatalara çözüm aramayı ve böylece deneysel modal analiz ölçümlerini geliştirmeyi amaçlamıştır. Bu amaçla, ivmeölçer kütle etkisinin, çekiç yapı etkileşiminin, askı yayı etkilerinin ve lineer olmayan etkilerin deneysel modal analiz ölçümleri üzerindeki etkileri ortaya konulmuştur.

Hermans ve Auweraer (1999), çalışmalarında doğal etki tekniğinin (NEXT) ve dengeli gerçekleşme ile standart değişken analizi olarak adlandırılan iki altalan tekniklerinin endüstriyel sorunlara uygulanabilirliğini değerlendirmişlerdir. İlk olarak yöntemlerin teorisini kısaca özetlemişlerdir. Daha sonra yöntemlerin işlevselliğini üç endüstriyel durum için değerlendirerek kıyaslamışlardır. Bir aracın hareket boyunca arka süspansiyon sisteminin modal karakteristiklerini, gürültü problemini anlamak için; ticari uçağın uçuş esnasındaki titreşim analizi için, son olarak da üç açıklıklı beton köprünün mod şekillerinin, frekanslarının vb. belirlemek için modellere çevresel etki altında test uygulamışlardır.

Schwarz ve Richardson (1999), deneysel modal analiz yönteminin, ölçümlerde kullanılan cihazlardan modal parametrelerin elde edilmesine kadar bütün aşamalarını özetleyen bir çalışma hazırlamışlardır. Bu çalışmada, frekans davranış fonksiyonlarının elde edilmesi, alternatif formdaki frekans davranış fonksiyonları, çekiç testi, sarsıcı (shaker) testi, sinyal türleri ve modal parametrelerin elde edilmesi yöntemleri hakkında bilgiler verilmiştir.

Çolakoğlu ve Köksal (2000), elektronik savunma sistemlerinde, özellikle hareketli platforma monte edilmiş cihazlarda oluşan titreşimleri incelemişlerdir. Doğal frekans analizi için hava harp sistemlerinde kullanılan bir el-kontrol ünitesi seçilmiştir. Bilgisayar ortamında üç boyutlu katı model olarak tasarlanan ünitenin, ANSYS sonlu eleman programıyla doğal frekanslarının ve mod şekillerinin elde edilmesinde izlenen yol ve sonuçlar tartışılmıştır. Sonlu eleman analiz sonuçları deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır.

Maeck ve Roeck (2000), çalışmalarında trafik etkilerinde oluşan titreşimleri belirlemek amacıyla modeller geliştirmişlerdir. Yolcu ve yük trenlerinde oluşan titreşimlerin yanı sıra hızlı metrolardan kaynaklanan titreşimler de çevre açısından oldukça

önemlidir. Yazarlar yüksek hızlı trenlerin geçtiği bir köprü üzerinde yapılan ölçümlerde köprüye ve raylara ivmeölçerler bağlayarak trenlerden oluşan titreşimleri belirlemişlerdir.

Pavic ve Reynolds (2002), arazide daha az süre çalışmayla iyi sonuçlar alınabilen bir yöntem geliştirmişlerdir. Yayaların kullanımı amacıyla yapılan köprülerin hem sürekli kullanımda olmaları hem de açık bir ortamda bulunmalarından dolayı, modal testlerin kısa sürede yapılması ve yüksek doğruluk derecesine sahip veriler elde edilmesi istenilmektedir. Bu gibi durumlarda istenilen sonucu hangi yöntemin daha iyi ve hızlı bir şekilde vereceğini bilmek avantajlıdır. Pavic ve Reynolds'un geliştirdikleri yöntem elektrodinamik bir sarsıcı tarafından uygulanan 1 ile 39 Hz aralığında frekansa sahip geçici bir sinyalin (transient chirp) yapıya elektromanyetik sarsıcı ile uygulanmasıyla frekans davranış fonksiyonunun belirlenmesini temel almaktadır.

Reynolds vd. (2002), İngiltere'deki York Üniversitesi'nde yeni yapılmış olan yüksek kaliteli döşeme üzerinde deneysel modal analiz ölçümleri gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada, döşemenin yüksek rijitlik ve kütle özellikleri nedeniyle belli sınırlar içerisinde titreştirilmesi gerektiği belirtilmiştir. Deneysel ve teorik sonuçları karşılaştırmak amacıyla döşemenin sonlu eleman yöntemiyle teorik analizi yapılmış ve deneysel sonuçlar kullanılarak sonlu elemanlar modelinde düzeltmeler yapılmıştır.

Yao vd. (2002), esnek bir yapı üzerinde insanların hareketinden dolayı oluşan davranışı belirlemek amacıyla bir test düzeneği hazırlamışlardır. Bu düzene, konsol kirişlerle desteklenmiş tek serbestlik dereceli bir platformdur. Bu düzenele yapıya uygulanan kuvvet ve yapının ivme olarak tepkileri ölçülebilmektedir.

Haapaniemi vd. (2003), mevcut boru hatlarının kullanım ömürleri ve durumlarının belirlenmesi amacıyla pratik bir metot geliştirmeyi amaçlamışlardır. Bu tip bir çalışma, sistemin sonlu eleman modelinin oluşturulması, ön analizinin yapılması, deneysel modal analizinin yapılması, modal korelasyon analizinin yapılması ve modelin geliştirilmesi aşamalarını içermektedir. Bu çalışmada, bir boru sisteminin farklı sınır koşullarındaki ölçümlerinin sonuçları ile çekiç veya sarsıcı kullanılması durumunda elde edilen sonuçlar arasındaki bağlantı araştırılmıştır. Çekiç testi ve sarsıcı testi sonuçlarının düşük frekanslarda birbirine yakın olduğu görülmüştür. Korelasyon analizinden, özellikle 20 Hz üzerindeki frekanslarda boruların dinamik davranışlarının izolasyondan oldukça etkilendiği görülmüştür. Bunun sebebinin sistemin sönümünün artması ve izolasyonlu boruların diğer yapılarla etkileşimi olduğu düşünülmüştür.

Reynolds vd. (2004), stadyum tipi yapıların titreşimlerinden daha iyi veri elde edebilmek amacıyla uzaktan kontrol sistemi geliştirmişlerdir. Böylelikle, stadyumun seyircili durumdaki yapısal davranışının gözlenebileceği ve bazı istatistiksel güvenilirlik sonuçlarına varılabileceği düşünülmüştür. Çalışmadan elde edilen sonuçlar ışığında, dikkate alınan yöntemin oldukça başarılı olduğu görülmüştür. Ayrıca insan yoğunluğuna bağlı olarak stadyumun modal parametrelerinin değişim gösterdiği de gözlemlenmiştir.

Şanlıtürk ve Çakar (2004), deneysel modal analiz ölçümlerinin ortamdaki gürültüden olumsuz etkilendiğinden dolayı tekil değerler azalması (Singular Value Decomposition, SVD) yöntemini kullanarak frekans davranış fonksiyonlarından gürültü etkisinin azaltılması üzerinde çalışmışlardır.

Wu (2004), laboratuvarında 1/10 ölçekli oluşturduğu vinç modelinin sonlu eleman modelini geliştirmeyi amaçlamıştır. Bu amaçla, vinç modelinin sonlu eleman modeli hazırlanarak teorik analizi ve model üzerinde deneysel modal analiz ölçümleri yapılmıştır. Deneysel sonuçlar kullanılarak sonlu eleman modelinde geliştirmeler yapılmıştır.

Bayraktar ve Türker (2005-a, 2005-b), konsol giriş, düzlem çerçeve ve üç boyutlu çerçeve modellerinin deneysel ve teorik modal analizlerini yapmışlardır. Deneysel modal analiz ölçümleri sonucunda elde edilen dinamik karakteristikler teorik analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Çalışmadan, deneysel modal analiz yönteminin mevcut yapıların dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde güvenle kullanılabilirliği ve deprem güvenliklerinin daha doğru olarak belirlenebileceği sonucuna varılmıştır.

Göge vd. (2005), yerden titreşim testi (Ground Vibration Test, GVT) yöntemiyle uçak modeli üzerinde lineer olmayan etkileri belirlemek amacıyla deneysel ölçümler gerçekleştirmişlerdir. Yapının lineer olduğu kabulüyle gerçekleştirilen ölçümler sonucunda, yapının tamamıyla lineer olmadığı görülmüştür. Yapıdaki lineer olmama, rezonans frekanslarının lineer olarak çizilmesiyle belirlenmiştir.

Kammer (2005), üç eksenli ivmeölçerler için ilgili moda ait matrisin determinantının en az olmasını sağlayan yeni bir yöntem geliştirmiştir.

Karakan (2008), tez çalışması kapsamında deneysel modal analiz üzerine çalışmıştır. Çalışmasında bir grup yapısal basit sistem kullanarak deneysel ve analitik parametrelerin Frekans Yanıt Fonksiyonu (FYF) üzerine etkisini incelemiştir.

Şahin (2009), yapı sistemlerinin zorlanmış ve çevresel titreşim deneylerinden toplanan sinyal kayıtlarını analiz ederek, yapıların göstermiş oldukları dinamik davranışı belirlemeyi ve bu davranışı referans kabul ederek, yapıya ait teorik modelleri optimum

seviyede iyileştirmek amacıyla bilgisayar programları geliştirmeyi ve bu programların laboratuvar modeli üzerinde uygulamalarını yapmayı amaçlamıştır. Deneysel aşaması tamamlandıktan sonra yapılması gereken sayısal sinyal işleme, modal parametrelerin belirlenmesi ve sonlu eleman modellerinin iyileştirilmesi konusunda MATLAB platformunda grafik kullanıcı arayüzüne sahip bilgisayar programları geliştirmiştir.

Altunışık (2010) karayolu köprülerinin yapısal davranışlarını analitik ve deneysel yöntemler kullanarak belirlemiştir. Bu amaçla, laboratuvar ortamında oluşturulan model bir köprü ve arazi ortamında inşa edilen Kömürhan ve Gülburnu Köprüleri üzerinde analitik ve deneysel çalışmalar gerçekleştirmiştir.

Türker (2011) çalışmasında çevresel titreşim altında deneysel olarak ölçülen dinamik karakteristikleri dikkate alarak yapıların hasar durumlarının tespiti ve değerlendirilmesine imkan sağlayan bir yaklaşım ortaya koymaya çalışmıştır. Önerilen yaklaşımın uygulanabilirliğini, laboratuvar ortamında oluşturulan yapı modelleri üzerinde gerçekleştirilen incelemelerle göstermiştir. 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 sunmuştur. Hasarlı duruma ait ölçümlerden elde edilen veriler kullanılarak önerilen yaklaşım yardımıyla her bir model için hasarın varlığı, yeri ve yapı davranışına etkisini ortaya koymuştur. Temel mühendislik yapılarını temsil eden laboratuvar modelleri üzerinde gerçekleştirilen incelemelerden, kullanılan yaklaşımın yapıların hasar durumlarının tespiti ve değerlendirilmesinde oldukça etkili olduğunu görmüştür.

Baştürk (2013), yapmış olduğu çalışma kapsamında Bursa'da yer alan yedi adet tarihi minare incelemiştir. İncelenen minarelerin geometrik özellikleri, malzeme özellikleri ve yapım teknikleri hakkında bilgiler verilmiş ve dinamik karakteristikler çevresel titreşim testleriyle elde edilmeye çalışılmıştır. Ayrıca, minarelerin sonlu eleman modelleri de oluşturmuş, malzeme özelliklerinde ve mesnetlenme koşullarında iyileştirme yapılarak sonlu eleman analizlerinden elde edilen sonuçlar deneysel ölçüm sonuçları ile yakınsatılmıştır.

Tarinejad vd. (2014), baraj-rezervuar-temel sisteminin dinamik karakteristiklerini belirlemek için Kuzey İran'daki Shadid Rajae beton kemer barajı üzerinde zorlanmış titreşim testleri ve analitik çalışmalar yapmışlardır. Deneysel ve analitik çalışma ile elde edilen sonuçlar birbiriyle karşılaştırılmıştır. Beton kemer baraj üzerinde gerçekleştirilen deneysel ve analitik sonuçlar büyük oranda birbiriyle benzer şekilde elde edilmiştir.

Cardoso vd. (2015), yaptıkları çalışmada Brezilya'nın Maraba şehrinde, Tocantins nehrinin üzerindeki kompozit karayolu-demiryolu köprüsünün Operasyonel Modal Analizini yapmışlardır. Köprü'nün uzunluğu 2310 m olup Brezilya'nın en uzun ikinci karayolu-demiryolu köprüsüdür. Çalışmada köprü üzerindeki trenlerin yüklü ve yüksüz olması, yol trafiği, rüzgar, nehir gibi çevresel etkilere karşı köprü'nün verdiği tepkiler elde edilmiştir. Elde edilen deneysel veriler, analitik çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

Kudu vd. (2015), yaptıkları çalışmada modal parametreleri belirlemede kullanılan yöntem, örnekleme aralığı, frekans aralığı ve ölçüm süresini değişken parametreler olarak belirleyerek bunların sönüm oranını belirlemede etkisini karşılaştırmışlardır. Çalışmalar 3 katlı çelik bina modeli üzerinde yapılmıştır. Çevresel titreşim testlerinde 12 tek eksenli ivmeölçer kullanılmıştır. Ölçümler farklı sürelerde, ölçüm aralığında ve örnekleme aralığında tekrarlanmıştır. Elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları tüm durumlar için birbiriyle karşılaştırılmıştır.

Wojcicki vd. (2016), Polonya'daki Odra nehri üzerindeki bir bağlama yapısının Operasyonel Modal Analizi (OMA) üzerinde çalışmışlardır. Odra nehrinin su seviyesinin ve debisinin, yüksek ve alçak olduğu dönemde bağlamaya çevresel titreşim testi uygulamışlardır.

Torres vd. (2017) yaptıkları çalışmada, Şili'deki Santiago Metropolitan Katedralinin dinamik karakteristiklerinin ve mekanik malzeme özelliklerinin deneysel olarak belirlenmesi ve sonlu eleman model iyileştirmesi üzerine çalışmışlardır. Bu doğrultuda deneysel çalışmada, çevresel titreşime maruz yapının tepkisinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Çevresel titreşim testleri esnasında 6 adet yüksek hassasiyetli ve üç eksenli ivmeölçerler kullanılmıştır. Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (EFDD) yöntemi ve Stokastik Altalan Belirleme (SSI) yöntemi dinamik karakteristikleri belirlemede kullanılmıştır. Katedralin taş bloklarına mekanik testler uygulanmıştır. Deneysel verilere göre sonlu eleman modeli iyileştirilmiştir.

1.2.2. Mühendislik Yapılarının LP Kompozit Malzemelerle Onarılması ve Güçlendirilmesi ile İlgili Çalışmalar

Shahawy vd. (2000) normal ve yüksek dayanımlı betonlardan oluşan ve LP kompozit malzeme ile sargılanmış 45 adet numune üzerinde eksenel basınç testleri yapmışlardır. Bu çalışmada, birden beşe kadar farklı LP katmanları ve esas olarak beton doldurulmuş cam

LP tüpler için geliştirilmiş bir güçlendirme modeliyle sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar sonucunda beton ile sargı malzemesi arasındaki yapışmanın güçlendirme davranışını önemli bir şekilde etkilemediği ve buna bağlı olarak da modellerin hem betonla doldurulmuş LP tüpler için hem de LP ile sargılanmış beton elemanlar için kullanılabilmesi gösterilmiştir. Gerçek kopmadaki uzama değerlerinin, kupon testlerinden elde edilen değerlerin genelde altında kaldığı belirtilmiştir.

Chansawat (2003) doktora tezinde, kompozit malzemeler (FRP) ile güçlendirilmiş betonarme yapıların sonlu eleman yöntemi kullanılarak lineer olmayan davranışının belirlenmesi üzerinde çalışmıştır. Çalışma başlıca üç aşamada ele alınmış olup, birinci aşamada güçlendirilen kirişlerin sonlu eleman modelleri oluşturularak sonuçlar değerlendirilmiş, ikinci aşamada Horsetail Creek Köprüsü'nün enine kirişleri yeniden üretilerek güçlendirilmesi yapılmış ve ayrıca sonlu eleman analizi yapılarak deney sonuçları ile karşılaştırılmış, üçüncü aşamada ise köprünün FRP ile güçlendirilmesinden öncesi ve sonrası durumları için sonlu eleman modeli oluşturularak statik ve dinamik yükler altındaki yapısal davranışları farklı yük kombinasyonları için karşılaştırılmıştır.

Stoian vd. (2003) yaptıkları çalışmada, hasarsız, hasarlı ve tek yüzüne lifli polimer kompozit malzeme uygulanarak güçlendirilmiş duvarların yapısal davranışlarını düşey ve kademeli artımsal yatay yük etkisinde incelemiştir. Lifli polimerler duvarların tek yüzeyine %60 ve %100 oranında uygulanmıştır. Yük-yerdeğiştirme eğrilerinin elde edilmesi için duvarın sağ ve solun uç kısımlarından ilgili ölçümler alınmış ve elde edilen değerler karşılaştırılmıştır. Çalışmadan, kompozit malzemeye dayalı güçlendirmenin duvarların süneklik ve enerji yutma kapasitelerini önemli oranda arttırdıkları sonucuna ulaşılmıştır.

Yang vd. (2003) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, FRP ile güçlendirilmiş betonarme bir kirişin davranışını incelemek amacıyla kırılma mekaniği esaslı sonlu eleman analizi gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemde, çatlak yayılmasının simülasyonu için lineer elastik kırılma mekaniği esaslı sonlu eleman yazılımı geliştirilmiştir. Çalışmanın sonunda, farklı yapışma boyunun kirişlerin göçme modunda çok önemli etkisi bulunduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, FRP kompozit malzeme kullanılmasının kirişlerde çatlak aralığı ve miktarının azaltılmasını sağladığı da ifade edilmiştir.

Santhakumar vd. (2004) yaptıkları çalışmada Norris vd. (1997) tarafından yapılan deneysel çalışmaları ANSYS sonlu eleman programı ile modellemiştir. Çalışmada kullanılan kirişler, $\pm 45^\circ$ ve 90° 'lik lif açılı Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)

levhalarıyla güçlendirilen çatlaksız ve ön çatlaklı kirişler ile kontrol amacıyla üretilmiş ve hiçbir güçlendirme yapılmayan kontrol kirişidir. Kirişlerin sonlu eleman modellemesi yapılırken beton için Solid65, donatı için Link8, CFRP için Solid46 kullanılmış, ayrıca mesnet ve yükleme plakaları için Solid45 elemanı kullanılmıştır. Modelleme aşamasında, beton-donatı ve beton-CFRP arasındaki aderansın tam olduğu kabul edilmiştir. Deney sonuçları ile sayısal modelleme sonuçları kıyaslandığında, sayısal modelde taşıma gücü yükünün kontrol kirişi ve çatlaksız kirişte %8 daha fazla olduğu, ön çatlaklı kirişte ise %8 daha az olduğu görülmüştür. Bütün sayısal modellerde taşıma gücü durumunda dönmelerin daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Lineer davranışta ise deneysel sonuçlara göre daha büyük rijitlikler elde edilmiştir. 90°'lik lif açılı CFRP levhalarıyla güçlendirilen çatlaksız ve ön çatlaklı kirişlerin sayısal modelleri karşılaştırıldığında, donatının akmasına kadar aynı rijitliklerin elde edildiği, taşıma gücü durumunda ise ön çatlaklı kirişte yükün %6,7 azaldığı, yerdeğiştirmelerin ise %10,5 oranında arttığı ifade edilmiştir.

Stratford vd. (2004) duvarlarla ilgili deneysel ağırlıklı bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada, altı adet yığma panelin davranışı düşey ve kademeli artımsal yatay yüklemeler etkisinde incelenmiştir. Panellerden üç tanesi kil/tuğla birimlerden, diğerleri ise beton bloklardan yapılmıştır. Her üç deney panelinden bir tanesi güçlendirilmeden yalın olarak test edilmiş, diğer ikisi ise lifli polimerle güçlendirildikten sonra düşey ve kademeli artımsal yatay yük etkisinde test edilmiştir. Çalışma kapsamında, LP sargılamının duvarlardaki hasar durumları ile göçme üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Yang vd. (2004) tarafından yapılan çalışmada, FRP ile güçlendirilmiş betonarme elemanların temas yüzeylerindeki gerilmeler sonlu eleman yöntemi ile incelenmiştir. FRP-beton yüzeyindeki gerilme dağılımına odaklanmış bu çalışmada, malzeme ve geometrik parametrelerin gerilmeye olan etkileri göz önünde bulundurulmuştur. Tek nokta yüklemesi altındaki basit mesnetli bir kiriş için betonarme ile FRP ve yapışkan tabakanın lineer elastik davrandığı ve beton ile FRP arasındaki tabakada boşluk, çatlak olmadığı kabulleri yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre, FRP'deki kayma gerilmesi değerleri plaka ucundan uzaklaştıkça hızla azalmakta, belirli bir noktadan sonra sabit kalmaktadır. Ancak plaka uç bölgelerinde dalgalanma gösteren normal gerilmeler plaka sonundan uzaklaştıkça sıfır değerine ulaşmaktadır. Bu iki gözlemden dolayı, FRP plakası uzak ucundaki normal ve kayma gerilmelerinin FRP-beton arayüzünde tabaka halinde kopmalara ve göçmeye sebep olduğu sonucu çıkarılmıştır. Çalışmanın diğer bir sonucu olarak, FRP tabakasının kalınlaştırılmasıyla kayma gerilmesi değerlerinin artması ancak yapıştırıcı tabakanın

sonuçları fazla etkilememesi gösterilebilir. Ayrıca betonun ve FRP rijitliğinin gerilme değerlerini önemli miktarda etkilediği belirtilmiştir.

Mahrebel (2006), tarihi yığma yapıların değerlendirilmesinde en önemli noktalardan birinin malzeme parametrelerinin belirlenmesi olduğunu vurgulamıştır. Yapıyı oluşturan malzemelerin, mineralojik ve morfolojik özellikleri ile farklı yük ve etkiler altındaki davranışlarının bilinmesi gerektiği ifade edilmiştir. Yapılan çalışmada, tarihi yapıların kubbelerindeki hasarları minimum seviyelere indirmek için LP sistemlerin dış yüzeyden uygulanması gerektiğini vurgulamıştır. Bu uygulamanın amacının ise, üzerleri kurşun tabakalarla kaplanacak olan kubbelerin, yapılan güçlendirmeyi örtmesi ve en önemlisi de tarihi doku ve görüntüyü değiştirmemesi olduğu vurgulanmıştır.

Yao ve Teng (2006), farklı geometrik parametrelere sahip ve FRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerde dört nokta ve üç nokta eğilme testlerinde plaka ayrışmasını ve göçme modunu incelemişlerdir. Dört nokta yüklemesi altındaki (eğilme ayrışması) bütün elemanlar, beton paspayı ayrışması ile göçmüştür. Üç nokta yüklemelerinde (kesme ayrışması) ise, beton paspayı ayrışması, kiriş ortasında oluşan çatlak sebebiyle ayrışma, plaka sonunda oluşan kesme çatlağı göçmesi ve FRP yapıştırılmamış bölümde oluşan betonda eğilme sebebiyle meydana gelen göçme gibi dört değişik göçme modu gözlemlenmiştir. Her iki deneyin ortak noktası olarak, FRP-beton arayüzündeki ayrışmayı tanımlayan en kritik faktörün geniş FRP plakası durumunda boyuna donatı ile FRP-paspayının oluşturduğu kompozit kesit arasındaki gerilme olduğu, dar FRP plakası durumunda ise FRP beton alt yüzü arasındaki gerilmeler olduğu belirtilmiştir.

Başegmez (2007) yaptığı çalışma kapsamında kesme açısından yetersiz düşük beton dayanımlı betonarme kısa kolonların, lifli polimer kompozitler ile güçlendirme öncesi ve sonrası sabit aksenal yük ve yön değiştiren tekrarlı yatay yükler altında davranışını incelemiştir. Numuneleri, eski betonarme yapıların karakteristiklerini yansıtması amacıyla, düşük beton kalitesi ve yetersiz enine donatı kullanarak üretmiştir. Numunelerin güçlendirilmesinde, karbon ya da cam lifli polimerler kullanmıştır. 7 adet numuneyi doğrudan güçlendirmiş olup, 2 adet numuneye herhangi bir güçlendirme işlemi uygulamadan, referans davranışı gözlemek amacıyla denemiştir. Bu iki adet referans numunesini; onarıp, güçlendirmiş ve yeniden test etmiştir. Bu şekilde, deney programı kapsamında toplam 11 adet numuneyi deneye tabi tutmuştur. Ağırlıklı olarak diyagonal basınç gerilmelerinin etkileri sebebiyle, eğilme kapasitesine ulaşamayan güçlendirilmiş numuneler, referans numunelerine kıyasla, dayanım ve şekildeğiştirme kabiliyeti açısından

daha iyi bir performans sergilemişlerdir. Deneysel sonuçlarını, ilgili yönetmelikler ile birlikte, etkin şekilde değiştirme ve aderans mekanizmasına dayanan iki analitik model kullanarak elde edilen teorik sonuçlar ile karşılaştırmıştır.

Camata vd. (2007) FRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin deneysel ve sonlu eleman analizleri üzerine yaptıkları çalışmada, eğilmeye karşı FRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin gevrek kırılma modlarını incelemişlerdir. Beton kırılması, yapışkan tabaka davranışı, FRP uzunluğu ve genişliğinin göçme modlarına etkileri araştırılmıştır. Deneysel sonuçlarına paralel olarak, göçme moduna geometrik ve malzeme parametrelerinin etkilerini belirlemek için yapılan sonlu eleman analizlerinde, kırılmadan sonra betonarme elemanın rijitlik azalmasını modellemek için gizli çatlak modeli beton paspayının ayrışmasından sonra “node”lardaki devamsız yer değiştirmeleri tanımlayabilmek için ise ayrı çatlak modeli kullanılmıştır. Analizler sonucunda, kısa FRP plakalarında göçmenin plaka sonunda, uzun plakalar için ise giriş ortasında başladığı, FRP tabakası genişliğinin azaldıkça, göçme modunun pas payı ayrışmasından FRP-beton ayrışmasına kaydığı ortaya konulmuştur.

Alcaino vd. (2008) 16 adet 1/1 ölçekli yığma duvarları kayma etkileri altında test etmişlerdir. Yığma duvarlar CFRP kompozitleri ile farklı biçimlerde güçlendirilmiş olup test sonuçları dayanım, rijitlik, süneklik ve enerji tüketimi kavramları açısından değerlendirilmiştir. Güçlendirme neticesinde dayanımın 13-84% oranında, yer değiştirme yeteneğinin ise 51-146% oranında artırılabilirdiği görülmüştür.

Anıl ve Belgin (2008) gerçekleştirdikleri çalışmada, dört nokta yüklemesi altında CFRP ile güçlendirilmiş 16 adet giriş numunesi kullanmışlardır. Deneysel sonuçları literatürdeki benzer model ve sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Beton dayanımı, CFRP yapışma boyu ve yapışma genişliğinin değişken olarak alındığı çalışmada, en çok parametre içeren modellerin deney davranışını doğru olarak temsil ettiği belirlenmiştir.

Doğan (2008), ANSYS sonlu eleman yazılımının özel eleman tiplerinden faydalanarak, deney girişlerinin sonlu eleman modelini oluşturmuş, malzeme özellikleri tanımlamış, analiz ve deney sonuçlarını karşılaştırarak sonlu eleman modelinin deney sonuçlarından sapma limitlerini belirleyerek modelin uygulanabilirliğini doğrulamıştır. Ayrıca, beton-CFRP arayüzündeki şekil değiştirme dağılımı ve etkili yapışma boyunun belirlenmesine yönelik, modellemeye ek olarak sonlu eleman simülasyonu gerçekleştirmiş ve deney yapmaya gerek kalmadan bazı bilgilerini elde etmiştir. Yürütülen karşılaştırmalı analizlerle, şekil değiştirme dağılımının gerçeğe yakın elde edilebilmesi için özel bir temas

yüzeyi elemanın kullanılması gerektiği ortaya koyulmuş olup, bu özel temas yüzeyinin parametrelerini belirlemiştir. Ayrıca, CFRP uzunluğunun arttırılmasının şekildeğiştirme dağılımı ve maksimum göçme yükü üzerindeki etkisini sonlu eleman çözümü üzerinden incelemiş, etkili yapışma boyu belirlemiş ve bu etkili yapışma uzunluğunun deney sonuçları ile uyumlu olduğunu göstermiştir.

Gedik (2008), farklı özelliklerde deney numuneleri üzerinde elde edilen literatür sonuçlarının dikkate alındığı büyük bir deneysel veri tabanı oluşturarak, bilimsel kabul görmüş bazı modellerin performanslarını karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Çalışmanın sonucunda, mevcut modellerin belirli kıstaslar altında güçlü ve zayıf yönlerini ortaya çıkararak daha iyi sonuçlar verebilecek modellerin hazırlanması için bilgi toplamıştır.

Kolcu (2008), yükleme hızının monoton artan ve sabit tutulan yükleme durumları için karbon lifli polimer sargılı betonun gerilme-şekildeğiştirme davranışına olan etkisini incelemiştir. Numunelerde normal dayanımlı beton kullanmıştır. Yapılan çalışmada, on sekiz adet standart silindir numunesi imal edilmiş, bunlardan on altı tanesi ise iki kat karbon lifli polimer şeritler ile sargılanarak güçlendirilmiştir. Numuneler farklı yükleme hızları ve gerilme düzeyleri altında deneylere tabi tutularak, yükleme hızının ve sabit gerilme oranının gerilme-şekildeğiştirme davranışına etkileri incelenmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar, LP sargılı beton için önerilen mevcut modellerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Yükleme hızındaki artışın sargılı betonun dayanımında da artışa neden olduğu ve LP sargının betonun sünme etkilerine karşı dayanıklılığını artırdığı gözlemlenmiştir.

Bulut (2009) çalışmasında daha önceden yürütülmüş deneysel bir çalışmanın sonuçlarını kullanarak, CFRP ile güçlendirilmiş kesme dayanımı yetersiz 'T' kesitli betonarme kirişlerin ANSYS sonlu eleman programını kullanarak modellemesini yapmıştır. Öncelikle deneyleri yapılmış olan betonarme kirişlerin sonlu eleman modellerini oluşturarak, deneysel sonuçlara uygun sonuçlar elde edilip edilmediğini incelemiş ve sonlu eleman modelinin doğrulamasını yapmıştır. Daha sonra, optimum CFRP şerit aralığının belirlenmesine yönelik deneyi yapılmamış analizler yaparak seçilen parametreye yönelik sonuçların arttırılmasını amaçlamıştır. ACI 440 Committee Report'da CFRP şerit aralığı için önerilen denklemin sonlu eleman sonuçları ile uyumunu araştırmış ve tasarımcılara fikir verebilecek bir sonuca ulaşmıştır.

Kantar (2009) 5 adet normal ve 5 adet yüksek dayanımlı betondan üretilen toplam 10 adet dikdörtgen kesitli beton kirişin deneysel çalışmalarını gerçekleştirmiştir. Deney

elemanları, CFRP şeritler ile güçlendirilerek farklı yüksekliklerden düşürülen sabit ağırlıklı çekicinin oluşturmuş olduğu çarpma etkisi altında test edilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen ivme ölçümleri kullanılarak, hız, yerdeğiştirme ve enerji kapasiteleri hesaplanmıştır. Ayrıca sonlu eleman analizleri ile birlikte deneysel çalışma kapsamında incelenen çarpma testinin bilgisayar ortamında simülasyonu yapılmıştır.

Polat (2009) betonarme kolonların moment kapasitelerinin boyuna doğrultuda karbon lifli polimer dairesel çubuk donatılar ve şerit plakalar yapıştırılarak artırılması üzerine çalışmıştır. Artan moment kapasitesi neticesinde, kolona gelen ilave kesme kuvvetini taşımak ve sargılama etkisi oluşturmak amacıyla enine doğrultuda karbon lifli polimer malzeme kullanılarak sargı yapılmıştır. Kolon numuneleri tersinen tekrarlanan yatay yükler altında test edilmiştir.

Özkaynak (2010) dolgu duvarları lifli polimer ile sargılanmış betonarme çerçevelerin yatay yükler etkisindeki deprem davranışını deneysel ve kuramsal olarak incelemiştir. 22 adet 1/3 ölçekli tek katlı ve tek açıklıklı yalın, dolgu duvarlı ve güçlendirilmiş dolgu duvarlı betonarme çerçeve numunelerini statik ve benzeşik dinamik deney teknikleri kullanarak laboratuvarında denemiştir. Yalın ve güçlendirilmiş dolgu duvarlı çerçevelerin davranışlarını hem yaygın olarak kullanılan statik karakterli yükler hem de yeni geliştirilen benzeşik dinamik deney tekniği ile dinamik karakterli yükler etkisinde deneysel olarak belirlemiştir. CFRP ile güçlendirilmiş dolgu duvarların kuramsal modeli için bir öneri yapmıştır. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalara dayalı olarak güçlendirilmiş durum için belirlenen duvar davranış modeli ve yapısal sönüm özellikleri, deprem güvenliği yetersiz bir betonarme yapının dolgu duvarlarının CFRP ile sargılanarak güçlendirmesi örneğinde kullanılmıştır. Önerilen güçlendirme tekniği incelenen yapı sisteminin performansını önemli düzeyde iyileştirmiştir.

Biçer (2011) karbon lifli polimer kullanılarak güçlendirilmiş hasarlı kolon-kiriş bağlantıları üzerine, literatürdeki güçlendirme tekniklerini kullanarak analitik bir çalışma gerçekleştirmiştir. Kolon-kiriş moment güç oranını, sargı ve eksenel yük etkilerini, ek yerlerinde moment kapasitesinin moment talebine oranını tüm kolon-kiriş ek yerlerinde yanal deprem yükünden dolayı olan kesme kuvveti talebine karşı koymak için araştırmıştır.

Capozucca (2011) yaptığı deneysel çalışmada tarihi kil tuğlalardan yapılmış iki adet yığma duvarı düşey yük ve yatayda çevrimsel yükleme etkisinde test ederek göçme durumlarını incelemiştir. Hasar görmüş yalın tarihi duvarları, çapraz ve yatay-düşey doğrultuda karbon elyaf şeritlerle (CFRP/KLP) güçlendirmiş ve göçme anına kadar yük

etkisinde test etmiştir. Çevrimsel yük etkisinde, duvarlardaki çatlak gelişmelerini ve birim şekildeğiştirmelerin duvar üzerinde yayılımlarını kayıt altına almıştır. Çalışmalarında, duvarlara etkiyen farklı düşey yük etkilerini de dikkate almıştır. LP sargısı, duvarların tek bir yüzeyine uygulanmıştır. Sonuç olarak, CFRP/KLP sargılamanın duvarların yük kapasitesini artırırken daha büyük oranda yanal şekildeğiştirme yeteneğini de geliştirdiğini belirtmiştir. Tarihi yapıların LP ile güçlendirilmesinde en önemli ve geliştirilmesi gerekli olan noktanın LP şeritlerle duvar arasındaki uygun ve yeterli ankrajın sağlanması olduğu sonucuna varılmıştır.

Jafarov (2012) doğrusal olmayan sonlu eleman yöntemini kullanarak, LP ile güçlendirilmiş yığma duvarların düşey ve yatay yükler altında elasto-plastik analizlerini gerçekleştirmeyi amaçlamıştır. Yalın ve hasar gördükten sonra LP elemanlarla güçlendirilen, kuşatma etkisinin dikkate alındığı ve alınmadığı duvarlarda da maksimum asal şekildeğiştirme kriteri ile deneysel duvarlara benzer sonuçlar elde etmiştir.

Sokkary vd. (2013) karbon lifli polimer ile güçlendirilmiş betonarme perde duvarların deprem davranışını incelemişlerdir. Deneylerde 3 adet betonarme perde duvarı test etmişlerdir. Bu perde duvarların ikisi lifli polimer ile güçlendirilmiş diğer perde duvar ise yalın olarak bırakılmıştır. Güçlendirilen perde duvarların biri tamamen lifli polimer ile sargılanmış, diğeri ise diyagonal olarak sargılanmıştır. Perde duvarlara test panelinde kesme kuvveti, çevrimsel yük, eksenel yük uygulanmıştır. Yapılan testler sonucu lifli polimer ile güçlendirilen perde duvarlar, yalın olarak bırakılan perde duvara göre daha yüksek kesme dayanımına ulaşmışlardır.

Tokgöz ve Dünder (2014) yaptıkları çalışmada betonarme kirişlerin, eğilme etkisi nedeniyle çekme gerilmelerinin meydana geldiği alt yüzeylerde ve kesme gerilmelerinin meydana geldiği yan yüzeylerde lifli polimer ile güçlendirme uygulaması yapmışlardır. 9 adet betonarme kiriş üreterek güçlendirdikleri betonarme kirişlerin yük-deplasman davranışı, sünekliği ve sönüm kapasitelerini araştırmışlardır.

Günaydın vd. (2015) yaptıkları çalışmada, çelik ve cam lifli polimer kompozit malzeme kullanarak yaya köprüsünün doğrusal olmayan statik ve dinamik analiz sonuçlarını karşılaştırmayı amaçlamışlardır. Bu amaçla sayısal örnek olarak Halgavor yaya köprüsünü seçmişlerdir. Analizler ilk olarak çelik kullanılarak, daha sonra sadece cam lifli polimer kompozit malzeme kullanılarak ve son olarak hem çelik hem de cam lifli polimer kompozit malzeme kullanılarak, statik ve dinamik yükler altında sonlu eleman yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Sonlu eleman modelinde ve analizlerde SAP2000 programı

kullanılmıştır. Yapılan analizler sonucu üç köprü modelinin davranışı da farklı olarak elde edilmiştir. Cam lifli polimer kompozit malzemesinin yaya köprüleri için çelik malzemedenden daha faydalı olduğu sonucuna varmışlardır.

Goldston vd. (2016) betonarme kirişlerin davranışına, cam lifli polimer kompozit malzemesinin etkisini araştırmışlardır. Araştırmada kirişlerin statik ve dinamik davranışını incelemek amacıyla 12 adet cam lifli polimer kompozit malzeme ile sargılanmış betonarme kiriş test edilmiştir. 6 adet kirişin statik yükler altında, enerji yutma kapasiteleri ve kırılma yükü test edilmiştir. Diğer 6 adet kiriş ise darbe yükü etkisi altında test edilmiştir.

Turkowski vd. (2017) karbon lifli polimer ile güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş 10 adet betonarme kiriş elemanının yangın direncini test etmişlerdir. Betonarme kirişlerin bir kısmı geniş kalınlıklı yangın koruyucu panolarla çevrilmiştir. Testler tasarım yük taşıma kapasitelerinin üzerinde, değişen yük kapasiteleri altında gerçekleştirildi. Karbon lifli polimer ile güçlendirilen elemanların; yapısal yangın tasarımında, yükün büyüklüğüne göre gerekli yangın koruma kalınlığı için üç olası hesaplama modeli oluşturmuşlardır.

1.3. Tezin Amacı ve İçeriği

Yapılan literatür araştırmasının ilk kısmında mühendislik yapılarının dinamik karakteristiklerinin analitik, sayısal ve deneysel yöntemlerle belirlendiği çalışmalar değerlendirilmiştir. Çalışmalar kapsamında; analitik yöntem olarak “Sonlu Eleman Yöntemi”, deneysel olarak ise “Deneysel Modal Analiz Yöntemi” yaygın olarak kullanılmaktadır. İkinci kısmında ise kompozit malzemeler kullanılarak onarılmış veya güçlendirilmiş mühendislik yapılarının yapısal davranışlarının belirlendiği çalışmalara yer verilmiştir. Bu çalışmalarda, kompozit malzemenin betonarme yapıdaki çatlak miktarına etkisi, yapı elemanlarının süneklik, enerji yutma kapasitesi ve yük taşıma kapasitesine etkisi, yapı elemanlarındaki gerilme değişimleri, şekildeğiştirme ve yerdeğiştirme kabiliyetlerindeki değişimleri incelenmiştir.

Literatüre katkı sağlayacağı düşünülen bu tez çalışmasında; hasarsız, hasarlı, onarılmış ve kompozit malzemeler kullanılarak güçlendirilmiş durumdaki betonarme binaların dinamik karakteristiklerinin ve yapısal davranışlarının analitik ve deneysel yöntemler kullanılarak belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla, laboratuvar ortamında inşa edilmiş ölçekli betonarme düzlem çerçeve modeli üzerinde ilgili çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda hazırlanan tez üç bölümden oluşmaktadır.

Birinci bölümde genel bilgiler üzerinde durulmakta, konuyla ilgili daha önce yapılmış çalışmalara yer verilmekte ve konunun önemi vurgulanmaktadır. Ayrıca, deneysel ve analitik yöntemlere ait genel bilgilere ve bu yöntemlerle ilgili denklemlere de yer verilmektedir.

İkinci bölümde, yapılan çalışmalar ve bu çalışmalardan elde edilen bulgular sunulmaktadır. Bu bölüm iki kısma ayrılmıştır. İlk kısımda; laboratuvar ortamında inşa edilen ölçekli betonarme düzlem çerçeve modelinin hasarsız, hasarlı, onarılmış ve güçlendirilmiş durumları için dinamik karakteristikleri Deneysel Modal Analiz Yöntemi ile elde edilmiştir. İkinci kısımda ise çerçeve modelinin sonlu eleman modeli hasarsız ve güçlendirilmiş durumlar için oluşturularak dinamik karakteristikler analitik olarak elde edilmiş olup, sonlu eleman modelleri deneysel ölçüm sonuçlarına göre iyileştirilmiştir. Çerçeve modelin iyileştirilmiş sonlu eleman modellerinin hasarsız, hasarlı, onarılmış ve güçlendirilmiş durumları için dinamik analizleri yapılarak yapısal davranışı değerlendirilmiştir.

Üçüncü bölümde tez çalışmasından elde edilen sonuçlara ve yapılan önerilere yer verilmektedir. Bu bölümü kaynaklar ve özgeçmiş izlemektedir.

1.4. Deneysel Modal Analiz Yöntemi

Deneysel Modal Analiz (DMA) yöntemi, mühendislik yapılarının dinamik karakteristikleri olarak adlandırılan doğal frekanslarını, mod şekillerini ve sönüm oranlarını deneysel ölçüm yöntemlerine bağlı olarak elde edilmesine yarayan ve literatürde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. DMA yöntemi, yapı üzerine uygulanan yükün türüne göre Çevresel ve Zorlanmış Titreşim Yöntemleri olarak ikiye ayrılmaktadır. Tez çalışmasının bu kısmında, yapıların Deneysel Modal Analizi'nde kullanılan ölçüm sistemi detaylı olarak irdelenmekte, kaliteli bir deneysel ölçümün nasıl gerçekleştirileceği anlatılmakta, dinamik karakteristiklerin hassas olarak elde edilebilmesi için dikkat edilmesi gereken hususlar vurgulanmakta ve son olarak da Çevresel ve Zorlanmış Titreşim Yöntemleri'ne ait formülasyonlar verilmektedir.

1.4.1. Deneysel Modal Analiz Yönteminde Kullanılan Ölçüm Sistemi

1.4.1.1. Titreştiriciler

Deneysel Modal Analiz yönteminde, yapıları titreştirmek amacıyla çevresel (doğal) ve yapay etkilerden yararlanılmaktadır. Çevresel etkiler olarak deprem, rüzgar, dalga hareketi, yaya hareketi ve taşıt trafik yükleri; yapay titreştiriciler olarak sarsıcılar, sarsma tablaları ve darbe çekiçleri kullanılmaktadır. Doğal veya çevresel etkilerden, genellikle yapay titreştiricilerin kullanılmadığı çok büyük mühendislik yapılarının ölçümlerinde yararlanılmaktadır. Yapay titreştiriciler ise ölçülebilen etkilere karşı sistemin davranışının değerlendirilmesinde kullanılmaktadır. Bunlar kullanılacakları yapının hacimsel büyüklüğüne ve rijitliğine bağlı olarak seçilmektedirler. Yapay titreştiriciler yapıya verilen etkinin ölçülmesine de imkan sağlamaktadır.

1.4.1.1.1. Darbe Çekiçleri

Darbe çekiçleri küçük veya orta ölçekli mühendislik yapılarını veya laboratuvar modellerini titreştirmek için kullanılmaktadırlar. Bu bakımdan ölçülecek yapı boyutlarına ve malzeme özelliğine bağlı olarak darbe çekicini ve çekiç başlığını seçmek gerekmektedir. Darbe çekiçlerinin içinde verilen etkiyi ölçmek için bir tane hassas sensör bulunmaktadır. Ayrıca yapıya, farklı etkiye sahip darbeler uygulamak için yumuşak, orta, sert başlıklar mevcuttur. Bu tez çalışması kapsamında, laboratuvar ölçümlerini gerçekleştirmek için Brüel&Kjaer (B&K) 8210 tipi darbe çekici kullanılmıştır. Bu tip darbe çekici ile genliği ve zamanla değişimi belirlenebilen büyüklükteki titreşimler ve bu büyüklüklerin bilinmediği rastgele titreşimler üretmek mümkündür. Darbe çekicine ait fotoğraf ve genel özellikler Şekil 1.1 ve Tablo 1.1'de verilmektedir.



Şekil 1.1. B&K 8210 tipi darbe çekici

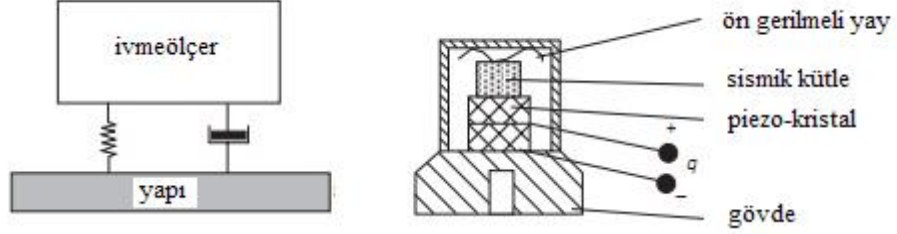
Tablo 1.1. B&K 8210 tipi darbe çekicine ait bazı özellikler (URL-1, 2016)

Model	B&K 8210
Hassasiyet	0.225 mV/N
Maksimum Kuvvet	22200 N
Çalışma Sıcaklığı	-73 ile +60 ⁰ C arası
Toplam Uzunluk	0.8966 m
Toplam Kütle	5.44 kg

1.4.1.2. İvmeölçerler

Deneysel Modal Analiz yönteminin uygulandığı ölçümlerde yapılarda oluşan titreşimleri ölçmek için ivmeölçerler kullanılmaktadır. İvmeölçerler geniş frekans ve dinamik aralığa sahip olmaları ve nispeten küçük ve hafif olmalarından dolayı en çok tercih edilen dönüştürücü tipleridir. Farklı tipte ivmeölçerler olup, yapısal titreşimlerin ölçümlerinde genellikle piezoelektrik ivmeölçerler kullanılmaktadır. Şekil 1.2’de görüldüğü gibi bu tip ivmeölçerler, yay-kütle-sönümleyici sisteminden oluşmaktadır (URL-2, 2016). İvmeölçerlerin aktif kısmı ise kuartz veya seramik kristallerden yapılmaktadır. Kuartz ya da seramik kristaller bir kuvvet altında kaldığında picocoulomb (2.78E-12 Amper saat) seviyesinde elektrik yükü üretmektedirler. Bu elektrik yükünün kristal üzerindeki değişimi yer çekimi ivmesinin değişimi ile doğru orantılıdır. İvmeölçerlerdeki sismik kütlenin ivme altında maruz kaldığı atalet kuvveti piezoelektrik kristale etkimekte ve ivme ile doğru orantılı bir elektrik sinyali çıkışı vermektedir. Bu ivmeölçerlerin içinde sinyali taşınabilir voltaj sinyaline çeviren bir sinyal koşullayıcı devre

bulunmaktadır. Bu şekilde üretilen sinyal veri toplama ünitesine aktarılmaktadır (Sevim, 2010).



Şekil 1.2. Piezoelektrik tipi ivmeölçerin iç mekanizması (URL-2, 2016)

Bir mühendislik yapısının titreşim verilerinin doğru ve net bir şekilde elde edilebilmesi için kullanılacak ivmeölçer tipinin çok dikkatli seçilmesi gerekmektedir. Yapılacak çalışmanın amacına uygun olarak seçilmeyen ivmeölçerler ile gerçekleştirilen deneysel ölçümlerden kaliteli sinyaller alınması mümkün değildir. Bu nedenle, ivmeölçerleri ölçebileceği frekans aralığı, hassasiyeti, ölçebileceği maksimum ivme değeri ve çalışma sıcaklığına göre belirlemek gerekmektedir. Bu özellikler kısaca aşağıda açıklanmaktadır.

- Frekans aralığı: İvmeölçerin, ölçebileceği maksimum ve minimum frekans aralığını belirtmektedir.
- Hassasiyet: İvmeölçerin, yerçekimi ivmesiyle orantılı üretebileceği elektrik gücünü belirtmektedir. Birimi genellikle mV/g cinsindedir.
- Maksimum İvme Değeri: İvmeölçerin, elektrik sinyali bozulmadan veya kaybolmadan ölçebileceği en büyük ivme genliği değerini belirtmektedir. Birimi g'dir.
- Çalışma Sıcaklığı: İvmeölçerin, sağlıklı sinyal üretebileceği maksimum ve minimum ortam sıcaklığını belirtmektedir.

Yukarıda verilen özellikler bilindiği takdirde doğru ivmeölçeri seçmek kolaylaşmaktadır. Örneğin, düşük frekansa sahip yapılarda yüksek hassasiyetli ivmeölçerler, yüksek frekansa sahip yapılarda ise düşük hassasiyetli ivmeölçerler seçilmelidir. Diğer yandan kullanılacak ivmeölçerin ağırlıkları ve boyutları, ölçülecek yapının ağırlığı ve boyutlarından fazla olmamalıdır (Sevim 2010).

Tez çalışması kapsamında, B&K 4507B005 ve B&K 8340 tipi tek eksenli ivmeölçerler kullanılmıştır. Bu ivmeölçerlere ait bazı fotoğraflar ve genel özellikler sırasıyla Şekil 1.3 ve Tablo 1.2 de verilmektedir.



Şekil 1.3. a) B&K 8340 tipi tek eksenli ve b) B&K 4507 tipi tek eksenli ivmeölçerler (URL-(3-4), 2016)

Tablo 1.2. B&K 4507 B 005 ve B&K 8340 tipi tek eksenli ivmeölçerlere ait bazı özellikler (URL-(3-4), 2016)

Model	B&K 4507 B 005	B&K 8340
Hassasiyet	1 V/g	10 V/g
Frekans aralığı	0.4-6000 Hz	0.1-1500 Hz
Maksimum ivme	± 7 g	± 0.5 g
Çalışma sıcaklığı	-54 ile +100 °C arası	-51 ile +74 °C arası
Boyutlar	10 x 10 x 10 mm	50.3 x 50.3 91.9 mm
Toplam Kütle	4.6 gram	775 gram

1.4.1.3. Veri Toplama Sistemi ve Sinyal İşleme

Veri toplama sistemi, veri toplama ünitesi ve bilgisayardan oluşmaktadır. Veri toplama ünitesi, ivmeölçerlerden gelen sinyalleri toplamak ve ilgili bilgisayar programına aktarmak için kullanılmaktadır. Bilgisayar programı ise, sinyallerin işlenmesinde gerekli arayüzü sağlamaktadır. Sinyal toplama ve işleme kısaca şu şekilde açıklanabilir.

İvmeölçerler yapıdan aldıkları elektrik sinyallerini doğrudan veya çeşitli sinyal koşullama ünitelerinden geçirdikten sonra veri toplama sistemine aktarmaktadırlar. Sinyaller veri toplama sisteminde dinamik yapılarına uygun bir hızda ve çözünürlükte örneklendikten (sayısal forma dönüştürüldükten) sonra bilgisayar programında işlenmekte veya saklanmaktadır. İvmeölçerlerden veri toplama ünitesine aktarılan sinyaller genellikle hamdır. Yani sinyaller yapı titreşimlerinden ve ortamdaki gürültülerden oluşmaktadır. Bu nedenle ham sinyallerin kullanılması durumunda yapı davranışını doğru bir şekilde belirlemek güçleşir. Yapı davranışını doğru bir şekilde belirlemek için sinyal koşullama yapılmalıdır. Sinyal koşullama, ham sinyalleri istenen özelliklere getirme işlemidir. 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. Veri toplama sistemi içerisinde mevcut olan sinyal koşullandırıcılar bu işlemi gerçekleştirmektedir. 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 hatayı engellemek için ölçme hızı, en büyük frekansın en az iki katı seçilmelidir. Bu konuda daha fazla bilgi Heylen vd. (2007) ve Ramos'dan (2007) elde edilebilir.

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen deneysel ölçümlerde veri ünitesi olarak B&K 3560 C tipi 17 kanallı veri toplama ünitesi kullanılmıştır (Şekil 1.4). Bu cihaz, portatif olup iki adet batarya ile çalıştırılmakta ve elektrik olmadığı durumlarda 1-1.5 saat kadar ölçüm yapılabilir. Cihaza 17 adet tek eksenli ivmeölçer bağlanarak ölçümler gerçekleştirilebilmektedir. Fakat barajlar, köprüler gibi büyük mühendislik yapılarının davranışlarının doğru şekilde elde edilebilmesi için daha fazla ivmeölçer kullanılması gerekebilir. Bu durumda ölçüm cihazındaki kanal sayısı artırılabilir. Ancak ivmeölçer sayısını artırmak ve kanal artırıcı kullanmak beraberinde ek maliyet getirmektedir. Bu gibi durumlarda, ölçüm cihazı referanslı ölçüm yapmaya olanak sağlamaktadır. Referanslı ölçüm, mevcut ivmeölçerler kullanılarak aynı ölçüm içerisinde daha fazla noktadan ölçüm alınabilme özelliğidir.



Şekil 1.4. B&K 3560 C tipi 17 kanallı veri toplama ünitesi

Yapıların dinamik karakteristiklerinin belirlenebilmesi için ivmeölçerlerden veri toplama ünitesine aktararak saklanan sinyallerin işlenmesi gerekmektedir. Bu adıma sinyal işleme ismi verilmektedir. 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. Fakat gerek pratik sebeplerden gerekse hesaplama gereksinimlerinden dolayı frekans tanım alanı tercih edilmektedir. Zaman tanım alanındaki sinyallerin frekans tanım alanına aktarılmasında Fourier serilerinden yararlanılmaktadır. $x(t)$ ile gösterilen periyodik bir sinyal sonsuz Fourier serisine açıldığında,

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cos\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) \right] \quad (1.1)$$

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

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= \frac{2}{T} \int_0^T x(t) dt \\ a_n &= \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) dt \\ b_n &= \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) dt \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

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,

$$x_k = x(t_k) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{N/2} \left[a_n \cos\left(\frac{2\pi k}{N} n\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi k}{N} n\right) \right], \quad k=1,2,\dots,N \quad (1.3)$$

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

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N x_k \\ a_n &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k \cos\frac{2\pi nk}{N} \\ b_n &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k \sin\frac{2\pi nk}{N} \end{aligned} \right\} \quad (1.4)$$

Sinyal işleme sırasında bazı problemlerle karşılaşılmaktadır. Bu problemlerin en önemlisi sızıntı hatasıdır. 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. Bu konuda daha fazla bilgi literatürden elde edilebilir (Heylen vd., 2007; Ramos, 2007).

Tez 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

Brüel&Kjaer Firması tarafından geliştirilen PULSE (2006) yazılımı kullanılmıştır. Çevresel titreşim testlerinden PULSE (2006) yazılımıyla alınan sinyallerin işlenmesinde ve dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde Operational Modal Analysis (OMA, 2006) yazılımı kullanılmıştır.

1.4.2. Deneysel Modal Analiz Yöntemi ile İlgili Genel Kurallar

Deneysel Modal Analiz yöntemi ile ilgili ilk çalışmalar 1940'lı yıllarda uzay ve astronomi bilimlerinde, daha sonra havacılık, makine ve otomotiv sektörlerinde gerçekleştirilmiştir. 1980'li yıllarda Zorlanmış Titreşim Yöntemi, 1990'lı yıllarda ise Çevresel Titreşim Yöntemi inşaat mühendisliği yapılarında kullanılmaya başlanmıştır (Ewins, 2000; Bayraktar vd., 2007a; Bayraktar vd., 2007b; Ramos, 2007; Bayraktar vd., 2008a; Bayraktar vd., 2008b; Bayraktar vd., 2008c; Bayraktar vd., 2008d; Bayraktar vd., 2008e; Bayraktar vd., 2009a; Bayraktar vd., 2009b; Bayraktar vd., 2009c; Bayraktar vd., 2009d; Bayraktar vd., 2009e; Bayraktar vd., 2009f; Sevim vd., 2016; Altunışık vd., 2016a; Altunışık vd., 2016b; Altunışık vd., 2017). Her iki yöntemin birbirine göre avantajlı ve dezavantajlı tarafları bulunmaktadır.

Yapıların çevresel etkilerle titreştirilemediği veya ortamda yapıyı titreştirecek seviyede doğal etki olmadığı durumlarda Zorlanmış Titreşim Yöntemi kullanılmaktadır. Zorlanmış titreşim testinde kullanılan darbe çekiçleri ve sarsıcılar hem pahalıdır hem uygulamaları pratik değildir ve mevcut yapıya zarar verebilmektedir. Bu nedenle günümüzde Çevresel Titreşim Yöntemi daha çok tercih edilmektedir. Çünkü çevresel titreşim testinde, yapı doğal etkilerle titreşmekte ve herhangi bir dış tetikleyiciye ihtiyaç duyulmamaktadır. Dolayısıyla uygulaması, zorlanmış titreşim testine göre hem kolay hem de daha ucuzdur. Yapı doğal etkiler altında titreştiğinden, yapıdan alınan sinyaller yapı bütününe kapsamaktadır. Bu yöntemde yapıya zarar verme riski neredeyse sıfırdır. Üstelik uygulama sırasında yapı kullanım amacına hizmete devam etmektedir (Catbaş, 1997; Schwarz ve Richardson, 1999; Hwang vd., 2000; Inaudi vd., 2000; Bayraktar vd., 2009g; Şahin, 2009; Bayraktar vd., 2010a; Bayraktar vd., 2010b; Bayraktar vd., 2010c; Bayraktar vd., 2010d; Bayraktar vd., 2010e; Bayraktar vd., 2010f; Bayraktar vd., 2010g; Bayraktar vd., 2010h; Sevim vd., 2010; Altunışık vd., 2011; Bayraktar vd., 2011; Bayraktar vd., 2016).

Deneysel Modal Analiz Yöntemi'nin geçerli olabilmesi için bazı temel kabuller yapılmaktadır (Heylen vd., 2007). Bu kabuller birbirleriyle ilişkili olup kısaca şu şekilde sıralanabilir.

- Deneysel ölçümler sırasında, sıcaklık, nem vb. gibi bir etki altında yapının malzeme özelliklerinde ve sınır şartlarında herhangi bir değişim olmadığı kabul edilmektedir.
- Yapıda oluşan titreşimlerin küçük olduğu ve yapının lineer davranış sergilediği kabul edilmektedir. Yapının rijitliğini değiştirebilecek çok büyük titreşimler altında yapılan ölçümlerin doğru sonuçlar vermeyeceği kabul edilmektedir.
- Yapının bir bütün ve sürekli olduğu kabul edilmektedir. Diğer bir ifadeyle, yapının bir noktasında elde edilen davranışın bütün yapıyı temsil ettiği kabul edilmektedir.

Deneysel Modal Analiz ölçümlerinin sağlıklı bir biçimde gerçekleştirilebilmesi için uygulamacıların hem Deneysel Modal Analiz yöntemi hem de ölçülecek yapı davranışı hakkında genel mühendislik bilgisine sahip olması gerekmektedir. Bu bakımdan uygulamacı test planını doğru bir şekilde yapmalıdır. İyi bir test planı aşağıdaki gibi hazırlanmalıdır:

- ❖ Ölçülecek yapı belirlenmelidir.
- ❖ Yapının dinamik karakteristikleri hakkında ön bilgiye sahip olunmalıdır. Belirlenmesi gereken mod sayısı, modları içeren frekans aralığı ve mod şekilleri bilinmelidir. Bu bilgilere deneysel ölçümden önce yapılacak sonlu eleman analizi ile yaklaşık olarak ulaşılabilir.
- ❖ Kullanılacak Deneysel Modal Analiz Yöntemi belirlenmelidir. Zorlanmış Titreşim Yöntemi veya Çevresel Titreşim Yöntemi'nden uygun olana karar verilmelidir.
- ❖ Ölçümlerde kullanılacak ivmeölçer tipi seçilmeli ve hangi noktalardan ölçüm alınacağı belirlenmelidir. İvmeölçer seçimiyle ilgili bilgiler Bölüm 1.4.1.2'de detaylıca anlatılmıştır. İvmeölçerler sadece yerleştirildikleri noktadaki sinyalleri algıladıklarından yapının mod şekillerini elde edecek şekilde, uygun bir sıklıkta yerleştirilmelidir. Çünkü deneysel mod şekilleri ivmeölçer noktalarının modal yerdeğiştirmelerinin birleştirilmesinden meydana gelmektedir. Eğer ivmeölçer noktaları yeterli sıklıkta değilse yapının mod şekillerinin hepsi elde edilemeyebilir. Mümkünse ivmeölçer noktaları ile sonlu eleman modelindeki serbest düğüm noktaları birbiriyle örtüşmelidir. İvmeölçer sayısının yetersiz kaldığı durumlarda referanslı ölçümler gerçekleştirilerek bu sorun ortadan kaldırılmalıdır. Bu husus analitik ve deneysel modların karşılaştırılması sırasında ayrıca önem teşkil

etmektedir. Ayrıca ölçümler sırasında ivmeölçerlerin yapıyla tam bağlı olması yani yapı ile ivmeölçer arasında gevşeklik olmaması ve ivmeölçerin yağmurdan, manyetik alandan ve darbelerden korunması gerekmektedir.

- ❖ Yapı üzerine yerleştirilen ivmeölçerler veri toplama ünitesine tanıtılmalıdır. Sinyaller toplanmaya başlamadan önce frekans aralığı ve ölçüm hassasiyeti belirlenmelidir. Frekans aralığı ve ölçüm hassasiyeti, istenmeyen ortam sinyallerinin ve gürültü sinyallerinin etkisini azaltmak için gereklidir. Yapı için frekans aralığı sonlu eleman analizinden yaklaşık olarak tespit edilebilmektedir. Örneğin 0-100 Hz aralığında ölçüm yapılırsa 100 Hz'den yüksek sinyallerin ölçülmemesi sağlanmaktadır. Çünkü bu sinyaller yapı davranışının belirlenmesine katkıda bulunmaktan ziyade karışıklığa sebep olmaktadır. Bu konuyla ilgili detaylı bilgiler Bölüm 1.4.1.3'de verilmektedir.
- ❖ Ölçümlere başlamadan önce, yapı üzerine yerleştirilen ivmeölçerlerin veri toplama ünitesine sinyal aktarıp aktaramadığı kontrol edilmelidir.
- ❖ Testlerde gerekli miktarda kaliteli sinyalin elde edilebilmesi için ölçüm süresinin doğru belirlenmesi gerekmektedir. Ölçüm süresinin belirlenmesi için çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bendat ve Piersol'a (1986) göre minimum 17 dk, Caetano'ya (2000) göre, yapının en büyük periyodunun 240-1280 katı kadar ölçüm alınmalıdır. Rodrigues'e (2004) göre, yapının en büyük periyodunun 2000 katı kadar ölçüm alınmalıdır. Ramos'a (2007) göre, her testte 10 dk'den az olmamak kaydıyla, yapının en büyük periyodunun 1000 katı kadar ölçüm alınmalıdır.
- ❖ Ölçümler bittikten sonra, veri toplama sistemine ait yazılım kullanılarak ham sinyaller koşullama işlemine tabi tutulmakta ve işlenmek üzere bilgisayara dayalı sinyal işleme ve dinamik karakteristikleri belirleme programına aktarılmaktadır. Burada sinyaller işlenerek, hem frekans tanım alanında hem de zaman tanım alanında yapının doğal frekansları, mod şekilleri ve sönüm oranları belirlenmektedir.

1.4.3. Deneysel Modal Analiz Yöntemine Ait Formülasyon

1.4.3.1. Çevresel Titreşim Yöntemi

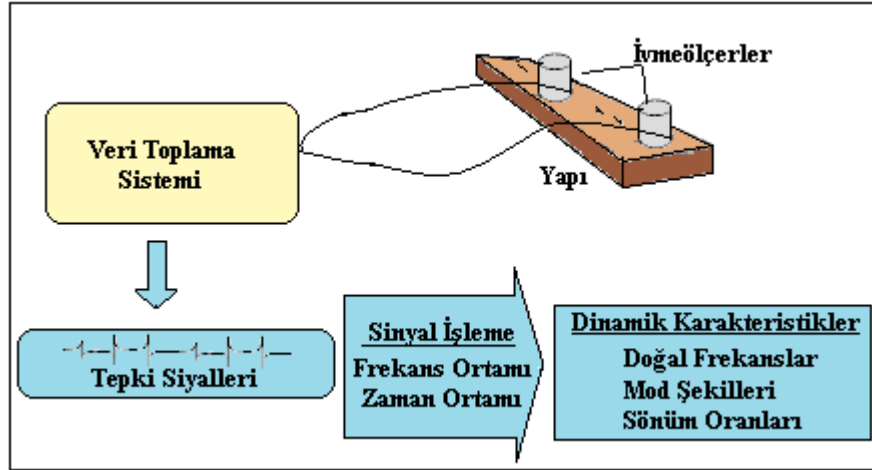
Çevresel Titreşim Yöntemi'nde, etki kuvveti ölçülmediğinden Etki Davranış Fonksiyonu belirlenmemektedir. Dolayısıyla bu yöntem literatürde Operasyonel Modal Analiz veya Sadece Tepki Modal Analizi gibi isimler almaktadır (Zhang vd., 2002;

Brincker vd., 2003). Bu yöntemde, yapıların dinamik karakteristikleri frekans ve zaman tanım alanlarında algoritmalara sahip yöntemlerle belirlenmektedir. Frekans tanım alanındaki yöntemler, her bir noktada ölçülen sinyalin analizine ve sinyaller arasındaki korelasyona dayanmaktadır. Bunlar, parametrik olmayan yöntemler olarak da adlandırılmaktadır. Zaman tanım alanındaki yöntemler ise her bir noktada sinyalin zaman geçmişine veya korelasyon fonksiyonlarıyla model uydurmaya dayanmaktadır. Zaman ve frekans tanım alanlarından birinin diğerine göre kesin bir üstünlüğü yoktur. Yani her iki tanım alanına dayalı yöntemler dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde kullanılabilir. Bununla birlikte iki tanım alanı arasında bazı farklılıklardan bahsedilebilir. Zaman tanım alanına dayalı yöntemlerin sayısal alt yapısı daha sağlamdır. Ayrıca istenmeyen gürültü sinyalleri daha kolay ayırt edilebilmekte ve sinyal işleme sırasında karşılaşılan sızıntı ve filtreleme hataları en aza indirilebilmektedir. Birbirine yakın frekanslar zaman tanım alanına dayalı yöntemlerle daha kolay belirlenebilmektedir (Ramos, 2007). Literatürde frekans ve zaman tanım alanlarına dayalı pek çok yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerden bazıları Tablo 1.3'te özetlenmektedir. Çevresel Titreşim Yöntemi'ne (ÇTY) göre yapıların dinamik karakteristiklerinin nasıl belirlendiğini gösteren akış şeması Şekil 1.5'te verilmektedir.

Tez çalışması kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda, betonarme düzlem çerçeve modelinin dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde OMA (2006) yazılımında yer alan ve literatürde sıklıkla tercih edilen yöntemlerden, Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma (GFOA) ve Stokastik Altalan Belirleme (SAB) yöntemleri kullanılmıştır. Bu yöntemlere ait formülasyon aşağıda verilmektedir.

Tablo 1.3. ÇTY'e dayalı bazı dinamik karakteristik belirleme yöntemleri

Tanım Alanı	Yöntem
Frekans	Piklerin Seçilmesi (PS)
	Frekans Ortamında Ayırıştırma (FOA)
	Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma (GFOA)
	Polimax
Zaman	Rastgele Azaltım
	Tekrarlanan
	Maksimum Olasılık
	Stokastik Altalan Belirleme (SAB)



Şekil 1.5. Çevresel Titreşim Yöntemi'ne göre yapıların dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi

1.4.3.1.1. Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma (GFOA) Yöntemi

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

GFOA yönteminde, bir titreşim pikinin etrafında tanımlanan tek serbestlik dereceli Güç Spektral Yoğunluk fonksiyonu (GSY), Ters Ayırık 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 (Jacobsen vd., 2006). GFOA yönteminde ölçülmeyen etki kuvveti ve ölçülen davranış fonksiyonu arasındaki ilişki;

$$G_{yy}(j\omega) = H(j\omega)^* G_{xx}(j\omega) H(j\omega)^T \quad (1.5)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Bendat ve Piersol, 2004). Burada; $G_{xx}(j\omega)$ etki sinyalinin Güç Spektral Yoğunluk (GSY) fonksiyonunu, $G_{yy}(j\omega)$ tepki sinyalinin Güç Spektral Yoğunluk fonksiyonunu ve $H(j\omega)$ frekans davranış fonksiyonunu göstermektedir. Denklem (1.5)'teki * ve T sırasıyla ifadelerin kompleks eşleniğini ve transpozmesini göstermektedir. Matematiksel düzenlemelerden sonra tepki sinyaline ait GSY fonksiyonu tek kutuplu artık değer fonksiyonu formunda,

$$H(j\omega) = \sum_{k=1}^n \frac{R_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{R_k^*}{j\omega - \lambda_k^*} \quad (1.6)$$

şeklinde elde edilmektedir. Burada; n mod sayısını, λ_k kutup fonksiyonunu ve R_k artık değer fonksiyonunu göstermektedir. Gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra denklem (1.5),

$$G_{yy}(j\omega) = \sum_{k=1}^n \sum_{s=1}^n \left[\frac{R_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{R_k^*}{j\omega - \lambda_k^*} \right] G_{xx}(j\omega) \left[\frac{R_s}{j\omega - \lambda_s} + \frac{R_s^*}{j\omega - \lambda_s^*} \right]^{\bar{H}} \quad (1.7)$$

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

$$G_{yy}(j\omega) = \sum_{k=1}^n \frac{A_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{A_k^*}{j\omega - \lambda_k^*} + \frac{B_k}{-j\omega - \lambda_k} + \frac{B_k^*}{-j\omega - \lambda_k^*} \quad (1.8)$$

şeklinde elde edilmektedir (Brincker vd., 2000). Burada; A_k tepki sinyalinin GSY fonksiyonuna ait k. artık değer matrisini göstermektedir. GFOA yönteminde ilk adım GSY matrisini belirlemektir. Ayrık frekanslarda tepki sinyalinin GSY'sinin tahmini $\omega = \omega_i$ olarak bilinmekte ve sonra tekil değer ayrıştırma matrisi alınarak ayrıştırılmaktadır (Brincker vd., 2000). Buna göre denklem (1.8),

$$G_{yy}(j\omega_i) = U_i S_i U_i^{\bar{H}} \quad (1.9)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada; u_{ij} tekil vektörleri, $U_i = [u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{im}]$ tekil vektörleri içeren bütün matrisi, s_{ij} skaler tekil değerleri ve $S_i = [s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{im}]$ skaler tekil değerleri içeren diyagonal matrisi göstermektedir. Denklem 1.9'da verilen GSY fonksiyonunda, pik değer yapan noktalar doğal frekanslara karşılık gelmektedir. Pik noktaları oluşturan tekil vektörler (u_{ij}) ise doğal mod şekillerine karşılık gelmektedir (Brincker vd., 2000).

Pik etrafındaki GSY fonksiyonundan elde edilen tek serbestlik dereceli tekil değer yoğunluk fonksiyonu kullanılarak doğal frekans ve sönüm elde edilmektedir. Bu işlem ters HFD yapılarak zaman ortamında doğal frekans ve sönüm belirlenebilmektedir (Brincker vd., 2000). İki modun belirgin olması durumunda, birinci tekil vektör her zaman için iyi bir mod şekli ortaya koyacaktır. Bununla birlikte, iki mod ortagonal olması durumunda, bu modlara ait tekil vektörler ilgili mod şekil vektörlerini göstermektedir (Brincker vd., 2000).

1.4.3.1.2. Stokastik Altalan Belirleme (SAB) Yöntemi

Stokastik Altalan Belirleme (SAB) yöntemi korelasyon veya spektruma ihtiyaç duymadan doğrudan zaman verileriyle çalışan, zaman tanım alanına dayalı bir yöntemdir. Bu yöntem dinamik karakteristiklerin belirlenmesi için uygundur (Overschee ve Moor, 1996; Peeters ve Roeck , 2000; Peeters, 2000; Yu ve Ren, 2005). Bu yöntemde yapı sisteminin dinamik davranışı lineer, sabit katsayılı ikinci derece diferansiyel denklem olarak,

$$M\ddot{U}(t) + C\dot{U}(t) + KU(t) = R(t) = Bu(t) \quad (1.10)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada; M, C, K sırasıyla sistemin kütle, sönüm ve rijitlik matrisleridir. $R(t)$ 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, denklem (1.10), titreşen yapının davranışını temsil etmesine rağmen bu şekliyle SAB yöntemine uygun değildir. Bu yüzden, denklem (1.10) daha uygun bir form olan ayrık-zaman stokastik durum-uzayı modeline dönüştürülmektedir (Yu ve Ren, 2005).

Durum-Uzay modeli kontrol teorisinden üretilmekte, fakat bu model inşaat mühendisliğinde viskoz sönüme sahip yapıların dinamik karakteristiklerini hesaplamak için kullanılmaktadır (Yu ve Ren, 2005). Aşağıdaki tanımlamalar kullanılarak (1.10) denklemi,

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{x}(t) &= \begin{pmatrix} \mathbf{U}(t) \\ \dot{\mathbf{U}}(t) \end{pmatrix} \\ \mathbf{A}_* &= \begin{pmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I}_{n_2} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{pmatrix} \\ \mathbf{B}_* &= \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{B} \end{pmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (1.11)$$

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}_* \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_* \mathbf{u}(t) \quad (1.12)$$

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

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}_* \mathbf{x}(t) + \mathbf{D}_* \mathbf{u}(t) \quad (1.13)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Yu ve Ren, 2005). Burada; \mathbf{C}_* sistem davranış matrisini, \mathbf{D}_* doğrudan iletim matrisini göstermektedir. Denklem (1.12) ve (1.13) sürekli-zaman belirli durum-uzayı 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 ayrık zamanlarda gerçekleştirilmektedir. Örnekleme süresi ve ortamdaki gürültü sinyal verilerini her zaman için etkilemektedir. Örneklemeden sonra, durum-uzay modeli,

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{x}_{k+1} &= \mathbf{A}_* \mathbf{x}_k + \mathbf{B}_* \mathbf{u}_k \\ \mathbf{y}_k &= \mathbf{C}_* \mathbf{x}_k + \mathbf{D}_* \mathbf{u}_k \end{aligned} \right\} \quad (1.14)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Yu ve Ren, 2005). Burada; $x_k = x(k\Delta t)$ ayrık-zaman durum vektörünü, u_k belirgin etki sinyal vektörünü göstermektedir. Gerçek operasyonel koşullarda yapılan ölçümler, yapıya ve dış ortamdaki gürültüye ait sinyalleri içermektedir. Dolayısıyla denklem (1.14)' e stokastik gürültü bileşenleri eklendiğinde belirli-stokastik durum-uzayı modeli,

$$\left. \begin{aligned} x_{k+1} &= A_* x_k + B_* u_k + w_k \\ y_k &= C_* x_k + D_* u_k + v_k \end{aligned} \right\} \quad (1.15)$$

şeklinde ifade edilmektedir. 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,

$$E_* \left[\begin{pmatrix} w_p \\ v_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_q^T & v_q^T \end{pmatrix} \right] = \begin{pmatrix} Q & S \\ S^T & R \end{pmatrix} \delta_{pq} \quad (1.16)$$

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

$$\delta_{pq} = \begin{cases} 1, & \text{eğer } p=q \\ 0, & \text{eğer } p \neq q \end{cases} \quad (1.17)$$

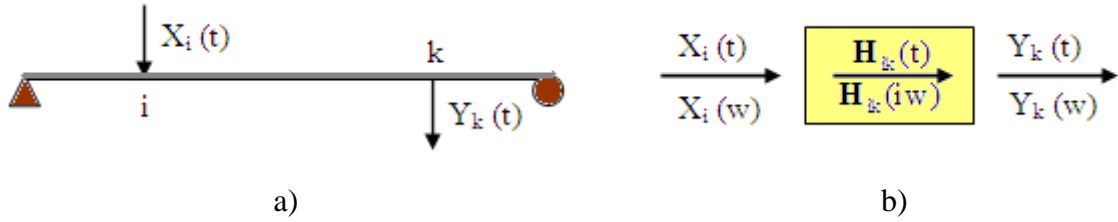
SAB yönteminde yapı sisteminin davranışı, normal operasyon koşullarında değeri ölçülemeyen sinyallerle titreştirilerek belirlenmektedir. Bu veri eksikliğinden dolayı, denklem (1.15)'te gösterilen belirgin sinyal verisi u_k ' yi, gürültü terimleri olan w_k ve v_k 'den ayırt etmek mümkün değildir. Bu durumda, u_k gürültü terimleri w_k ve v_k cinsinden yazılırsa yapının ayrık-zaman stokastik durum-uzay modeli,

$$\left. \begin{aligned} x_{k+1} &= A_* x_k + w_k \\ y_k &= C_* x_k + v_k \end{aligned} \right\} \quad (1.18)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Denklem (1.18), çevresel titreşimlerden dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde zaman alanının temelini oluşturmaktadır.

1.4.3.2. Zorlanmış Titreşim Yöntemi

Zorlanmış Titreşim Yöntemi'nde, yapı $X_i(t)$ gibi yapay bir kuvvetle i noktasından titreştirilmekte ve yapının bu etkiye göstermiş olduğu tepki $-Y_k(t)$, yapay kuvvet sinyali $-X_i(t)$ ile birlikte ölçülmektedir (Şekil 1.6a). Yapay titreşimler, sarsıcılardan veya darbe çekiçlerinden elde edilmektedir. Zaman tanım alanında ölçülen bu sinyaller frekans tanım alanına Fourier serileri kullanılarak dönüştürüldüğünde, etki-tepki zaman sinyalleri arasındaki ilişkiyi gösteren FDF- H_{ik} yerini Transfer Matrisi $-H_{ik}(i\omega)$ olarak adlandırılan FDF matrisine bırakmaktadır (Şekil 1.6b) (Schwarz ve Richardson, 1999).



Şekil 1.6. Zorlanmış Titreşim Yöntemi'nin a) Şematik gösterimi b) Frekans davranış fonksiyonunun belirlenmesi (Schwarz ve Richardson, 1999)

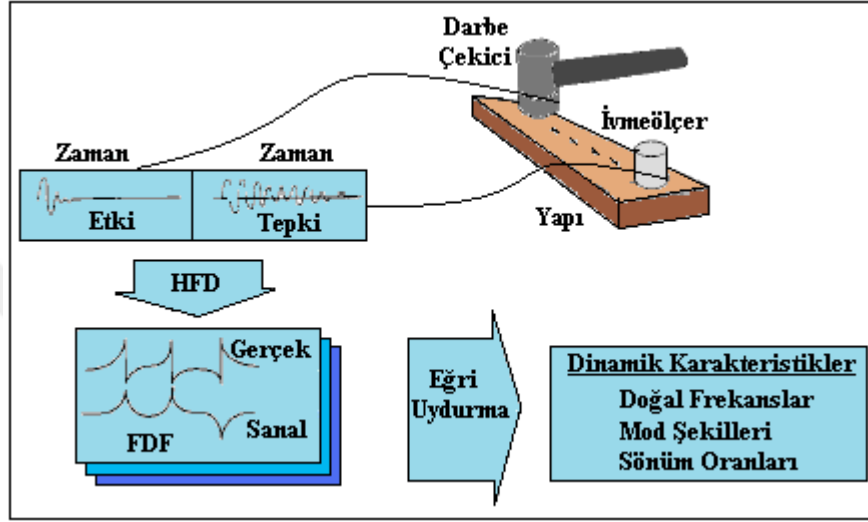
Zorlanmış Titreşim Yöntemi'nde, etki-tepki sinyalleri arasındaki ilişki,

$$H_{ik}(i\omega) = \frac{Y_k(\omega)}{X_i(\omega)} \quad (1.19)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada; $H_{ik}(i\omega)$ Frekans Davranış Fonksiyonu'nu, $X_i(\omega)$ frekans tanım alanındaki tepki fonksiyonunu ve $Y_k(\omega)$ frekans tanım alanındaki etki fonksiyonunu göstermektedir. Elde edilen Frekans Davranış Fonksiyonu $H_{ik}(i\omega)$ çeşitli

sayısal teknikler kullanılarak ayrıştırılmakta ve yapıya ait doğal frekanslar, mod şekilleri ve sönüm oranları elde edilmektedir.

Zorlanmış Titreşim Yöntemi'ne göre bir yapının dinamik karakteristiklerinin nasıl belirlendiğini gösteren akış şeması Şekil 1.7'de verilmektedir. Şekil 1.7'de görüldüğü gibi yapıya etkiyen kuvvet darbe çekicinden sağlanmaktadır.



Şekil 1.7. Darbe çekici ile dinamik karakteristiklerin belirlenmesi (Schwarz ve Richardson, 1999)

1.5.Sonlu Eleman Yöntemine Dayalı Dinamik Formülasyon

Mühendislik yapılarının çözümünde ortaya çıkan problemlerin birçoğu için analitik çözümler elde etmek zor ve imkansızdır. Bu yüzden genellikle problemlerin analitik çözümü yerine, kabul edilebilir düzeyde yaklaşık bir çözüm aranmaktadır. Karmaşık geometriler, malzeme özellikleri ve sınır şartları içeren problemlerin çözümünde, yaklaşık ve kabul edilebilir sonuçlar veren sayısal hesap yöntemleri mevcuttur. 1900'lü yılların ortalarından itibaren kullanılmaya başlanan sonlu eleman yöntemi, günümüzde karmaşık ve analitik çözümü zor olan mühendislik yapılarının davranışlarının belirlenmesinde sıklıkla kullanılan sayısal yöntemlerin başında gelmektedir.

Sonlu eleman yöntemi; düzgün veya karmaşık geometriye sahip yapıları çok küçük parçalara bölerek, her bir parçanın kendi içerisinde çözümünün yapılmasıyla tüm yapının çözümünün kabul edilebilir bir yaklaşımla elde edildiği bir yöntemdir. Problemin basite indirgenmesi ile kesin sonuç yerine yaklaşık bir sonuç elde edilmektedir. Ancak problem

çözümünde iyileştirme yapılarak kesin sonuca daha yaklaşık bir sonuç elde edilebilir. Sonlu eleman yöntemi genel olarak bazı avantaj ve dezavantajlara sahiptir.

Sonlu eleman yönteminin avantajları başlıca şu şekilde sıralanabilmektedir;

- ❖ Sonlu eleman yöntemi, geometrisi karmaşık şekillerin incelenmesine olanak sağlar,
- ❖ Çözüm bölgesi alt bölgelere ayrılabilir ve değişik sonlu elemanlar kullanılabilir,
- ❖ Gerektiğinde bazı alt bölgelerde daha hassas hesaplamalar yapılabilir,
- ❖ Değişik ve karmaşık malzeme özellikleri olan sistemlerde kolaylıkla uygulanabilir. Örneğin, anizotropi, nonlineer, zamana bağlı malzeme özellikleri gibi malzeme özellikleri dikkate alınabilir,
- ❖ Parçanın geometrisinde basitleştirme yapma ihtiyacı duyulmaz,
- ❖ Sınır koşulları, sistemin temel denklemleri kurulduktan sonra, oldukça basit satır sütun işlemleriyle denklem sistemine dahil edilebilir,
- ❖ Mühendislik uygulamalarında kullanılacak birçok yazılım mevcuttur (Fortran kodları, ABAQUS, SAP2000, ANSYS, Nastran, Patran, Marc vs.)

Sonlu eleman yöntemlerinin dezavantajları;

- ❖ Özel problemlere uygulanmasında bazı zorluklar (sınır koşulları, ayrıklaştırılma vs.) vardır,
- ❖ Elde edilen sonucun doğruluğu verilerin ve uygulanan yöntemin doğruluğuna bağlıdır,
- ❖ Kabul edilebilir ve doğru sonucun elde edilmesi için bölgenin ayrıklaştırılması (mesh) için deneyim gerektirir,
- ❖ Diğer yaklaşık yöntemlerde olduğu gibi, sonlu eleman yöntemi ile elde edilen sonucun doğruluğu üzerinde dikkat edilmeli ve fiziksel problem iyi incelenmelidir. Çıkabilecek sonuç önceden kestirilmeli ve sonuç ona göre test edilmeli ve yorumlanmalıdır.

Günümüzde, özel ve genel kullanım amaçlı çok sayıda sonlu eleman programı geliştirilmiştir. Bu programlar vasıtasıyla mühendislik yapılarının statik, dinamik, modal, doğrusal ve doğrusal olmayan davranışları belirlenebilmektedir. Bu tez çalışmasında, laboratuvar ortamında inşa edilen iki açıklıklı ve iki katlı betonarme düzlem çerçeve modelinin sonlu eleman analizleri ANSYS (ANSYS, 2016) programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

1.5.1. Analitik Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi

Yapı sistemlerinin yer hareketi etkisindeki sönümlü hale ait ortak hareket denklemi,

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = R \quad (1.20)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada; M, C ve K sistemin sırasıyla kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini, U, \dot{U} , \ddot{U} ise aynı sistemin rölatif yerdeğiştirme, hız ve ivme vektörlerini göstermektedir. R ise sisteme etkileyen ve zamanla değişen dış yük vektörüdür.

Bina türü veya herhangi bir yapı sistemine ait doğal frekanslar ve mod şekilleri, o sisteme ait sönümsüz serbest titreşim hareket denkleminin çözümünden elde edilmektedir. Bu durumda denklem (1.20)'de sönümün ve dış kuvvetin olmadığı kabul edilirse, sistemin zamana bağlı sönümsüz serbest titreşim hareket denklemi,

$$M\ddot{U} + KU = 0 \quad (1.21)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir (Chopra, 2006).

Serbest titreşim hareketi harmonik bir harekettir ve yerdeğiştirmeler denklem (1.22) yardımıyla elde edilebilir.

$$U = A \cos(\omega_n t) + B \sin(\omega_n t) \quad (1.22)$$

Burada A ve B başlangıç şartlarından elde edilir. Bununla birlikte, α faz açısı; ω_n doğal açısal frekans ve ϕ hareketin genlik vektörü olmak üzere, sönümsüz bir sistemin serbest titreşimi için çözüm,

$$U = \phi \cos(\omega_n t - \alpha) \quad (1.23)$$

şeklinde yazılabilir. (1.23) denkleminde,

$$\ddot{U} = -\omega_n^2 \phi \cos(\omega_n t - \alpha) \quad (1.24)$$

elde edilir. (1.23) ve (1.24) denklemleri (1.21)'de yerine yazılırsa,

$$-\omega_n^2 M \phi \cos(\omega_n t - \alpha) + K \phi \cos(\omega_n t - \alpha) = 0 \quad (1.25)$$

elde edilir. Bu denklem düzenlenirse,

$$(K - \omega_n^2 M) \phi = 0 \quad (1.26)$$

bir özdeğer denklemi elde edilir. Bu denklemden titreşim elde edilebilmesi için ϕ 'nin sıfırdan farklı olması gerekmektedir. Sıfırdan farklı bir matris ile bir vektörün çarpımlarının sıfır olmasının tek yolu, matrisin tersinin bulunamaması yani tekil bir matris olmasıdır. Bir matrisin tekil olabilmesi için ise, determinantın sıfır olması gerekmektedir. Buna göre;

$$|K - \omega_n^2 M| = 0 \quad (1.27)$$

olmalıdır. Burada $\omega_n^2 = \lambda$ alınır (1.27) denklemi,

$$|K - \lambda M| = 0 \quad (1.28)$$

şeklinde elde edilir. Burada (1.28) denklemi “Özdeğer Denklemi” veya “Frekans Denklemi” olarak adlandırılmaktadır. (1.28)'deki determinant alınır λ 'ya bağlı n . dereceden bir polinom elde edilir.

$$A_n \lambda^n + A_{n-1} \lambda^{n-1} + \dots + A_1 \lambda^1 + A_0 = 0 \quad (1.29)$$

(1.29) denkleminde n yapısal sistemin serbestlik derecesini göstermektedir. Bu denklemin çözümünden n tane λ elde edilir. Her bir λ , bir ω^2 'ye tekabül eder. Yani,

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= \omega_1^2 \\ \lambda_2 &= \omega_2^2 \\ &\cdot \\ &\cdot \\ &\cdot \\ \lambda_n &= \omega_n^2\end{aligned}$$

şeklindedir. Bu değerlere “Özdeğer”, “Karakteristik Değer” veya “Normal Değer” adı verilir. Demek ki, n serbestlik dereceli bir sistemin n tane doğal titreşim frekansına $(\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n)$ karşılık gelen n tane bağımsız ϕ vektörü vardır. Bu vektörler, “Doğal Titreşim Modları” veya “Doğal Titreşim Mod Şekilleri” olarak adlandırılmaktadır. Bu vektörler, ayrıca “Öz Vektörler”, “Karakteristik Vektörler” veya “Normal Modlar” olarak bilinmektedir.

(1.29) denkleminin kökleri gerçek pozitifdir. Sistemin doğal frekanslarının en küçüğü “Temel Frekans” ve bu frekansa karşılık gelen mod şekli “Temel Mod Şekli” olarak adlandırılır.

1.5.2. Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Dinamik Davranışın Belirlenmesi

Sayısal analizler, yapının kendi ağırlığı ve dış kuvvetler altında meydana gelen yerdeğiştirme ve gerilmeleri elde etmek için kullanılmaktadır. Bu kısımda, sonlu eleman yöntemine dayalı doğrusal ve doğrusal olmayan sistemlerin dinamik denklemleri verilmektedir.

Sonlu eleman yöntemine göre analiz edilecek olan bir yapının doğrusal dinamik davranışını temsil edebilecek hareket veya dinamik denge denklemi,

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + K_L U = R \quad (1.30)$$

şeklinde yazılabilir. Burada M ve C doğrusal sistemin sırasıyla kütle ve sönüm matrislerini, U, \dot{U} ve \ddot{U} ise aynı sistemin rölatif yerdeğiştirme, hız ve ivme vektörlerini göstermektedir. K_L doğrusal sistemin tanjant rijitlik matrisini göstermektedir. R ise sisteme etkiyen ve zamanla değişen dış yük vektörüdür.

Doğrusal davranış göstermeyen sistemlerin dinamik denge denklemi, lineer sistemlere benzer olarak,

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + K_{NL}U = R \quad (1.31)$$

şeklinde yazılabilir. Burada M ve C doğrusal olmayan sistemin sırasıyla kütle ve sönüm matrislerini, U, \dot{U} ve \ddot{U} ise aynı sistemin rölatif yerdeğiştirme, hız ve ivme vektörlerini göstermektedir. K_{NL} doğrusal olmayan sistemin tanjant rijitlik matrisini göstermektedir. R ise sisteme etkiyen ve zamanla değişen dış yük vektörüdür.

(1.31) denklemi, doğrusal sistemlerin çözümünde kullanılan denge denklemi ile benzerdir. Denklem (1.31)'de doğrusal sistemlerin tanjant rijitlik matrisi K_L 'nin yerine K_{NL} tanjant rijitlik matrisi konulmuştur. Doğrusal olmayan sistemlerde gerilme-şekil değiştirme eğrisi doğrusal davranış göstermediğinden K_{NL} rijitlik matrisi her zaman aralığının başında yeniden hesaplanmaktadır.

Denlem (1.30) ve (1.31) matematiksel olarak ikinci dereceden lineer diferansiyel denklem sistemi göstermektedir. Bu denklemlerin çözümü, sabit katsayılı lineer diferansiyel denklemlerin çözümü gibi yapılabilir. Ancak, denklemlerin genel çözümü için uygulanan işlemler, eğer matrislerin dereceleri büyük ise zor ve zaman alıcıdır (Bathe, 1996; Akköse, 2004). Bu denklemlerin çözümü için birçok yaklaşık sayısal yöntem mevcut olmakla birlikte, pratik ve kolay uygulanabilir olması nedeniyle direkt integrasyon yöntemleri ile çözüm aranmaktadır.

Direkt integrasyon işleminde dinamik hareket denklemi, adım adım sayısal işlem kullanılarak integre edilmektedir. Direkt integrasyon işlemi iki hususa göre gerçekleştirilir. İlk olarak herhangi bir t anında dinamik hareket denklemini sağlamak yerine, ayrı ayrı Δt zaman aralıklarında denklemin sağlanması amaçlanmaktadır. Bir diğer ifadeyle atalet ve sönüm kuvvetlerini içeren statik dengenin, çözüm aralığı içerisinde her Δt zaman aralığı için araştırılmalıdır. Dolayısıyla, statik analizlerde kullanılan bütün çözüm teknikleri direkt integrasyon işleminde de kullanılabilir. İkinci husus, her Δt zaman aralığında yerdeğiştirme, hız ve ivme değerlerinin değişim göstermesidir. Bu değişim üzerinde yapılan kabulün şekli, çözümün doğruluğunu etkilemektedir (Bathe, 1996; Akköse, 2004).

Çözümde, U_0 , \dot{U}_0 ve \ddot{U}_0 ile gösterilen, t=0 anındaki yerdeğiştirme, hız ve ivme vektörleri bilinmektedir. Dinamik hareket denkleminin çözümü, t=0 ile t=T zaman

aralığında dikkate alınır, T çözüm zamanı n eşit zaman aralığına bölünür ($\Delta t=T/n$). t anındaki çözüm bilindiği için, t+ Δt anındaki çözüm elde edilebilir. Yani, başlangıç şartlarından hareketle, Δt zaman sonraki çözüm bulunabilmektedir. Bu işlem, çözüm aralığı boyunca tekrar ettirilir. Direkt integrasyon yöntemleri arasında Merkezi Farklar, Houbult ve Newmark yöntemi en etkili olanlarıdır (Akköse, 2004).

1.5.2.1. Newmark Yöntemine Göre Zaman Tanım Alanında Dinamik Analiz

Tez kapsamında yapılan çalışmalarda, betonarme düzlem çerçeve modelinin yapısal davranışının tespit edilmesi için gerçekleştirilen dinamik analizlerde Newmark yöntemi tercih edilmiştir.

Newmark yönteminde, hız ve yerdeğiştirmeler t ile t + Δt zaman arasında,

$$\dot{U}_{t+\Delta t} = \dot{U}_t + \left[(1-\gamma)\ddot{U}_t + \gamma\ddot{U}_{t+\Delta t} \right] \Delta t \quad (1.32)$$

$$U_{t+\Delta t} = U_t + \dot{U}_t (\Delta t) + \left[(0.5-\beta)\ddot{U}_t + \beta\ddot{U}_{t+\Delta t} \right] (\Delta t)^2 \quad (1.33)$$

şeklindeki gibi ifade edilebilmektedir (Bathe, 1996; Chopra, 2006). Burada U_t , \dot{U}_t , \ddot{U}_t sırasıyla t anındaki yerdeğiştirme, hız ve ivme vektörlerini, $U_{t+\Delta t}$, $\dot{U}_{t+\Delta t}$, $\ddot{U}_{t+\Delta t}$ sırasıyla t+1 anındaki yerdeğiştirme, hız ve ivme vektörlerini göstermektedir. Bu denklemde β ve γ integrasyon parametreleri olup Δt zaman aralığındaki ivmenin değişimini tanımlamaktadır. Ayrıca bu parametreler, kullanılan yöntemin stabilite ve doğruluk karakteristiklerini belirlemektedir. $\gamma = \frac{1}{2}$ ve $\frac{1}{6} \leq \beta \leq \frac{1}{4}$ seçilmesi Newmark yönteminin doğruluğu için yeterli olmaktadır (Chopra, 2006).

Bölüm 1.5.2’de verilen (1.30) denkleminin t ve t+1 anındaki dengesi dikkate alındığında,

$$M\ddot{U}_t + C\dot{U}_t + K U_t = R_t \quad (1.34)$$

$$M\ddot{U}_{t+1} + C\dot{U}_{t+1} + K U_{t+1} = R_{t+1} \quad (1.35)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir. Eğer (1.35) denkleminin (1.34) denklemi çıkarılırsa artımsal hareket denklemi,

$$M\Delta \ddot{U}_t + C\Delta \dot{U}_t + K\Delta U_t = \Delta R_t \quad (1.36)$$

şeklinde elde edilmektedir. Burada, Δ değişim operatörünü göstermek üzere,

$$\left. \begin{aligned} \Delta \ddot{U}_t &= \ddot{U}_{t+1} - \ddot{U}_t \\ \Delta \dot{U}_t &= \dot{U}_{t+1} - \dot{U}_t \\ \Delta U_t &= U_{t+1} - U_t \end{aligned} \right\} \quad (1.37)$$

şeklinde ifade edilmektedir. (1.32) ve (1.33) denklemleri artımsal olarak düzenlenirse;

$$\Delta \dot{U}_t = (\Delta t) \ddot{U}_t + \gamma (\Delta t) \Delta \ddot{U}_t \quad (1.38)$$

$$\Delta U_t = (\Delta t) \dot{U}_t + \frac{(\Delta t)^2}{2} \ddot{U}_t + \beta (\Delta t)^2 \Delta \ddot{U}_t \quad (1.39)$$

ifadeleri elde edilmektedir. (1.39) denkleminin $\Delta \ddot{U}_t$ çekilecek olursa;

$$\Delta \ddot{U}_t = \frac{1}{\beta (\Delta t)^2} \Delta U_t - \frac{1}{\beta (\Delta t)} \dot{U}_t - \frac{1}{2\beta} \ddot{U}_t \quad (1.40)$$

şeklinde elde edilmektedir. (1.40) denklemi (1.38) denkleminde yerine konursa,

$$\Delta \dot{U}_t = \frac{\gamma}{\beta (\Delta t)} \Delta U_t - \frac{\gamma}{\beta} \dot{U}_t + \Delta t \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta} \right) \ddot{U}_t \quad (1.41)$$

şeklinde elde edilmektedir. (1.40) ve (1.41) denklemleri artımsal hareket denklemi (1.36)'de yerine konur ve düzenlenirse;

$$\left. \begin{aligned} \left(\mathbf{K} + \frac{\gamma}{\beta(\Delta t)} \mathbf{C} + \frac{1}{\beta(\Delta t)^2} \mathbf{M} \right) \Delta \mathbf{U}_t = \Delta \mathbf{R}_t + \left(\frac{1}{\beta(\Delta t)} \mathbf{M} + \frac{\gamma}{\beta} \mathbf{C} \right) \dot{\mathbf{U}}_t \\ + \left[\frac{1}{2\beta} \mathbf{M} + \Delta t \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) \mathbf{C} \right] \ddot{\mathbf{U}}_t \end{aligned} \right\} \quad (1.42)$$

ifadesi elde edilmektedir. (1.42) denklemi aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\hat{\mathbf{K}}_t \Delta \mathbf{U}_t = \Delta \hat{\mathbf{R}}_t \quad (1.43)$$

Burada;

$$\hat{\mathbf{K}}_t = \mathbf{K}_L + \frac{\gamma}{\beta(\Delta t)} \mathbf{C} + \frac{1}{\beta(\Delta t)^2} \mathbf{M} \quad (1.44)$$

$$\Delta \hat{\mathbf{R}}_t = \Delta \mathbf{R}_t + \left(\frac{1}{\beta(\Delta t)} \mathbf{M} + \frac{\gamma}{\beta} \mathbf{C} \right) \dot{\mathbf{U}}_t + \left[\frac{1}{2\beta} \mathbf{M} + \Delta t \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) \mathbf{C} \right] \ddot{\mathbf{U}}_t \quad (1.45)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Dinamik hareket denkleminin, her Δt zaman aralığı içinde statik denge konumu sağlanarak çözümü elde edilmektedir. Burada adım adım çözümde ilk önce $\Delta \mathbf{U}_t$ (1.42) denkleminde bulunmaktadır. Daha sonra, (1.41) ve (1.40) denklemleri yardımıyla $\Delta \dot{\mathbf{U}}_t$ ve $\Delta \ddot{\mathbf{U}}_t$ elde edilmektedir. Bir sonraki adıma ait değerler, (1.46) denkleminde elde edilmektedir. İşlemler bu şekilde çözüm aralığı boyunca devam etmektedir.

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{U}_{t+1} &= \mathbf{U}_t + \Delta \mathbf{U}_t \\ \dot{\mathbf{U}}_{t+1} &= \dot{\mathbf{U}}_t + \Delta \dot{\mathbf{U}}_t \\ \ddot{\mathbf{U}}_{t+1} &= \ddot{\mathbf{U}}_t + \Delta \ddot{\mathbf{U}}_t \end{aligned} \right\} \quad (1.46)$$

Doğrusal olmayan sistemlerin çözümünde kullanılacak adım adım çözümün artımsal hareket denklemi,

$$M\Delta \ddot{U}_t + C\Delta \dot{U}_t + (\Delta F_s)_t = \Delta R_t \quad (1.47)$$

şeklinde yazılabilir. Burada artımsal elastik kuvvet,

$$(\Delta F_s)_t = (K_{sec})_t \Delta U_t \quad (1.48)$$

şeklinindedir. Şekil 1.8'de gösterilen sekant rijitliği, U_{t+1} bilinmediği için hesaplanamamaktadır. Eğer Δt zaman aralığı çok küçük alınırsa, sekant rijitliği yerine Şekil 1.8'de gösterilen tanjant rijitliği alınabilir. Bu durumda (1.48) denklemi,

$$(\Delta F_s)_t = (K_{NL})_t \Delta U_t \quad (1.49)$$

şeklinde yazılabilir. (1.49) denklemi (1.47) denkleminde yerine yazılırsa,

$$M\Delta \ddot{U}_t + C\Delta \dot{U}_t + (K_{NL})_t \Delta U_t = \Delta R_t \quad (1.50)$$

elde edilir. Newmark metodu için her zaman aralığında çözülen (1.43) denklemi (1.51) denklemindeki hali alır.

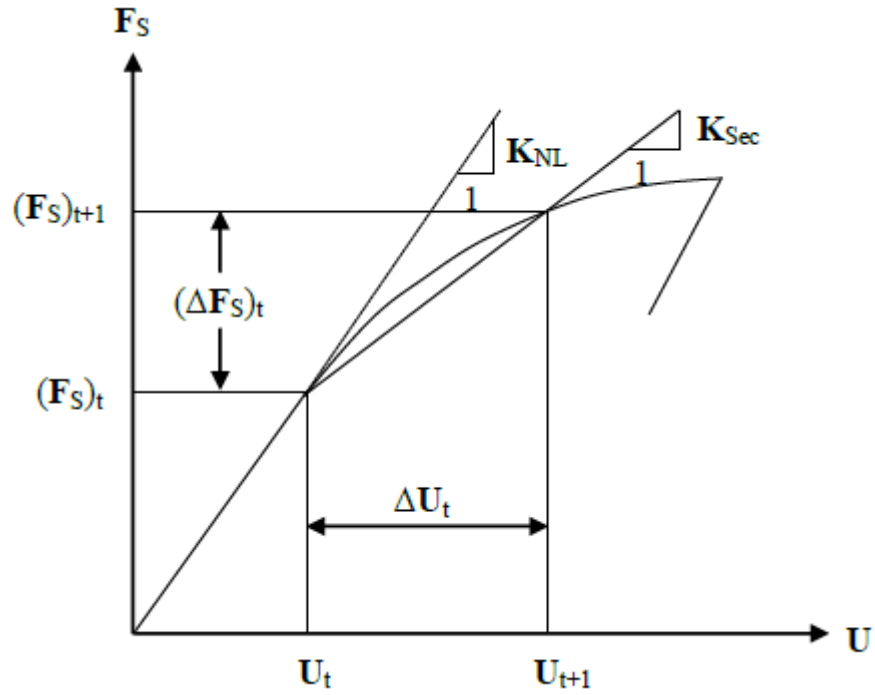
$$\left(\hat{K}_{NL} \right)_t \Delta U_t = \Delta \hat{R}_t \quad (1.51)$$

Denklem (1.51)'de,

$$\left(\hat{K}_{NL} \right)_t = \left(\hat{K}_{NL} \right)_t + \frac{\gamma}{\beta(\Delta t)} C + \frac{1}{\beta(\Delta t)^2} M \quad (1.52)$$

$$\Delta \hat{R}_t = \Delta R_t + \left(\frac{1}{\beta(\Delta t)} M + \frac{\gamma}{\beta} C \right) \dot{U}_t \left[\frac{1}{2\beta} M + \Delta t \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) C \right] \ddot{U}_t \quad (1.53)$$

şeklinde yazılabilir.



Şekil 1.8. Tanjant ve sekant rijitliği (Chopra, 2006)

Adım adım çözümde, sabit Δt zaman aralığı için gerçekleştirilen sonuçların doğruluğunda sapmalar olabilir. Bunun iki sebebi olabilir. Birincisi, tanjant rijitliğinin, sekant rijitliğinin yerine kullanılmasıdır. İkincisi ise kuvvet-şekil değiştirme eğrisinde geçişlerin tam olarak sağlanamamasıdır. Bu hatalar, çeşitli iterasyon işlemleri ile giderilebilir. Bu tez çalışmasında kullanılacak olan ANSYS sonlu eleman programı doğrusal olmayan analiz çözümleri için Newton-Raphson yöntemini kullanır. Newton-Raphson yöntemi dış yükler etkisi altında yerdeğiştirme yapan sistemin düğüm noktalarında oluşacak kuvvet farkını dikkate alır. İlk yerdeğiştirmeler yapının deforme olmamış konumunda hesaplanan rijitlik matrisinden oluşur. Sonraki her iterasyon adımında ise yapının deforme olmamış hali dikkate alınarak teğet rijitlik matrisi hesaplanır. Newton-Raphson metodu dengelenmemiş yük vektörünü kullanarak doğrusal çözüm yapmaktadır. Yakınsama olup olmamasına göre dengelenmemiş yük vektörü yeniden hesaplanmaktadır. Çözüm yakınsama sağlayıncaya kadar devam etmekte, yakınsama sağlanmadığı takdirde ise daha küçük yük artışları uygulanır.

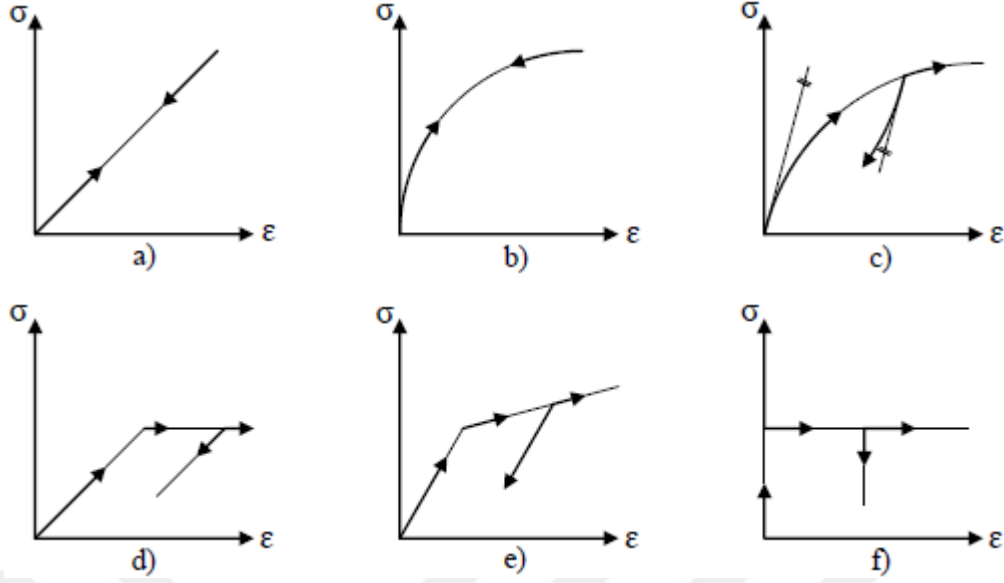
1.5.3. Yapı Malzemesi Davranışının Modellenmesi

Bir yapı sisteminin dış etkiler altındaki davranışının doğrusal olmaması genel olarak iki sebepten kaynaklanmaktadır. Bu sebeplerden biri; malzemenin iç kuvvet-şekildeğiştirme bağıntılarının, diğer ifadeyle bünye denklemlerinin doğrusal olmamasıdır. Diğer bir sebep ise; geometri değişimlerinin etkisi nedeniyle denge denklemlerinin doğrusal olmaması duumudur.

Herhangi bir mühendislik yapısının çözülebilmesi için denge koşullarının sağlanması, uygunluk koşullarının sağlanması ve malzeme davranışını temsil edebilecek gerilme-şekildeğiştirme ilişkilerinin belirlenmesi gerekmektedir. Malzeme davranışı ne kadar gerçeğe yakın temsil edilirse, problemin çözümü de o kadar doğru olacağından, malzemenin gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi çok önemli olmaktadır (Ersoy, 2012).

Gerçek malzemenin gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi genel olarak doğrusal olmayıp, malzeme özelliğine bağlı olarak, karmaşık bir değişim sergilemektedir. Çözümlerde değişik yaklaşıklık derecelerinde sonuç elde etmek için basit malzeme modelleri kabul edilmektedir.

Bu şekilde, taşıyıcı eleman ve sistem davranışını kapalı matematiksel çözümler ile elde etmek ve yorumlamak mümkün olmaktadır. İleri matematiksel modellerin kullanılması durumunda ise, özellikle taşıyıcı sistem karmaşık ise, yorumlanma zorlaşmaktadır. Bu nedenle, basit malzeme modelleri ile yapılan çözümler basit çözüm elde etmek ve karmaşık çözüm sonuçlarını değerlendirmek açısından önemlidir. Başlıca malzeme modelleri Şekil 1.9'da gösterilmektedir.



Şekil 1.9. Malzeme davranış modelleri a) Doğrusal elastik, b) Doğrusal olmayan elastik, c) Elasto-plastik, d) İdeal elasto-plastik, e) Pekleşen ideal elasto-plastik, f) Rijit plastik malzeme

1.5.3.1. Drucker-Prager Malzeme Modeli

Bu tez çalışmasında, betonun doğrusal olmayan malzeme davranışı Drucker-Prager malzeme modeli ile temsil edilmiştir. Malzemenin lineer olmayan davranışı betonun çekmede çatlaması, basınçta ise plastikleşmesi olarak ortaya çıkmaktadır. Drucker-Prager yaklaşımı bu etkilerin göz önüne alınabildiği bir elasto-plastik malzeme modelidir. C kohezyona ve ϕ içsel sürtünme açısına bağlı olarak ifade edilen Drucker-Prager yaklaşımının akma yüzeyi dik bir koni biçiminde olup Şekil 1.10'da sunulmuştur. Bu grafiksel gösterim malzemenin çekme ve basınçtaki davranışlarının farklı olduğunu göstermektedir. Şekil 1.10'da geçen $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ifadeleri asal gerilmeleri temsil etmektedir. Drucker-Prager yaklaşımında plastik şekildeğiştirme, hacimdeki değişimle birlikte ortaya çıkmaktadır. Bu yaklaşım, von-Mises kriterinin hidrostatik gerilme etkisini içerecek şekilde geliştirilmesinden elde edilmiştir. Genelleştirilmiş von-Mises kriteri ile elde edilen akma fonksiyonu şu şekildedir,

$$f(I_1, J_2) = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k = 0 \quad (1.54)$$

Bu fonksiyonda; α ve k malzeme sabitlerini, I_1 gerilme tansörünün birinci invariantsını, J_2 ise deviatorik gerilme tansörünün ikinci invariantsını göstermektedir. $\alpha=0$ olması durumu için ilgili kriter, Von-Mises kriteri ile aynı olmaktadır. α ve k malzeme sabitleri; malzemenin içsel sürtünme açısına (ϕ) ve malzeme kohezyonuna (c) bağlı olarak,

$$\alpha = \frac{2\sin\phi}{\sqrt{3}(3-\sin\phi)}, k = \frac{6c\cos\phi}{\sqrt{3}(3-\sin\phi)} \quad (1.55)$$

şeklinde elde edilmektedir. I_1 , gerilme tansörünün birinci invariantsı olup aşağıdaki gibidir.

$$I_1 = \sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33} \quad (1.56)$$

J_2 ise deviatorik gerilme tansörünün ikinci invariantsıdır ve

$$J_2 = \frac{1}{2} s_{ij} s_{ij} \quad (1.57)$$

şeklinde elde edilir. Burada s_{ij} deviatorik gerilmeler,

$$s_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma_m \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (1.58)$$

şeklindedir. δ_{ij} kronecker deltası olup, $i=j$ için 1; $i \neq j$ için 0 değerini almaktadır. σ_m ise ortalama gerilme olup,

$$\sigma_m = \frac{I_1}{3} = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}}{3} = \frac{\sigma_{ii}}{3} \quad (1.59)$$

gibi elde edilmektedir. Denklem (1.59) ile (1.58) denklemindeki terimler elde edilip (1.57) denkleminde yerine yazılırsa, deviatorik gerilme tansörünün ikinci invariantsı,

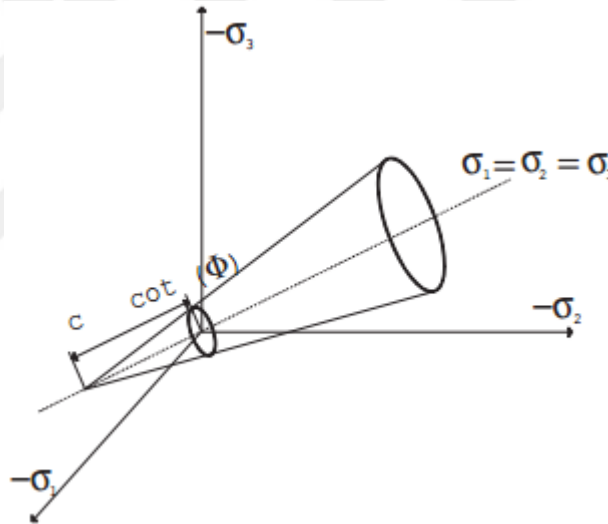
$$J_2 = \frac{1}{6} \left[(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 \right] + \sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2 + \sigma_{23}^2 \quad (1.60)$$

olarak elde edilir (Chen ve Mizuno, 1990).

ANSYS sonlu eleman programında, Drucker-Prager malzeme modeli üç parametre ile tanımlanmaktadır. Bu parametreler; kohezyon değeri, içsel sürtünme açısı ve genişleme açısıdır. Doran vd. (1998), beton için gerekli kohezyon değeri için aşağıdaki bağıntıyı önermektedir:

$$c = 0.23 \ln(E_0 d_{\text{maks}}^2) - 0.60 \quad (1.61)$$

Burada, E betonun elastisite modülünü (MPa), d_{maks} ise maksimum agrega boyutunu (mm) göstermektedir. Bu tez çalışması kapsamında, betonarme model için üretilen betonda, maksimum agrega boyutu 25 mm olan agrega kullanılmıştır.



Şekil 1.10. Drucker-Prager yaklaşımının asal gerilme uzayındaki akma yüzeyi

1.5.3.2. William ve Warnke Kırılma Modeli

ANSYS sonlu eleman programı betonun çok eksenli gerilme durumu altında kırılma şeklini tanımlamak için William ve Warnke (1974) tarafından geliştirilmiş olan kırılma modelini kullanmaktadır. Bu kriter aşağıda gösterilen şekilde ifade edilmiştir:

$$\frac{F}{f_c} - S \geq 0 \quad (1.62)$$

Burada;

F: Asal gerilme durumunun bir fonksiyonu (σ_{xp} , σ_{yp} , σ_{zp})

S: Betonun kırılma yüzeyini tanımlayan beş parametre (f_t , f_c , f_{cb} , f_1 , f_2)

f_c : Tek eksenli basınç dayanımı

σ_{xp} , σ_{yp} , σ_{zp} : Asal gerilmeler

Eğer (1.62) denklemini sağlanmazsa, ezilme ve çatlama meydana gelmeyecektir. Denklem sağlanmazsa ise beton ezilecek ya da çatlacaktır. Eğer tüm gerilmeler basınç ise betonda ezilme meydana gelecektir ancak asal gerilmelerden herhangi biri çekme ise malzeme çatlacaktır.

Hem kırılma yüzeyini hem de ortamdaki hidrostatik gerilme durumunu tanımlamak için toplamda altı parametrenin belirlenmesi gerekmektedir. Bu parametreler Tablo 1.4'de verilmiştir.

Tablo 1.4. Beton malzeme tanım tablosu

Sembol	Açıklama
f_t	Tek eksenli çekme dayanımı
f_c	Tek eksenli basınç dayanımı
f_{cb}	İki eksenli basınç dayanımı
σ_h^a	Ortamdaki hidrostatik gerilme durumu
f_1	Hidrostatik gerilme durumuna (σ_h^a) eklenecek olan iki eksenli basınç durumu için basınç dayanımı
f_2	Hidrostatik gerilme durumuna (σ_h^a) eklenecek olan tek eksenli basınç durumu için basınç dayanımı

Kırılma yüzeyinin en az iki sabit (f_t , f_c) ile de tanımlanması mümkündür. Diğer dört parametre için ANSYS aşağıda verilen değerleri kabul etmektedir:

$$f_{cb} = 1.2f_c \quad (1.63)$$

$$f_1 = 1.45f_c \quad (1.64)$$

$$f_2 = 1.725f_c \quad (1.65)$$

$$|\sigma_h| \leq \sqrt{3}f_c \quad (1.66)$$

$$\sigma_h: \text{Hidrostatik gerilme durumu} = \frac{1}{3}(\sigma_{xp} + \sigma_{yp} + \sigma_{zp})$$

Eğer (1.66) denkleminde verilen hidrostatik gerilme durumu şartı sağlanmazsa, kullanıcının bu parametreleri programa kendisinin tanımlaması gerekmektedir.

Hem F fonksiyonu hem de S kırılma yüzeyi $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ifadeleriyle gösterilen asal gerilme terimleri cinsinden ifade edilir. Bu asal gerilmeler:

$$\sigma_1: \max(\sigma_{xp}, \sigma_{yp}, \sigma_{zp}) \quad (1.67)$$

$$\sigma_3: \min(\sigma_{xp}, \sigma_{yp}, \sigma_{zp}) \quad (1.68)$$

ve $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ tür. Betonun kırılma hali dört grupta toplanabilir:

- | | | |
|----------|---|------------------------|
| 1. Grup: | $0 \geq \sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ | (basınç-basınç-basınç) |
| 2. Grup: | $\sigma_1 \geq 0 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ | (çekme-basınç-basınç) |
| 3. Grup: | $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq 0 \geq \sigma_3$ | (çekme-çekme-basınç) |
| 4. Grup: | $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \geq 0$ | (çekme-çekme-çekme) |

Yukarıda anlatılan Drucker Prager malzeme modeli ve William-Warnke kırılma modeli hakkında daha detaylı bilgiler ANSYS programının yardım menüsünden elde edilebilir.

Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen analizlerde, betonun çekme dayanımı, TS 500 (2000)'de betonun basınç dayanımına bağlı olarak verilen denklem (1.69)'a göre hesaplanmıştır.

$$f_t = 0.35\sqrt{f_c} \quad (1.69)$$

Sonlu eleman analizlerinde kullanılmak üzere gerekli olan betonun Elastisite Modülü, TS 500 (2000)'de normal ağırlıktaki betonlar için verilen denklem (1.70) yardımıyla hesaplanmıştır:

$$E_{cj} = 3250\sqrt{f_{ckj}} + 14000 \quad (1.70)$$

Bu denklemde;

f_{ckj} = "j" günlük betonun karakteristik silindir basınç dayanımıdır.

1.6. Analitik ve Deneysel Dinamik Karakteristiklerin Modal Güvence Kriterine (MGK) Göre Değerlendirilmesi

Bir yapının analitik ve deneysel yöntemlerle elde edilen modlarının doğruluğuna sadece frekans değerlerinin yakınlığına bakılarak karar verilmemektedir. Bunun için modların karşılaştırılması daha doğru bir çözümdür. Modal Güvence Kriteri (MGK), analitik ve deneysel olarak hesaplanan farklı mod şekil vektörlerinin karşılaştırılmasında ya da bir yöntem kullanılarak hesaplanan mod şekil grubunun doğruluğunun kontrol edilmesinde kullanılmaktadır. İki mod şekli arasındaki Modal Güvence Kriteri,

$$MGK(\Psi_a, \Psi_d) = \frac{|\Psi_a^T \Psi_d|^2}{(\Psi_a^T \Psi_a)(\Psi_d^T \Psi_d)} \quad (1.71)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Allemang, 2003; Heylen vd., 2007). Burada; Ψ_a analitik ve Ψ_d deneysel mod şekil vektörlerini göstermektedir. Eğer Ψ_a ve Ψ_d aynı mod şekil vektörleri iseler, MGK birim matris olmalıdır. Eğer Ψ_a ve Ψ_d farklı mod şekil vektörleri iseler, MGK değeri sıfıra yakın olmalıdır.

1.7. Lifli Polimerler

İngilizce'de Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRP) kelimelerinin kısaltılması ile bilinip dilimize Lifli Polimer (LP) olarak geçen bu ifade bir güçlendirme malzemesini

tanımlamaktadır. FRP kompozit güçlendirme uygulamalarının kapsamı oldukça geniştir. Betonarme, beton, tuğla, taş, ahşap, çelik, bacalar bütün yapı elemanlarına dıştan rahatlıkla uygulanan yapısal güçlendirme malzemesidir. FRP sistemleri, karbon, aramid, kevlar, cam ve bazalt gibi yüksek fiziksel özellikleri olan malzemelerden üretilen kompozit sistemlerdir. Çeşitli epoksilerle hafif fakat çok yüksek mekanik dayanımlara sahiptirler. FRP kompozit malzemeler tek ve çift yönlü kumaşlar (fabrik), şeritler (plaka), ankrajlar ve çubuklar olarak üretilebilmektedir.

Karbon fiber çeşitlerinden olan karbon elyaf kumaş, gömlek kumaşı kadar ince bir malzeme olup dünyada bilinen en sağlam malzemelerden biridir. Kumaş inceliğinde olan karbon elyaf, çelikten 14 kat daha gerilmeye dayanıklı olmasının yanında ağırlığı çeliğin beşte biri kadardır. Makasla kesilip yapı elemanlarına uygulandıktan sonra bir çelik levha gibi katılaşmaktadır. Karbon lifli polimerlerle güçlendirilen yapı rijitleşmekte ve depremde zarar görme riski aza inmektedir. Karbon elyaf tüm yapı elemanlarına dıştan rahatlıkla uygulanabilmektedir ve güçlendirilen yapının yüzeyi dışarıdan sıva ile veya alçıpan ile kapatılarak normal bir yüzey görünümüne kavuşturulması da mümkün olmaktadır (Karaşin vd., 2010). Güçlendirme uygulamalarında karbon lifli polimerlerin yanı sıra diğer kullanılan lifler ise aramid ve camdır. Bu liflere ait üstün ve zayıf yönler Tablo 1.5'te verilmiştir.

Tablo 1.5. Farklı türdeki liflerin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları

<u>Avantajları</u>	<u>Dezavantajları</u>
Karbon Lifi	
Sünme direnci mükemmel seviyededir, Termal genişleme katsayısı düşüktür, Düşük yoğunluğa sahiptir, Gerilme modülü yüksektir, Yüksek mukavemete sahiptir, Kimyasal etkilere dayanıklıdır, Düşük elektrik direncine sahiptir (düşük iletkenlik).	Yüksek maliyetlidir, Yırtılma anında düşük ϵ değeri sergiler, Gerilme mukavemetine göre düşük basınç davranışı sergiler, Anizotrop malzemedir, Nemli ortamlarda kullanılması bağ kuvvetini zayıflatabilir.
Cam Lifi	
Düşük maliyetlidir, Darbelere ve gerilmeye karşı yüksek mukavemetlidir, Yırtılma anında yüksek ϵ değerine sahiptir,	Düşük elastisite modülüne sahiptir, Düşük nem direncine sahiptir, Düşük yorulma direncine sahiptir, Lifler aşınmaya karşı hassastır.

Tablo 1.5'in devamı

<u>Avantajları</u>	<u>Dezavantajları</u>
Aramid Lifi Yüksek elastisite modülüne sahiptir, Yüksek mekanik özelliklere sahiptir, Termal direnci gelişmiştir, Mukavemet-ağırlık oranı yüksektir.	Yüksek derece anizotropudur, X doğrultusundaki özellikleri zayıftır, Epoksi reçinesi ile bağ yapamaz, Nemli ortamlarda önerilmez.



2. YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR

2.1. Giriş

Bu tez çalışmasında, hasarsız, hasarlı, onarılmış ve LP kompozit malzemelerle güçlendirilmiş betonarme düzlem çerçeve modelinin dinamik karakteristiklerinde meydana gelen değişimlerin ve yapısal davranışlarının deneysel ve analitik yöntemler kullanılarak belirlenmesi amaçlanmaktadır. Uygulama olarak, iki katlı ve iki açıklıklı betonarme düzlem çerçeve modeli laboratuvar ortamında inşa edilmiş olup, model üzerinde gerekli deneysel ve analitik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda yapılan çalışmalar, başlıca iki kısımda incelenmiştir.

2.2. Deneysel Çalışmalar

Tez çalışması kapsamında, Günaydın (2016) tarafından doktora tezi çalışmaları sırasında inşa edilen üç boyutlu çerçeve betonarme bina modeli, ara kirişlerin iptal edilmesi sonucunda düzlem çerçeve şeklinde kullanılmıştır. İnşa edilen betonarme model, düşük beton dayanımı, yetersiz sargı donatısı ve kanca payı, birleşim bölgelerinde donatı sıklaştırması yapılmaması, kiriş donatısı kenetlenme boylarının yetersiz olması gibi ülkemiz genelindeki mevcut yapı stoğu özelliklerini taşımaktadır. Betonarme düzlem çerçeve modelinin dinamik karakteristiklerinde, hasar, onarım ve güçlendirme ile meydana gelen değişimler deneysel olarak incelenmiştir. Modele laboratuvar ortamında kademeli olarak hasar verilmiş olup, sonrasında da onarılmış ve kompozit malzemeler kullanılarak güçlendirilmiştir. Onarım ve güçlendirmenin dinamik karakteristiklere etkisi sadece deneysel olarak irdelenmiştir.

2.2.1. Betonarme Düzlem Çerçeve Modelinin Geometrik Özellikleri

Çalışma kapsamında; daha önce laboratuvar ortamında inşa edilmiş ve mevcut olan iki katlı, boyuna doğrultuda iki açıklıklı, enine doğrultuda tek açıklıklı, 1/2 geometrik ölçekli (malzeme yönünden ölçeklendirme yapılmamıştır) betonarme bina modeli üzerinde

2.2.2. Betonarme Düzlem Çerçeve Modelinin Malzeme Özellikleri

Daha önce laboratuvar ortamında inşa edilmiş ve sonrasında iki adet çerçeveye dönüştürülmüş olan betonarme modelin tasarımında ülkemizdeki yapı stokunun genelini temsil etmesi açısından düşük dayanımlı beton kullanılması hedeflenmiştir. Bu nedenle C16/20 MPa dayanıma sahip beton kullanılmıştır. Hazır beton tesisinde üretilen betona ait malzeme karışım miktarları Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1. Çerçeve modelinin inşasında kullanılan malzeme karışım miktarları

Bileşen	Temel Betonu	Kolon-Kiriş Betonu
Agrega (15-25 mm)	442 kg/m ³	435 kg/m ³
Agrega (7-15 mm)	373 kg/m ³	335 kg/m ³
Agrega (0-7 mm)	1107 kg/m ³	1177 kg/m ³
Çimento (Ç)	250 kg/m ³	220 kg/m ³
Su (S)	220 kg/m ³	190 kg/m ³
S/Ç	0.88	0.86
Toplam	2392 kg/m ³	2377 kg/m ³

2.2.3. Betonarme Düzlem Çerçeve Modelinin İnşa Detayları

Tez çalışması kapsamında, Günaydın (2016) tarafından doktora tezi çalışmaları sırasında inşa edilen üç boyutlu çerçeve betonarme bina modeli, ara kirişlerin iptal edilmesi sonucunda düzlem çerçeve şeklinde kullanılmıştır. Model çerçevenin temeli 300x200 cm² boyutlarında ve 30 cm yüksekliğinde, alt ve üst tarafta ızgara donatısı olacak şekilde radye temel sisteminde inşa edilmiştir. Temel donatısı olarak boyuna ve enine doğrultuda $\phi 10/20$ kullanılarak alt ve üst ızgara şeklinde donatı kafesi oluşturulmuştur. Temel inşasında 2.5 cm’lik paspayı dikkate alınmıştır.

Çerçeve modeli için kolon boyutları 20/15 cm ve 15/20 cm olarak seçilmiştir. Kolon yükseklikleri temel üst seviyesinden kiriş alt seviyesine kadar 150 cm’dir. Kolon elemanlar için paspayı 2.5 cm’dir. Bütün kolonlarda 4 $\phi 10$ nervürlü boyuna donatı ve $\phi 8/25$ nervürlü enine donatı kullanılmıştır. Kolon-kiriş birleşim noktalarında etriye sıklaştırılması yapılmamıştır. Bütün kirişler 15/20 cm boyutlarında inşa edilmiştir. Bütün kirişlerde boyuna donatı olarak altta ve üstte 2 $\phi 10$ ’luk nervürlü donatılar kullanılmıştır. Kolon-kiriş birleşim bölgelerinde donatı sıklaştırılması yapılmamıştır. Kirişlerde enine donatı olarak 8



Şekil 2.3. Betonarme bina modeli



Şekil 2.4. Betonarme düzlem çerçeve modeli

2.3. Deneysel Çalışmalar

2.3.1. Çevresel Titreşim Yöntemiyle (ÇTY) Hasarsız Durumdaki Betonarme Düzlem Çerçeve Modelinin Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

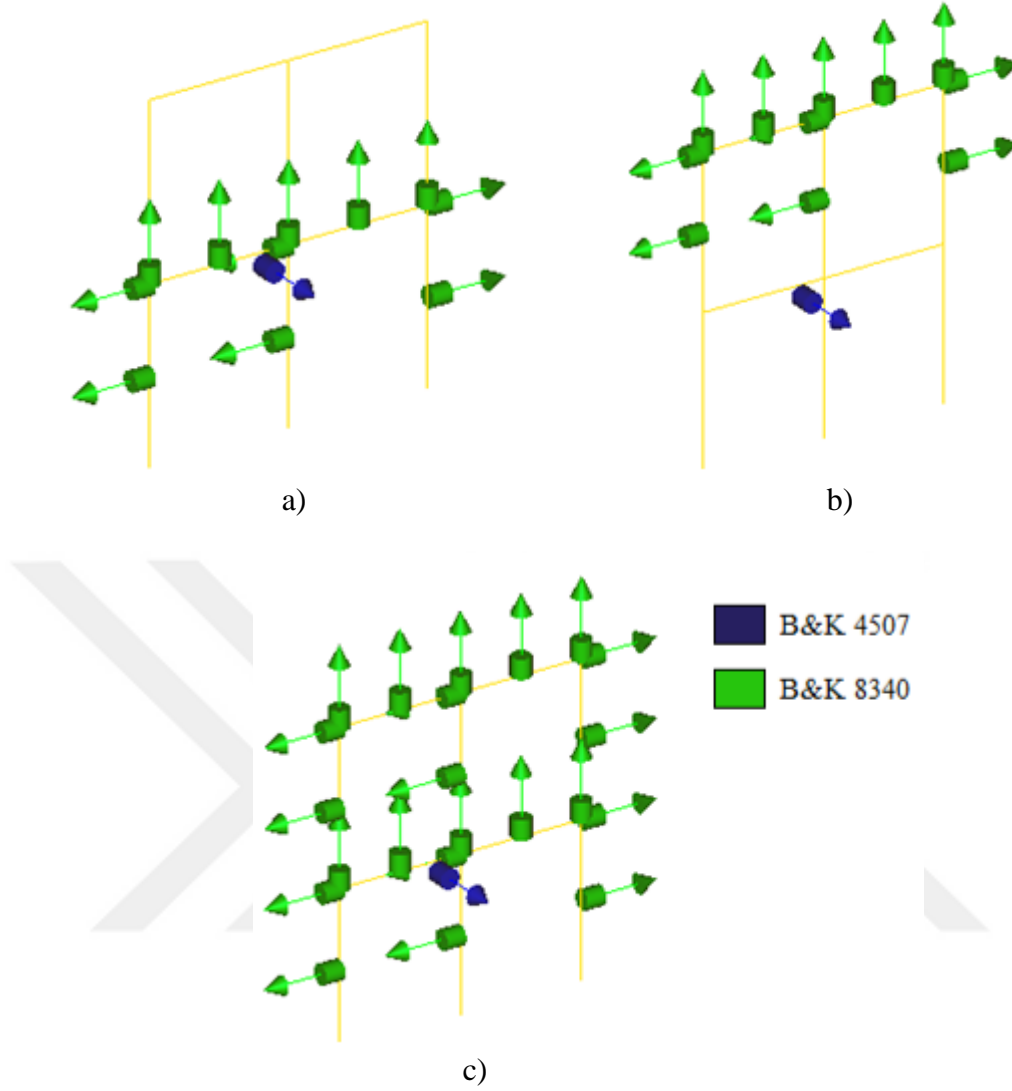
Çalışma kapsamında model çerçevenin dinamik karakteristikleri Çevresel Titreşim Yöntemi (ÇTY) ile elde edilmiştir. Çerçeve modelinin dinamik karakteristiklerinin çevresel titreşim testleri uygulanarak elde edilmesinde Operasyonel Modal Analiz (OMA) yazılımı kullanılmıştır. Çerçeve modelinin çevresel titreşim testlerinde 11 tane B&K 8340 tipi ve 1 tane B&K 4507 tipi tek eksenli ivmeölçer, B&K 3560 tipi 17 kanallı veri toplama ünitesi, PULSE (2006) ve OMA (2006) yazılımları kullanılmıştır. Laboratuvar ortamındaki çerçeve modelinin deneysel ölçümlerinde rüzgar, taşıt gibi çevresel etkiler bulunmadığından çerçeveyi titreştirmek için B&K 8210 tipi darbe çekici kullanılmıştır. Kullanılan bu darbe çekici esasında zorlanmış titreşim testlerinde kullanılmasına karşın veri toplama ünitesine tanıtılmadığından modele verdiği etki ölçülemeyen doğal bir etki gibi dikkate alınmıştır. Titreşimler sonucunda ivmeölçerlerden elde edilen sinyaller B&K 3560 tipi 17 kanallı veri toplama ünitesinde birleştirilerek PULSE yazılımına aktarılmış ve sonrasında sinyaller OMA yazılımına aktarılarak işlenmiş, çerçevenin doğal frekansları, mod şekilleri ve sönüm oranları elde edilmiştir.

Dinamik karakteristiklerin deneysel olarak doğru bir şekilde belirlenmesinde ölçümlerin yapının hangi noktalarından alınacağı çok önemlidir. Bu nedenle çerçeve

modelinin sonlu eleman modeli ANSYS programında oluşturularak modal analizi yapılmış ve çerçevenin hangi noktalarda salınım yaptığı belirlenmiştir. Buna göre kolonların orta noktalarına yatayda, kolon-kiriş düğüm noktalarına hem yatayda hem düşeyde, kiriş ortalarına düşeyde ivmeölçerler bağlanmasına karar verilmiştir. Bu amaçla belirlenen noktalara dübeller (6 metrik çelik dübel) çakılmış ve 11 adet ivmeölçer yerleştirilmiştir. Referanslı ölçüm alınacağından 1 adet de referans ivmeölçeri yapıştırılmıştır. Betonarme çerçeve modeli üzerinde gerçekleştirilen çevresel titreşim testlerine dair bazı fotoğraflar Şekil 2.5'te verilmiştir. Çerçeve modeli için PULSE yazılımında oluşturulan temsili model ve ivmeölçer yerleşim düzeni Şekil 2.6'da verilmektedir. Referanslı ölçüm alınacağından ivmeölçerler önce ikinci kata yerleştirilmiş ardından bu ölçüm tamamlandığında ivmeölçerlerin yerleşim sırası değiştirilmeden aynı şekilde alt kata taşınmıştır.



Şekil 2.5. Deneysel ölçümler için ivmeölçer bağlantı noktalarının hazırlanması



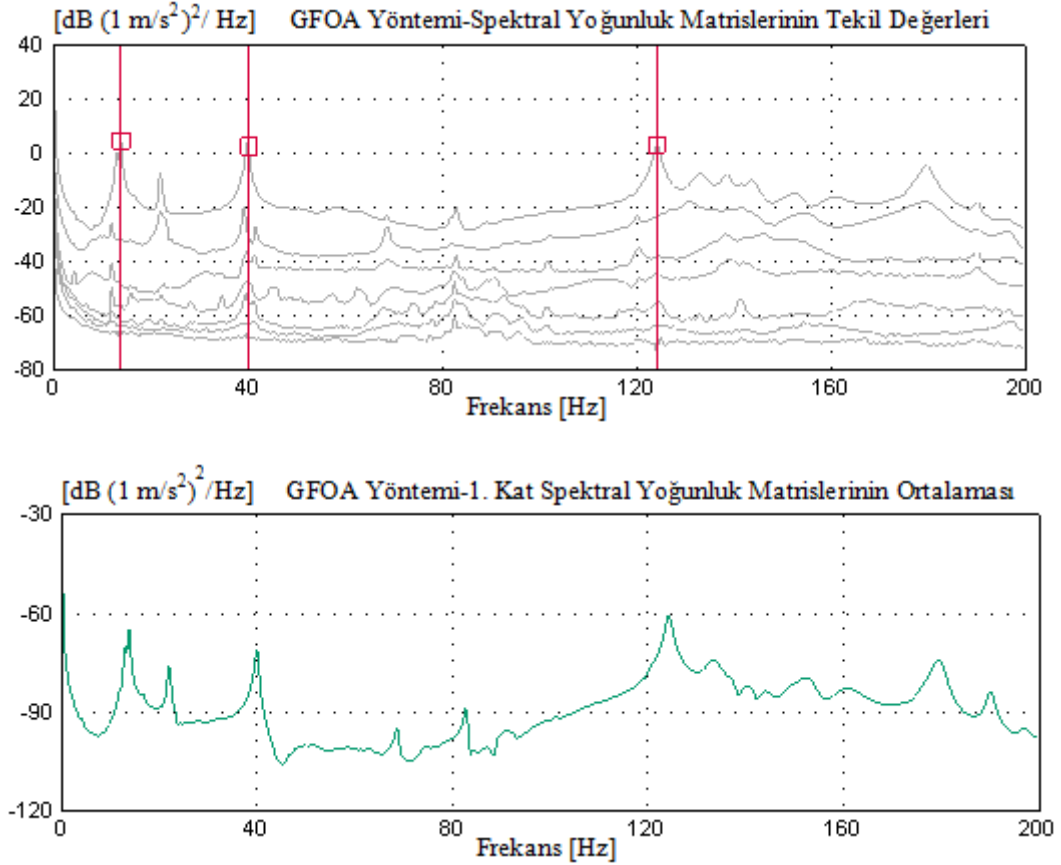
Şekil 2.6. Çevresel titreşim testlerinde kullanılan ivmeölçer yönleri ve yerleşim planı

Çevresel titreşim testlerinde, ivmeölçerlerle veri toplama ünitesi arasındaki sinyal transferi tek eksenli sinyal kabloları ile sağlanmıştır. Veri toplama ünitesine alınan ham sinyalleri bilgisayar ortamına göndermek için veri toplama ünitesi ile bilgisayar arasında bağlantı kablosu kullanılmış ve PULSE (2006) yazılımı ile ham sinyaller işlenebilir hale getirilmiştir. PULSE (2006) yazılımındaki sinyaller OMA (2006) yazılımına aktarılarak işlenmiştir. İşlenen sinyaller Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma (GFOA) ve Stokastik Altalan Belirleme (SAB) Yöntemleri'ne göre ayırıştırılarak çerçeve modelinin doğal frekansları, mod şekilleri ve sönüm oranları yani dinamik karakteristikleri belirlenmiştir. GFOA yönteminde dinamik karakteristikler OMA yazılımında elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerlerindeki piklerin seçilmesiyle elde

edilmektedir. Tekil değerler spektral yoğunluk fonksiyonlarının ayrıştırılması ile elde edilmektedir.

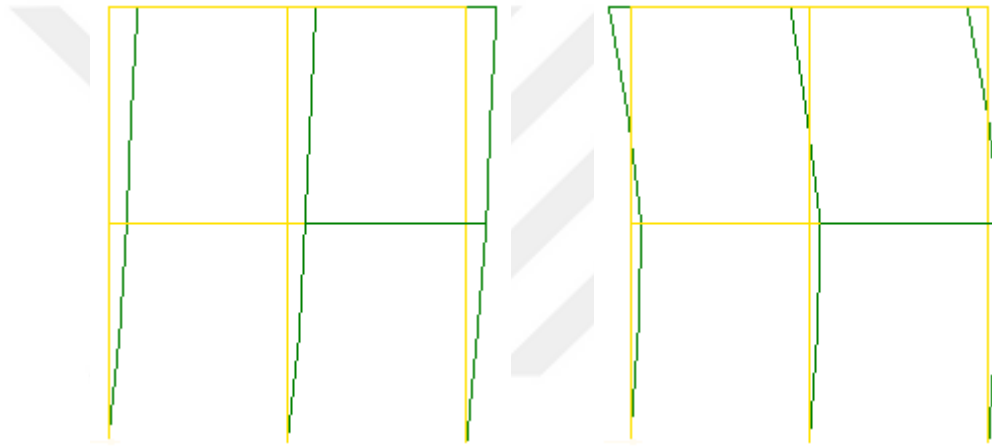
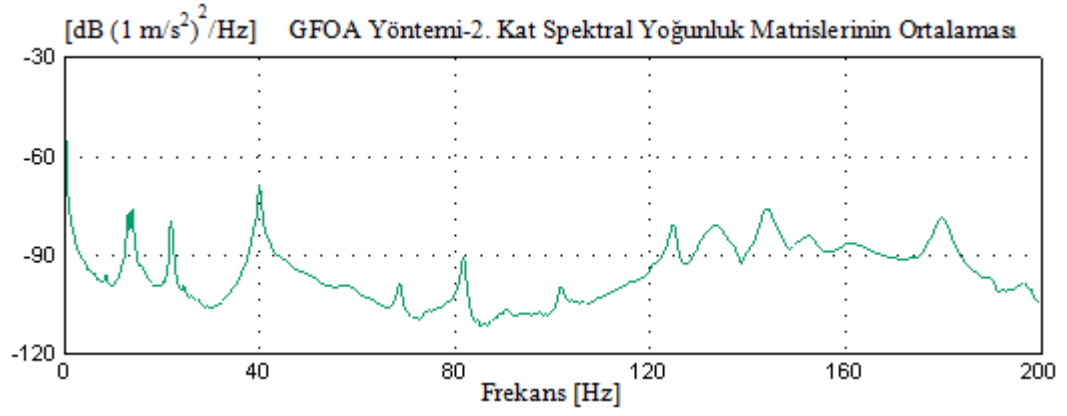
Çevresel titreşim testlerinde frekans aralığı sonlu eleman modelinden elde edilen doğal frekanslara göre 0-200 Hz aralığında seçilmiş ve ölçüm süresi tüm modellerde 20 dk alınmıştır. Referans ivmeölçer ile birlikte toplamda 12 adet ivmeölçer kullanılmıştır.

Çerçeve modeli için çevresel titreşim testlerinden toplanan sinyallerin GFOA yöntemine göre ayrıştırılması sonucu elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri ve bu matrislerin ortalaması Şekil 2.7’de verilmektedir. Şekil 2.7’de görülen sinyallerin pik yapan değerlerinin her biri yapısal moda karşılık gelmektedir. Bu piklerin seçilmesiyle çerçevenin doğal frekansları ve sönüm oranları hesaplanmaktadır. Çalışmada dinamik karakteristikler ilk üç mod için elde edilmiştir. Çerçeve modeli için çevresel titreşim testlerinden elde edilen ilk üç mod şekli Şekil 2.8’de verilmektedir.



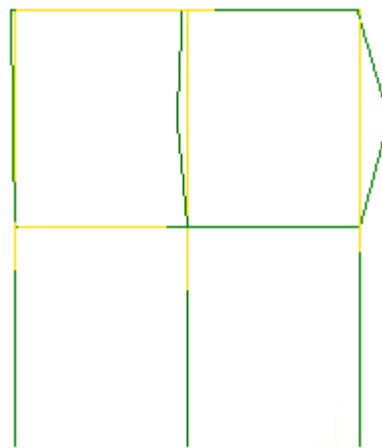
Şekil 2.7. Çerçeve modeli için elde edilen spektral yoğunluk matrisleri

Şekil 2.7'nin devamı



1. Mod

2. Mod



3. Mod

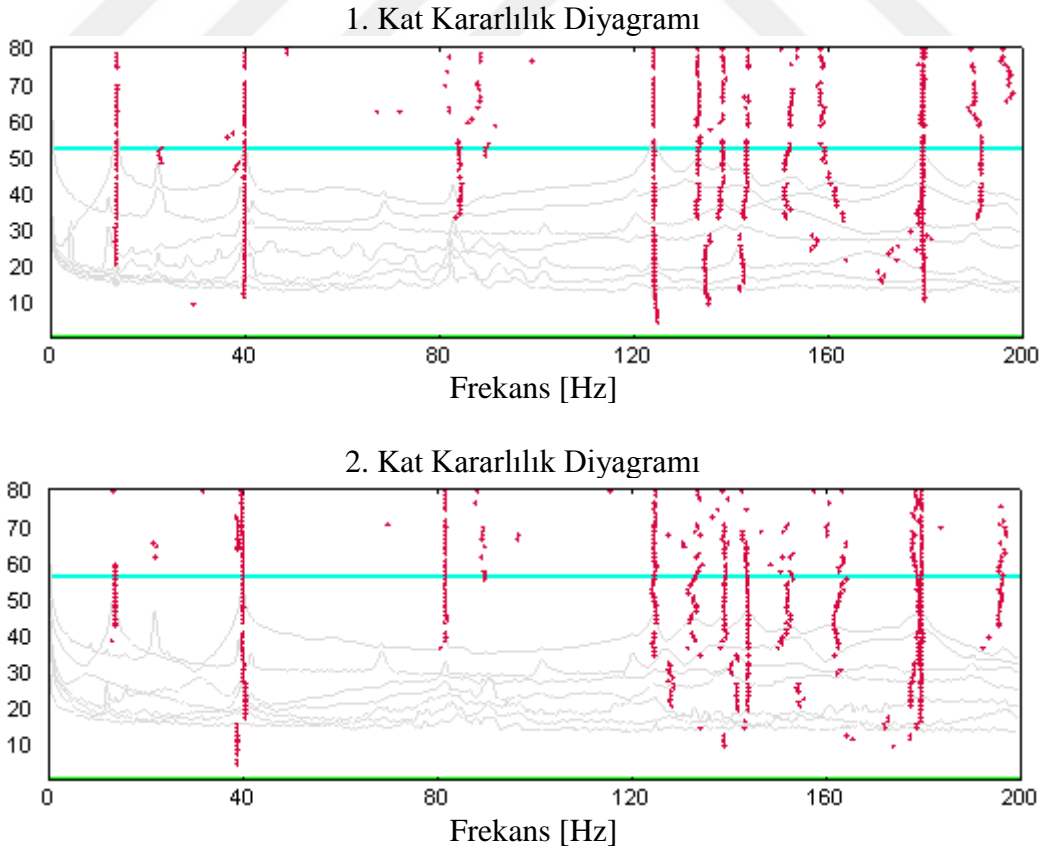
Şekil 2.8. Çerçeve modeli için GFOA yöntemine göre elde edilen mod şekilleri

Çerçeve modeli için GFOA yöntemine göre elde edilen doğal frekanslar Tablo 2.2’de verilmektedir. Tablo 2.2’de görüldüğü gibi çerçeve modeli için ilk üç doğal frekans 13.898-123.84 Hz arasında elde edilmiştir.

Tablo 2.2. Çerçeve modeli için GFOA yöntemine göre elde edilen dinamik karakteristikler

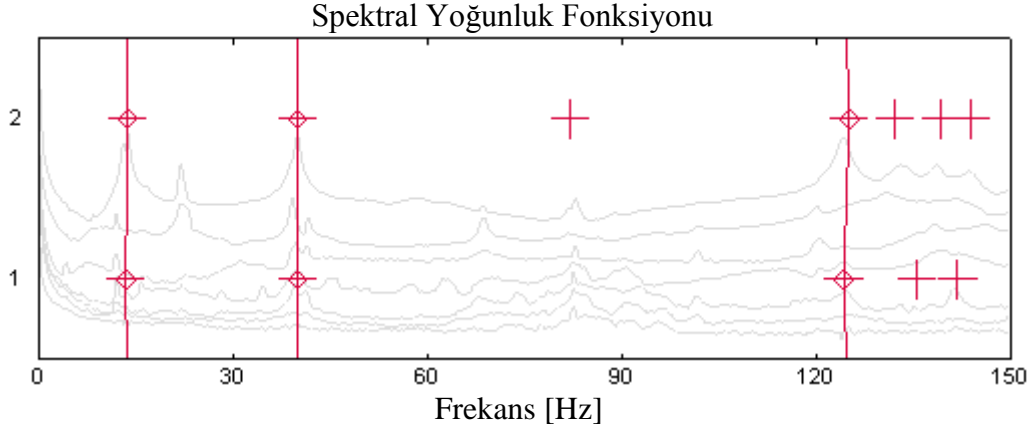
Mod	Frekans (Hz)	Sönüm Oranı (%)
1	13.898	1.022
2	39.907	0.613
3	123.84	0.451

SAB yöntemi kullanılarak çerçeve modeli için elde edilen kararlılık diyagramı ve spektral yoğunluk fonksiyonu grafikleri Şekil 2.9’da verilmektedir. Şekil 2.9’da genellikle sinyallerin pik yaptığı noktalarda düşey yönlü ince bir çizgi oluşturan kısımlar yapısal modlara karşılık gelmektedir. Bu kısımların seçilmesiyle sistemin doğal frekansları elde edilmektedir.

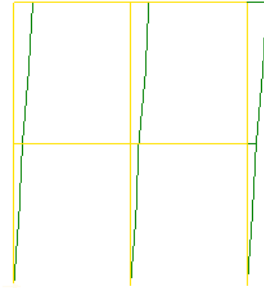


Şekil 2.9. Çerçeve modeli kararlılık ve spektral yoğunluk fonksiyonu diyagramları

Şekil 2.9'un devamı



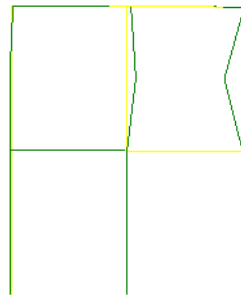
Referanslı ölçüm alındığından iki ölçümden elde edilen veriler harmonize edilerek esas karakteristikler belirlenmektedir. Çerçeve modeli için SAB yöntemi kullanılarak elde edilen ilk üç mod şekli Şekil 2.10'da verilmektedir. SAB yöntemi ile hesaplanan ilk üç moda ait doğal frekanslar Tablo 2.3'de verilmektedir. İlk üç moda ait doğal frekanslar 13.69-124.7 Hz arasında elde edilmiştir.



1. Mod



2. Mod



3. Mod

Şekil 2.10. Çerçeve modeli için SAB yöntemine göre elde edilen mod şekilleri

Tablo 2.3. Çerçeve modeli için SAB yöntemine göre elde edilen dinamik karakteristikler

Mod	Frekans (Hz)	Sönüm Oranı (%)
1	13.69	0.859
2	39.93	0.432
3	124.7	0.680

2.3.2. Çevresel Titreşim Yöntemiyle (ÇTY) Hasarlı Durumdaki Betonarme Düzlem Çerçeve Modelinin Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

Yapılardaki hasarlar, proje, inşa ve işletme aşamasında yapılan bazı kabüller, hatalar, zamanla veya aniden meydana gelen etkiler sebebiyle oluşabilmektedir. Bu etkilerin başında da depremler gelmektedir. Yapıları depreme dayanıklı olarak tasarlamaktaki amaç; yapının kullanım ömrü boyunca maruz kaldığı en şiddetli depremde göçmeden ayakta kalabilmesi yani can güvenliğinin sağlanmasıdır. Ancak yapıların şiddetli depremlere maruz kalma olasılığı oldukça düşüktür. Bu nedenle yapıların şiddetli depremlerde hasar görmeyecek şekilde tasarlanması ekonomik değildir. Yapılar projelendirilirken şiddetli depremlerde hasar göreceği önceden kabul edilerek tasarlanır. Ancak oluşacak hasarların sınırlı düzeyde kalacak olması planlanır. TDY 2007’de yapılacak binaların depreme dayanıklı tasarımının ana ilkesi; hafif şiddetteki depremlerde binalardaki yapısal ve yapısal olmayan sistem elemanlarının herhangi bir hasar görmemesi, orta şiddetteki depremlerde yapısal ve yapısal olmayan elemanlarda oluşabilecek hasarın sınırlı ve onarılabilir düzeyde kalması, şiddetli depremlerde ise can güvenliğinin sağlanması ile kalıcı yapısal hasar oluşumunun sınırlandırılmasıdır. Deprem yapı davranışında değişimlere sebep olduğundan deprem sonrası binaların dinamik davranışlarındaki değişim incelenmelidir. İlk bölümde de belirtildiği gibi, DMA yöntemi ile yapıların dinamik karakteristikleri etkili bir şekilde belirlenebilmektedir.

Bu tez çalışmasında betonarme düzlem çerçeve modeline verilecek hasarla ayrıca onarım ve güçlendirme ile dinamik davranışlardaki değişim deneysel olarak inceleneceğinden modelin kolon-kiriş birleşim bölgelerine hasar verilmiş ve sonrasında hem onarılmış hem de güçlendirilmiştir. DMA yöntemi kullanılarak hasarlı, onarılmış, güçlendirilmiş durumlara ait dinamik karakteristikler elde edilmiş ve davranıştaki değişimler ortaya koyulmuştur.

Hasarsız durumda olan betonarme düzlem çerçeve modelinin deneysel titreşim ölçümlerinin alınmasının ardından, modele kolon-kiriş birleşim bölgelerinden hasarlar verilmiş ve ince çatlakların oluşması sağlanmıştır. Hedeflenen hasar verildikten sonra DMA yoluyla hasarlı duruma ait deneysel titreşim ölçümleri alınarak dinamik karakteristikler elde edilmiş olup, hasarsız durumla karşılaştırılarak elde edilen değişimler ortaya konulmuştur.

Çerçeve modeli üzerinde kolon-kiriş birleşim bölgelerine uygulanan darbe etkileriyle birlikte hasarlar oluşturulmaya çalışılmış ve gözle görülebilir kılcal ve belirgin çatlaklar elde edilmiştir. Çerçeve modeli üzerinde darbe etkisiyle birlikte oluşturulan hasarlara ait bazı fotoğraflar Şekil 2.11’de verilmektedir. Şekil 2.11’den de görüldüğü gibi kolon-kiriş birleşim bölgelerinde belirgin çatlaklar oluşmuştur. Kolon-kiriş birleşim bölgelerinin dış yüzeylerinde çatlaklar çapraz şekilde oluşurken iç yüzeylerinde çatlaklar kolon eksenlerine paralel doğrultuda oluşmuştur.



Şekil 2.11. Çerçeve modelinin hasar durumuna ait bazı fotoğraflar

Şekil 2.11'in devamı



Çerçeve modelinin hasar durumu için çevresel titreşim testleri Bölüm 2.3.1'de tarif edildiği gibi gerçekleştirilmiştir. Çevresel titreşim testleri esnasında ölçüm aralığı 0-200 Hz, ölçüm süresi ilk ve ikinci ölçüm için 10'ar dakika olmak üzere toplamda 20 dakikadır. Şekil 2.12'de betonarme çerçeve modeli üzerinde gerçekleştirilen çevresel titreşim testlerinden bazı fotoğraflar görülmektedir.



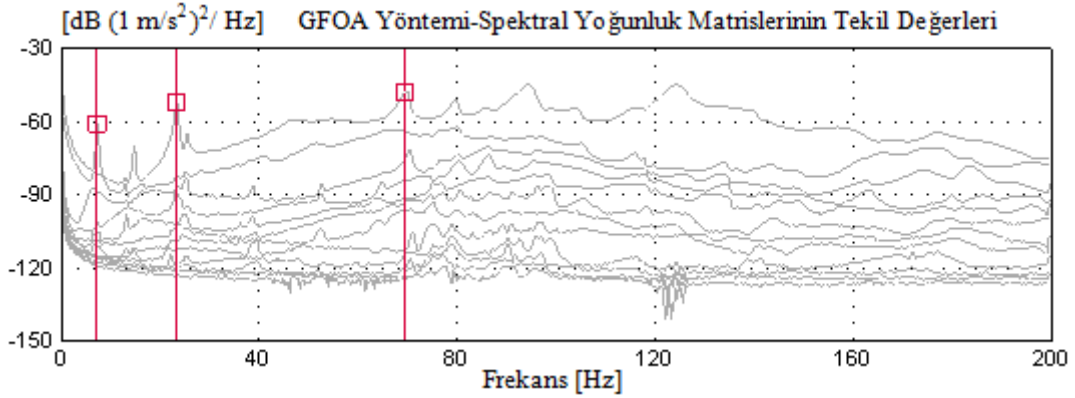
Şekil 2.12. Hasarlı betonarme düzlem çerçeve modeli üzerinde gerçekleştirilen ölçümlere ait bazı fotoğraflar

Çerçeve modelinin hasarlı durumu için; çevresel titreşim testlerinden elde edilen sinyallerin GFOA yöntemine göre ayrıştırılması sonucu elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri ve bu matrislerin ortalaması Şekil 2.13'te verilmektedir. Çerçeve modelinin hasarlı durumu için; çevresel titreşim testlerinden elde edilen ilk üç mod şekli Şekil 2.14'te verilmektedir.

Stokastik Altalan Belirleme (SAB) yöntemi kullanılarak çerçeve modelinin hasarlı durumu için elde edilen kararlılık diyagramı ve spektral yoğunluk fonksiyonu grafikleri Şekil 2.15'te verilmektedir. Çerçeve modelinin hasarlı durumu için SAB yöntemi kullanılarak elde edilen ilk üç mod şekli Şekil 2.16'da verilmektedir. SAB yönteminde ilk mod gürültü modu olarak elde edilmiştir.

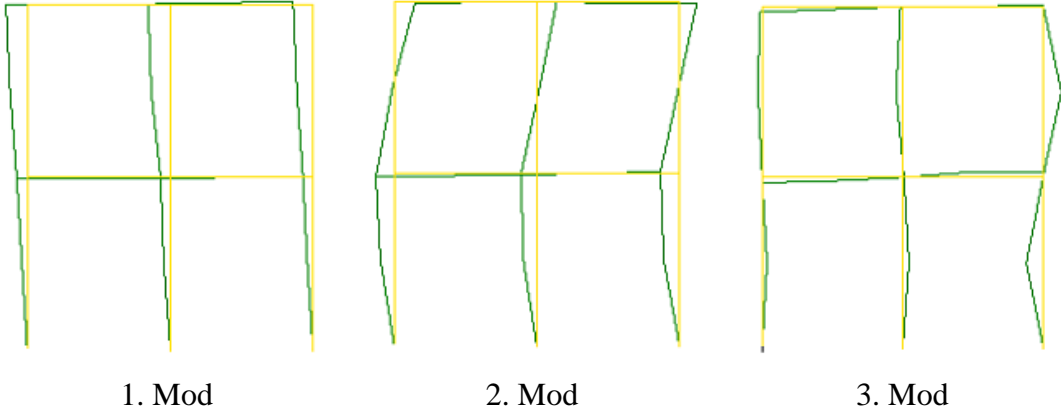
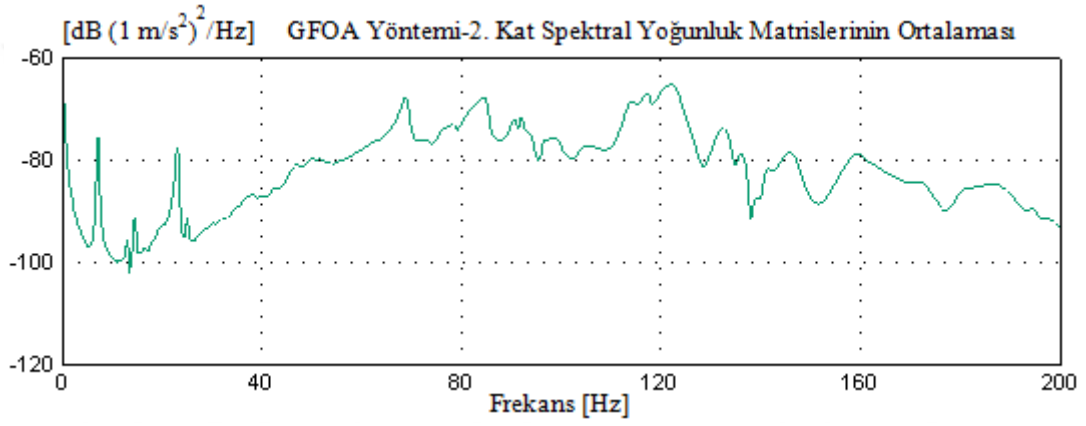
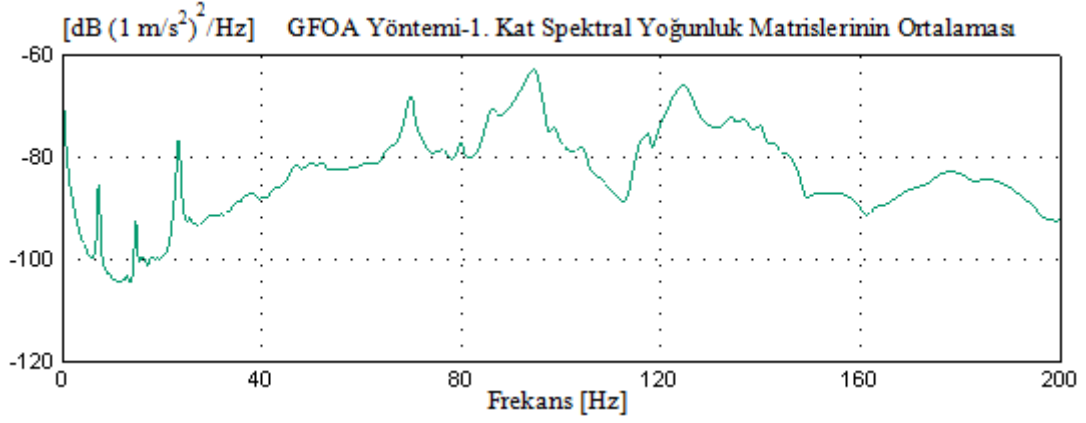
Çerçeve modelinin hasarlı durumu için GFOA yöntemine göre elde edilen doğal frekanslar Tablo 2.4'te verilmektedir. Tablo 2.4'te görüldüğü üzere çerçeve modelinin hasarlı durumu için ilk üç doğal frekans GFOA yönteminde 7.269-69.293 Hz arasında elde edilmiştir.

Çerçeve modelinin hasarlı durumu için SAB yöntemine göre elde edilen doğal frekanslar Tablo 2.4'te verilmektedir. Tablo 2.4'te görüldüğü üzere çerçeve modelinin hasarlı durumu için ilk üç doğal frekans SAB yönteminde 4.441-62.65 Hz arasında elde edilmiştir.

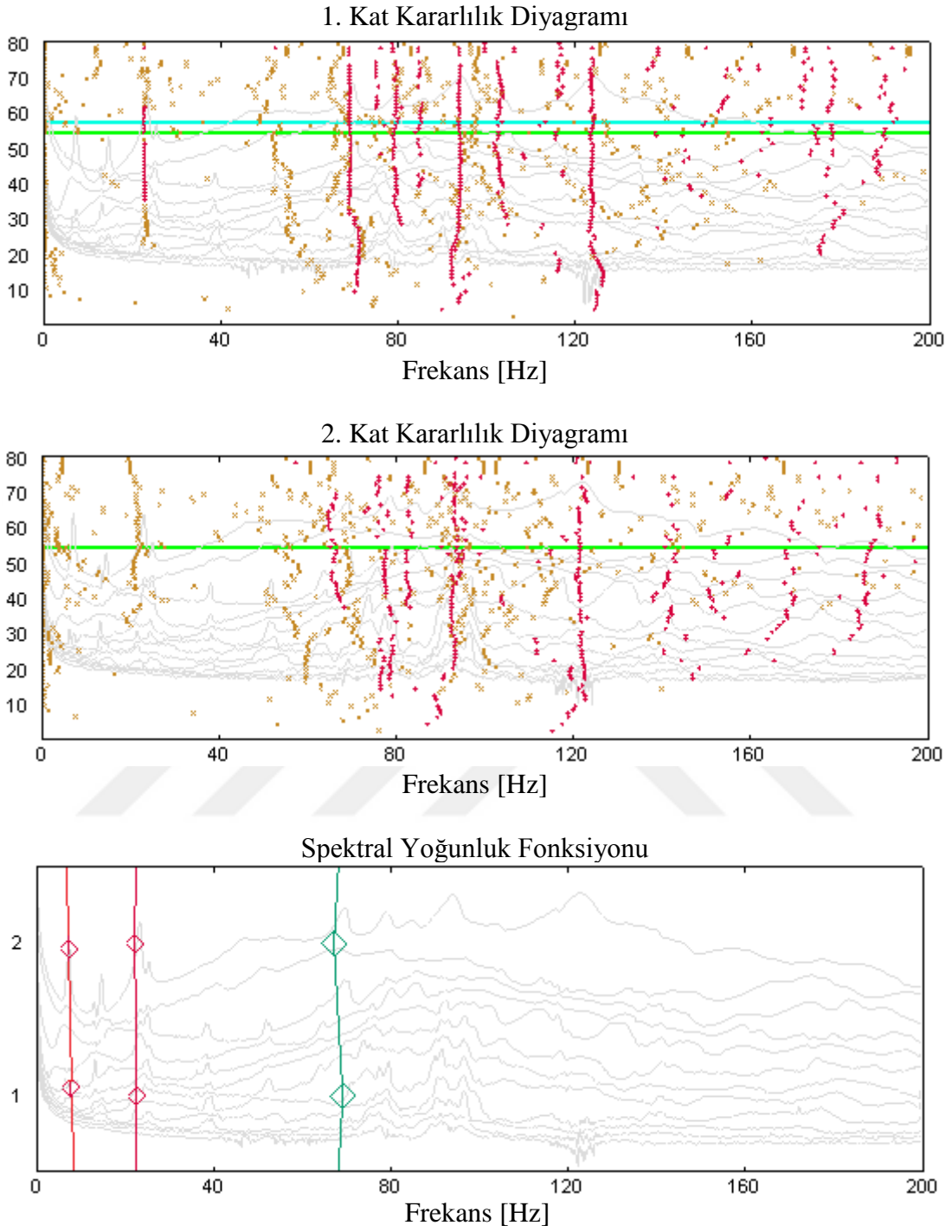


Şekil 2.13. Çerçeve modelinin hasarlı durumu için elde edilen spektral yoğunluk matrisleri

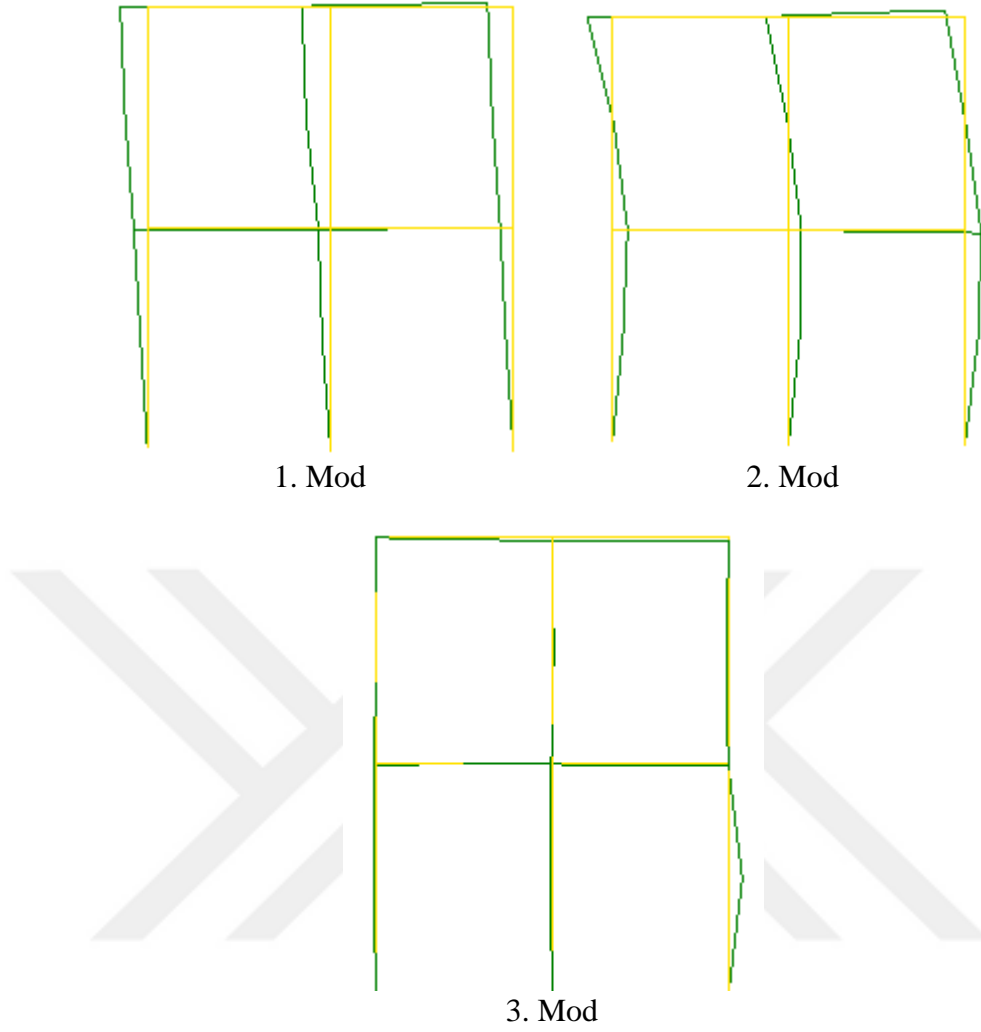
Şekil 2.13'ün devamı



Şekil 2.14. Çerçeve modelinin hasarlı durumu için GFOA yöntemine göre elde edilen mod şekilleri



Şekil 2.15. Çerçeve modelinin hasarlı durumu için kararlılık ve spektral yoğunluk fonksiyonu diyagramları



Şekil 2.16. Çerçeve modelinin hasarlı durumu için SAB yöntemine göre elde edilen mod şekilleri

Tablo 2.4. Çerçeve modelinin hasarlı durumuna ait GFOA ve SAB yöntemlerine göre elde edilen doğal frekansları

Mod	Frekans (Hz)		Sönüm Oranı (%)	
	GFOA	SAB	GFOA	SAB
1	7.269	4.441	2.28	15.32
2	23.263	23.6	0.985	9.463
3	69.293	62.65	0.686	6.887

Tablo 2.5'te betonarme düzlem çerçeve modeline ait hasarsız ve hasarlı durumlar için gerçekleştirilen deneysel modal analiz sonucu elde edilen frekans değerleri karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Tablo 2.5'te görüldüğü üzere çerçeveye hasar verilmesi durumunda frekansların düştüğü gözlenmektedir. GFOA ve SAB yöntemlerine

göre elde edilen frekans değerleri arasındaki en büyük fark sırasıyla %47.70 ve %65.56 olarak elde edilmiştir.

Tablo 2.5. Betonarme çerçeve sistemine ait hasarsız ve hasarlı durumlar için deneysel olarak elde edilen frekansların karşılaştırılması

Mod	Frekans (Hz)					
	GFOA			SAB		
	Hasarsız	Fark(%)	Hasarlı	Hasarsız	Fark(%)	Hasarlı
1	13.898	-47.70	7.269	13.69	-65.56	4.441
2	39.907	-41.71	23.263	39.93	-40.89	23.6
3	123.84	-44.04	69.293	124.7	-49.76	62.65

2.3.3. Çevresel Titreşim Yöntemiyle (ÇTY) Onarılmış Durumdaki Betonarme Düzlem Çerçeve Modelinin Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

Hasarlı durumdaki betonarme düzlem çerçeve modelinin ölçümlerinin alınmasının ardından model onarılarak çatlaklar kapatılmıştır. DMA yoluyla onarılmış duruma ait ölçümler gerçekleştirilmiş ve dinamik karakteristikler elde edilmiş olup, hasarlı durumla karşılaştırılarak elde edilen değişimler ortaya konulmuştur.

Çerçeve modelinin kolon-kiriş birleşim bölgelerine kademeli olarak uygulanan darbe etkisiyle oluşturulan çatlaklar önceden işaretlenmiştir. Bu çatlakların doldurularak kapatılması amacıyla epoksi enjeksiyonu uygulanmıştır. Enjeksiyon uygulamasında iki bileşenli enjeksiyon malzemesi (Concresive 1302) kullanılmıştır. Concresive 1302 enjeksiyon malzemesine ait bazı teknik özellikler Tablo 2.6'da verilmiştir. Enjeksiyon uygulamasından önce çerçeve üzerindeki toz tabaka tel fırça yardımıyla temizlenmiştir. Enjeksiyon uygulamasında işaretlenen çatlak bölgelerine matkap ile delikler açılmış ve deliklere enjeksiyon pakerleri (10x60 mm) çakılarak pakerler sıkıştırılmıştır. Sonrasında enjeksiyon malzemesi pompa yardımıyla basınç ayarlanarak pakerlerden çatlaklara enjekte edilmiştir. İletim hortumunun takıldığı paker enjeksiyon görevini; epoksi malzemesinin diğer paker veya çatlaktan dışarı akmasıyla tamamlamıştır. Uygulanan epoksi enjeksiyonuna ait bazı fotoğraflar Şekil 2.17'de verilmiştir.



a) Enjeksiyon paker deliklerinin açılması



b) Pakerlerin deliklere çakılması ve sıkıştırılması



c) Enjeksiyon malzemesinin basınç ile pakerlerden çatlaklara enjekte edilmesi

Şekil 2.17. Çerçeve modelinin enjeksiyon uygulamasına ait bazı fotoğraflar

Tablo 2.6. Concreative 1302 epoksi enjeksiyon malzemesine ait bazı teknik özellikler

Malzemenin Yapısı	
Concreative 1302 Bileşen A	Epoksi Reçine
Concreative 1302 Bileşen B	Epoksi Sertleştirici
Karışım Yoğunluğu	1.06±0.05 kg/litre
Viskozite	200-350 N/mm ² .s
Yapışma Dayanımı (Betona) (7 gün)	>2.0 N/mm ²
Uygulama Kalınlığı	Minimum 0.2 mm-Maksimum 1.0 mm
Kullanma Süresi	25 dakika
Tam Kürleme Süresi	7 gün

Çerçeve modelinin çevresel titreşim testi, enjeksiyon uygulamasından 7 gün sonra enjeksiyon malzemesinin kürünü tamamlamasıyla gerçekleştirilmiştir. Çevresel titreşim testi için ölçüm aralığı 0-200 Hz, ölçüm süresi ise ilk ve ikinci kat için 10 dk olmak üzere toplam 20 dakika olarak dikkate alınmıştır. Gerçekleştirilen çevresel titreşim testlerine ait bazı fotoğraflar Şekil 2.18’de verilmektedir.

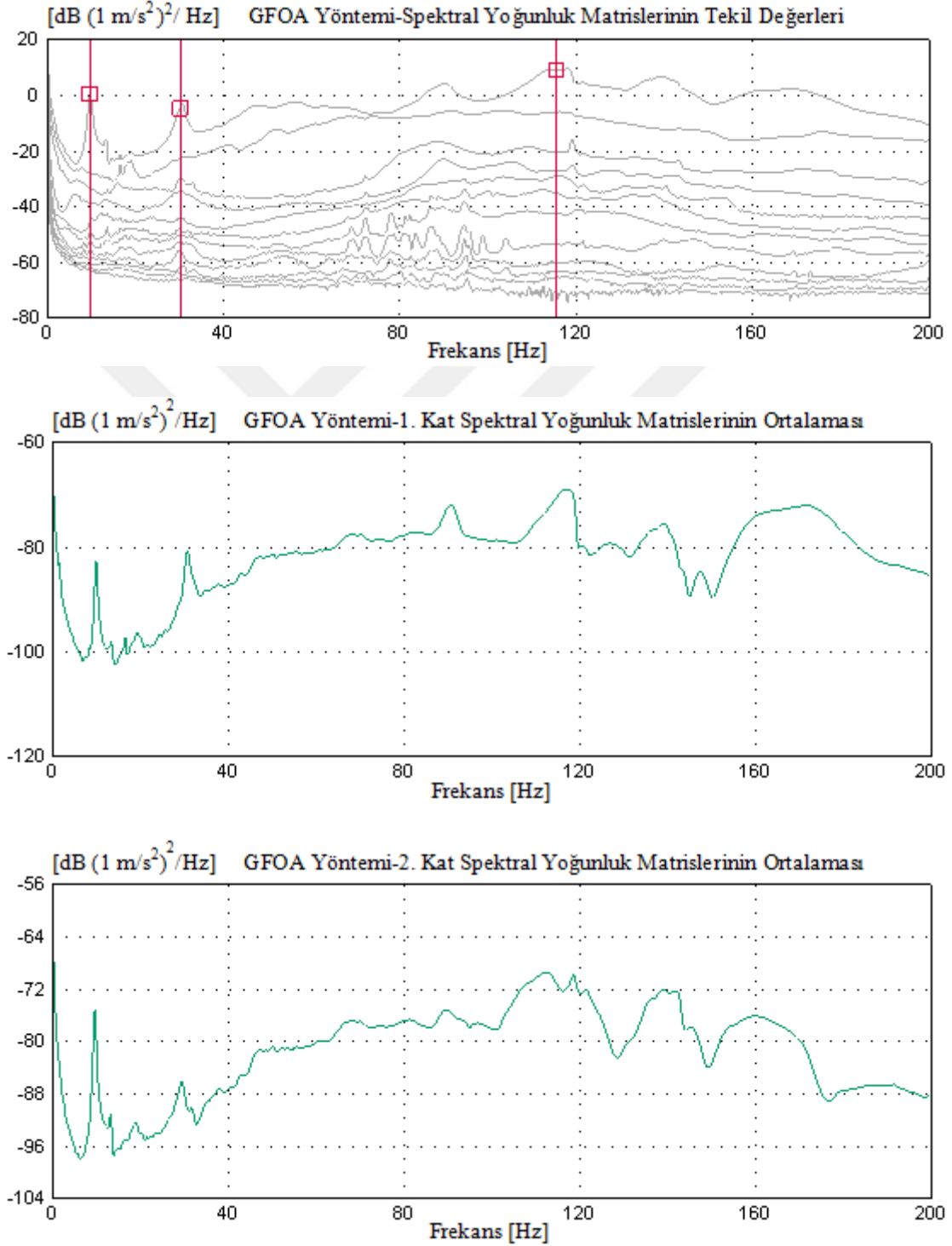


Şekil 2.18. Onarılmış betonarme çerçeve modeli üzerinde gerçekleştirilen ölçümlere ait bazı fotoğraflar

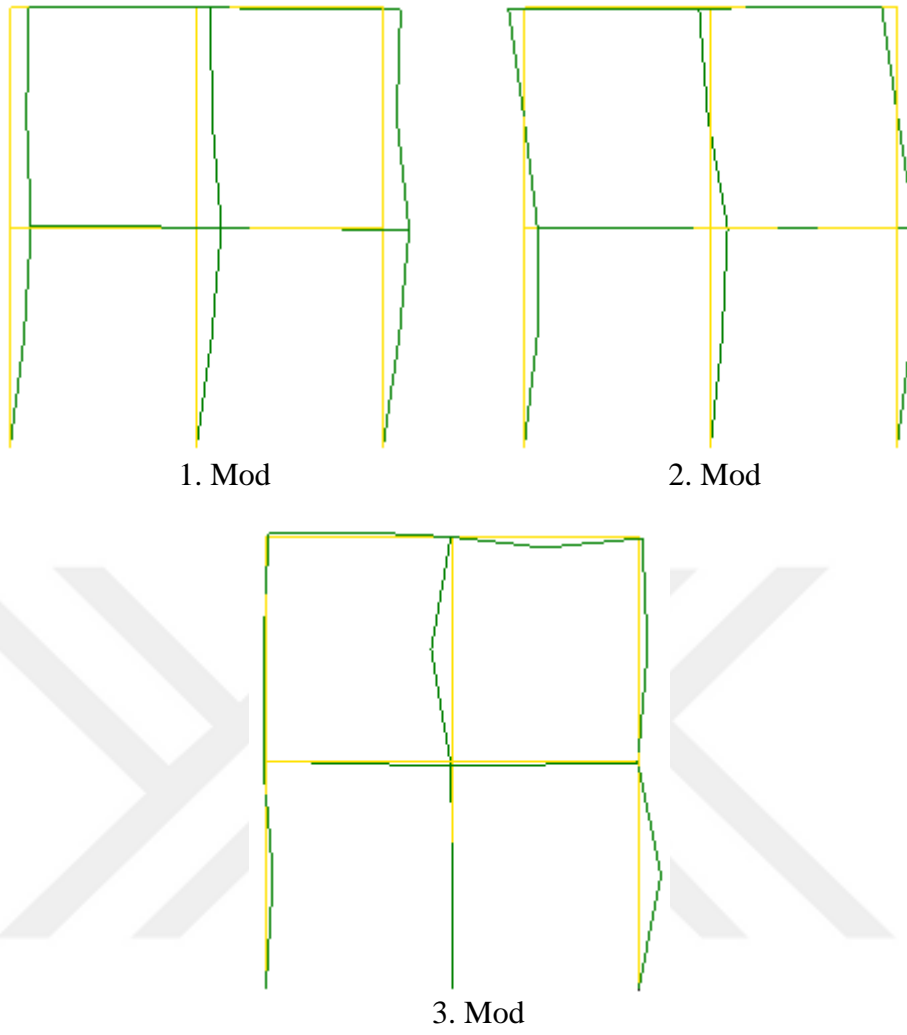
Çerçeve modeline enjeksiyon uygulaması yapıldıktan sonra çevresel titreşim testlerinden toplanan sinyallerin GFOA yöntemine göre ayrıştırılması sonucu elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri ve bu matrislerin ortalaması Şekil 2.19’da verilmektedir. Çerçeve modeline enjeksiyon uygulaması yapıldıktan sonra çevresel titreşim testinden elde edilen ilk üç mod şekli Şekil 2.20’de verilmektedir.

Çerçeve modeline enjeksiyon uygulaması yapıldıktan sonra SAB yöntemine göre çevresel titreşim testinden elde edilen kararlılık ve spektral yoğunluk fonksiyonu grafikleri Şekil 2.21’de verilmektedir. Çevresel titreşim testinden SAB yöntemine göre elde edilen ilk üç mod şekli Şekil 2.22’de verilmektedir. Şekil 2.20 ve Şekil 2.22 karşılaştırıldığında mod şekillerinin benzer olduğu görülmektedir. Çerçeve modeline uygulanan çevresel

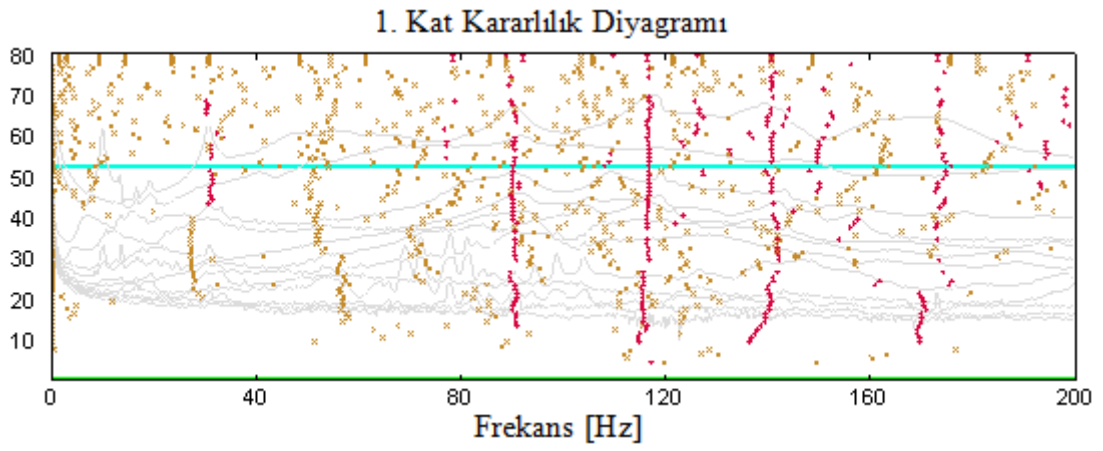
titreşim testlerinden GFOA ve SAB yöntemi ile elde edilen frekans değerleri ve sönüm oranları Tablo 2.7’de verilmektedir. SAB yöntemine göre ilk moda ait sönüm oranı belirlenememiştir.



Şekil 2.19. Çerçeve modeline enjeksiyon uygulandıktan sonra GFOA yönteminden elde edilen spektral yoğunluk matrisleri

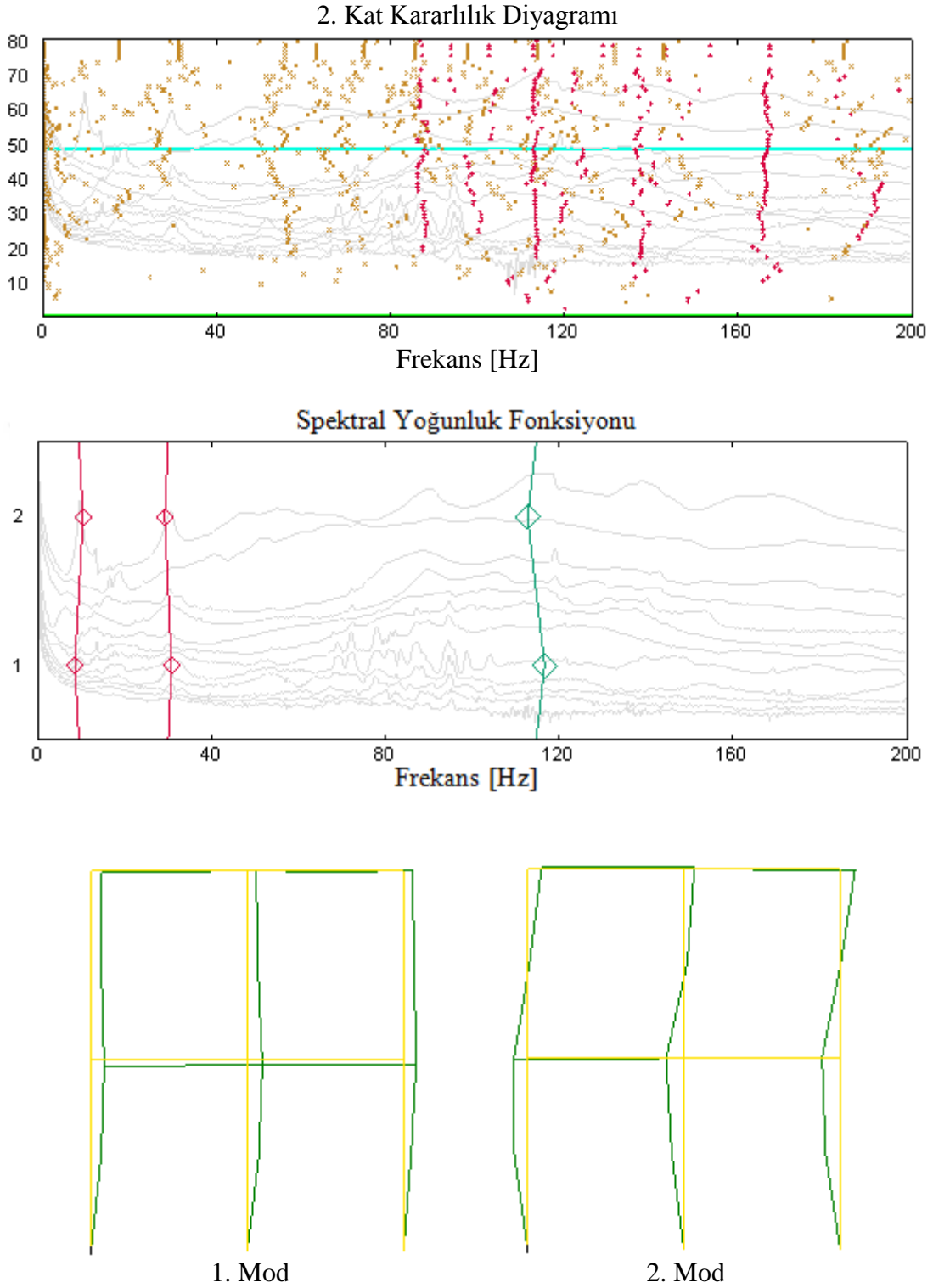


Şekil 2.20. Çerçeve modeline enjeksiyon uygulandıktan sonra GFOA yöntemine göre elde edilen mod şekilleri



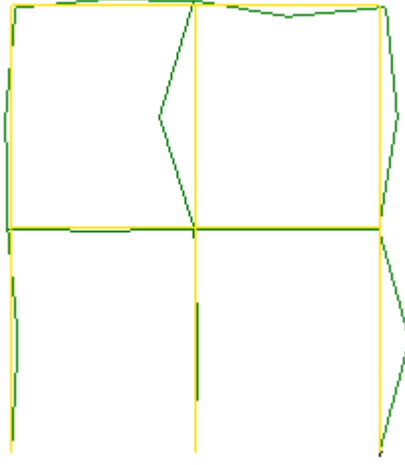
Şekil 2.21. Çerçeve modeline enjeksiyon uygulandıktan sonra SAB yöntemine göre elde edilen mod şekilleri

Şekil 2.21'in devamı



Şekil 2.22. Çerçeve modeline enjeksiyon uygulandıktan sonra SAB yöntemine göre elde edilen mod şekilleri

Şekil 2.22'nin devamı



3. Mod

Tablo 2.7. Çerçeve modeline enjeksiyon uygulamasından sonra GFOA ve SAB yöntemleri için elde edilen dinamik karakteristikler

Mod	Frekans (Hz)		Sönüm Oranı (%)	
	GFOA	SAB	GFOA	SAB
1	9.895	9.573	2.178	-
2	30.27	30.09	1.783	6.627
3	115.6	114.8	1.375	2.159

Tablo 2.8 betonarme düzlem çerçeve modeline ait hasarlı ve enjeksiyonlu durumlar için çevresel titreşim testlerinden GFOA ve SAB yöntemlerine göre elde edilen frekansları karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. Hasarlı ve enjeksiyonlu durumlar için GFOA ve SAB yöntemlerinden elde edilen frekans değerleri arasındaki en büyük fark sırasıyla %66.83 ve %115.56 olarak elde edilmiştir.

Tablo 2.8. Betonarme çerçeve sistemine ait hasarlı ve onarımlı durumlar için deneysel olarak elde edilen frekansların karşılaştırılması

Mod	Frekans (Hz)					
	GFOA			SAB		
	Hasarlı	Fark(%)	Onarımlı	Hasarlı	Fark(%)	Onarımlı
1	7.269	36.13	9.895	4.441	115.56	9.573
2	23.263	30.12	30.27	23.6	27.50	30.09
3	69.293	66.83	115.6	62.65	83.24	114.8

Tablo 2.8'den de görüldüğü gibi çerçeve modeline uygulanan enjeksiyon işlemi hasarlı durumdaki frekans değerlerini önemli ölçüde artırmıştır ve Şekil 2.8 ile Şekil 2.10 incelendiğinde mod şekillerinin onarım işlemiyle hasarsız durumdaki hale oldukça yaklaştığı görülmüştür.

2.3.4. Çevresel Titreşim Yöntemiyle (ÇTY) Güçlendirilmiş Durumdaki Betonarme Düzlem Çerçeve Modelinin Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

Bilindiği gibi depremler meydana getirdiği can ve mal kayıpları yönünden doğal afetler içerisinde en şiddetli olanıdır. Dünyada meydana gelen depremlerde tespit edilen yapı hasarlarının ve kayıpların; mevcut tasarım standartlarının ve inşaat kalitesinin yetersizliğinden, bilgi eksikliğinden, yapım hatalarından veya yönetmelik kurallarına uyulmayışından kaynaklandığı görülmektedir. Yaşanan depremler yapıların depreme dayanıklı tasarım ilkelerine ilişkin birikimlerini arttırırken, hasara uğrayan yapıların onarım ihtiyaçlarının varlığını göstermiştir. Yeni yapıların deprem koşullarına uygun olarak yapılması ve mevcut yapıların güçlendirilmesi pek çok ülkede hızla büyüyen bir mühendislik alanı haline gelmiştir.

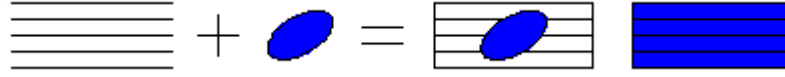
Erzincan'da 1939 yılında, Çaldıran'da 1976 yılında, Erzurum'da 1983 yılında, Kocaeli ve Düzce'de 1999 yılında, Bingöl'de 2003 yılında ve Van'da 2011 yılında yaşanan depremlerde tespit edilen kayıplar ve yapı hasarları mevcut yapı stoğunun deprem güvenliğinin yetersizliğini ortaya çıkarmıştır. Bu nedenle Türkiye'deki mevcut yapı stoğunun güvenlik düzeyinin arttırılması bir gereklilik haline gelmiştir. Yapıların depreme karşı güçlendirilmesinde temel hedef; olası bir depremde can kaybının en aza indirilmesi ve deprem güvenliği olmayan yapıların çeşitli yöntemler kullanılarak depreme karşı uygun bir şekilde güçlendirilmesidir. Deprem güvenliği zayıf yapılarda sorunun çözümü için iki yola başvurulabilir. Ya yapıyı yıkmak ve yapıyı günümüz standartlarına ve yönetmeliklerine uygun şekilde yeniden inşa etmek ya da yapıyı güçlendirme yoluna gitmektir. Her ikisinde de verilecek karar hasarın büyüklüğüne ve ekonomik faktörlere dayanmaktadır. Yapının güçlendirilmesi kararı verilmesi durumunda kolon mantolaması, betonarme perde ilavesi, çelik takviye ve LP kompozit malzemelerin kullanılması gibi çeşitli güçlendirme tekniklerinden biri kullanılabilir.

Bir yapının güçlendirilmesi için yapının hasar görmesi gerekmez. Yapının kullanım amacının değişmesiyle düşey yönde etkiyen hareketli yüklerde artışın meydana gelmesi,

yönetmelik değişmesiyle yapıdaki eski deprem kuvvetlerinin hesap yönteminin yenisine uymaması, yapı elemanlarının ve malzemelerinin kullanım ömrünü doldurması gibi nedenlerden dolayı da yapı güçlendirme gereksinimi duyulabilir (Karaşin 2014).

LP kompozit malzemelerin yapı elemanlarının yüzeylerine farklı metot ve şekillerde yapıştırılması yöntemi; son yıllarda oldukça yaygın hale gelmiş, pratik, hızlı ve güvenilir bir güçlendirme yöntemidir. Binalar, köprüler, tüneller, barajlar, bacalar, su ve gaz iletim hatlarında kullanılan geniş çaplı borular gibi yapılar, LP kompozit malzemelerle kolaylıkla güçlendirilebilir. LP kompozit malzemelerle güçlendirme yöntemi betonarme, çelik, taşıyıcı yığma ve ahşap elemanların eğilmeye, kesme etkilerine, eksenel yüklere ve darbelere karşı dayanımlarının ve/veya sünekliklerinin artırılmasında kullanılır.

LP kompozit malzemeler genel anlamda lifler ile kullanılan matriks malzemesinin birbirine yapışması sonucu oluşmaktadır (Şekil 2.23). Lifler ve matriks malzemesinin kendi mekanik özelliklerini göstermesi sonucu kompozit sistem oluşmaktadır. Kompozit sistemdeki lifler rijitlik ve dayanımı sağlarken, matriks malzemesi sertlik vererek sistemi hem dış etkilere karşı korur hem de yüklerin liflere aktarılmasını sağlar.



Şekil 2.23. Lifli polimer kompozit malzeme yapısı

LP kompozit malzemeleri oluşturan iki fazdan bir tanesi matriks malzemesidir. Matriks malzemesinin temel fonksiyonları;

- ❖ Lifleri bir arada tutmak ve üzerine gelen kuvvetleri liflere aktarmak,
- ❖ Lifleri dış etkilerden korumak,
- ❖ Çatlak yayılımını kısıtlamak,

şeklinde sıralanabilir. LP kompozit malzemelerin üretiminde matriks malzemesi olarak en çok termoset plastikler kullanılmaktadır. Termoset plastikler genel olarak aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- ❖ Polyester
- ❖ Epoksiler
- ❖ Vinilesterler
- ❖ Poliüretanlar
- ❖ Fenolikler

Termoset plastikler sıvı halde bulunur, ısı veya kimyasal tepkimelerle sertleşerek sağlamlaşırlar ve şekil aldıktan sonra şekillerini çok uzun süre korurlar. Termoset plastikler; profil çekme, iplik sarma, hazır kalıplama yöntemi, reçine enjeksiyon yöntemi gibi yöntemler kullanılarak üretilen LP kompozit elemanlarda matriks malzemesi olarak kullanılmaktadır. LP kompozit malzeme üretiminde yaygın olarak kullanılan bazı termosetlerin fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 2.9’da verilmiştir.

Tablo 2.9. Seçilen bazı termositlerin fiziksel ve mekanik özellikleri (CEB-FIB, 2001)

Özellik	Matriks		
	Polysester	Epoksi	Vinilester
Özgül Ağırlık (kg/m^3)	1200-1400	1200-1400	1150-1350
Çekme Dayanımı (MPa)	34.5-104	55-130	73-81
Elastisite Modülü (GPa)	2.1-3.45	2.75-4.10	3-3.5
Poisson Oranı (-)	0.35-0.39	0.38-0.40	0.36-0.39
Termal İletkenlik (10^{-6}C°)	55-100	45-65	50-75
Rutubet Oranı (%)	0.15-0.6	0.08-0.15	0.14-0.30

LP kompozit yapıda asıl yük taşıyıcı bileşenler liflerdir. Lifler ayrıca matriks malzemesinin rijitliğini ve dayanımını artırır. Lifler kompozit yapıda “takviye malzemesi” olarak da adlandırılır. Liflerin tanımlanmasında kesin bir tanım yapılmamakla birlikte genel olarak lif malzemesinin boy/çap oranı tanımlayıcı bir unsur olarak kullanılmaktadır. Amerikan Standardı ASTM’de bir malzemenin lif olarak tanımlanabilmesi için, boy/ortalama çap oranının en az 10 olması, lifin en büyük genişliğinin 0.25 mm’den ve en büyük kesit alanının da 0.05 mm^2 ’den daha küçük olması gibi kısıtlamalar getirmektedir. Liflerin çapı ortalama 0.01 mm mertebesinde olup, narinlik olarak tanımlanan boy/çap oranı on binlere kadar çıkabilmektedir (Ersoy, 2001). LP kompozit malzeme üretiminde kullanılan liflerin bazı fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 2.10’da verilmektedir.

Tablo 2.10. Farklı tür liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri (Bank, 2006; CEB-FIB, 2001)

Özellik	Lif Türü		
	Cam	Karbon	Aramid
Özgül Ağırlık (g/m^3)	2.46-2.57	1.7-2.1	1.4-1.4
Çekme Dayanımı (MPa)	2350-4600	2400-4800	2760-3620
Elastisite Modülü (GPa)	70-90	250-800	62-175
Maksimum Uzama (%)	2.5-3	0.2-1.4	2.5-3.5

Çalışma kapsamında, LP kompozit güçlendirilmenin dinamik karakteristikler üzerine olan etkilerinin incelenmesi amacıyla betonarme düzlem çerçeve modeli LP kompozit malzeme ile sargılanarak güçlendirilmiştir. Güçlendirme öncesi ve sonrasında elde edilen dinamik karakteristikler karşılaştırılarak LP kompozit malzemenin etkinliği belirlenmeye çalışılmıştır.

Çerçeve modelinin onarılmış durumu üzerinde çevresel titreşim testleri yapıldıktan sonra model tek yönlü LP kompozit kumaş ile sargılanarak güçlendirilmiştir. Güçlendirme uygulamasında BASF tarafından üretilen Mbrace Fibre CF 230/4900 türü karbon lifli polimer kumaş kullanılmıştır. Bu malzemeye ait bazı teknik özellikler Tablo 2.11’de verilmiştir. Bu tez çalışmasında Tablo 2.11’de verilen 200 g/m²’lik karbon lifli polimer kumaş kullanılmıştır.

Tablo 2.11. Karbon lifli polimer kumaşın bazı teknik özellikleri

Özellik	Mbrace Fibre CF 230/4900	
	200 g/m ²	300 g/m ²
Elastisite Modülü (MPa)	230000	230000
Çekme Dayanımı (MPa)	4900	4900
Tasarım Kesit Kalınlığı (mm)	0.111	0.166
Toplam Lif Ağırlığı (g/m ²)	210	300
Kopmada Uzama (%)	2.10	2.10
Genişlik (mm)	500	500

Öncelikle LP kompozit güçlendirme uygulamasının ilk aşaması olarak çerçeve modelinin eleman yüzeylerine epoksi esaslı, iki bileşenli (epoksi reçine ve epoksi sertleştirici) astar malzemesi (BASF-Mbrace Primer) sürülmüştür. Diğer aşamaya geçmeden önce astar malzemesinin kürünü tamamlaması için üç gün beklenmiş ve ardından karbon lifli polimer kumaş ile elemanlar sargılanarak güçlendirilmiştir. Sargılama işlemi hasarların yoğunluklu olarak verildiği kolon-kiriş birleşim bölgeleri, etriye sıklaştırması yapılmayan kolon ve kiriş bölgeleri ve kolonların temele birleştiği bölgeleri kapsayacak şekilde gerçekleştirilmiştir. LP kompozit güçlendirme, belirtilen eleman yüzeylerine 3 kat halinde 50 cm uzunluğunda kumaşın sargılanması şeklinde uygulanmıştır. LP kumaşın beton yüzeyle ve uygulanan katlar arasında aderansı sağlamak amacıyla iki bileşenli, yüksek dayanımlı, epoksi esaslı (BASF-MBace Fibre Saturant) özel bir yapıştırıcı kullanılmıştır. Yapıştırıcı; astarlanmış eleman yüzeylerine ve uygulanan her

bir kat kumaş yüzeyine iyice doyurularak sürülmüş ve yapıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Mbrace Fibre Saturant yapıştırıcıya ait bazı teknik özellikler Tablo 2.12’de verilmiştir.

Tablo 2.12. Mbrace Fibre Saturant yapıştırıcıya ait bazı teknik özellikler

Malzemenin Yapısı	
Mbrace Fibre Saturant Bileşen A	Epoksi Reçine
Mbrace Fibre Saturant Bileşen B	Epoksi Sertleştirici
Renk	Mavi
Karışım Yoğunluğu	1.02 kg/litre
Viskozite	1500-2500 mPa.s
Basınç Dayanımı (7 gün) (TS EN 196)	>60 MPa
Eğilme Dayanımı (7 gün) (TS EN 196)	>50 MPa
Yapışma Dayanımı (Betona-7 gün)	>3 MPa
Uygulanacak Zemin Sıcaklığı	+5°C + 30°C
Yeniden Kaplanabilme Süresi (+20°C)	Minimum 48 saat-Maksimum 7 gün
Kullanma Süresi	30 dakika
Tam Kurlenme Süresi	7 gün

Eleman ölçülerine uygun kesilmiş (15 cm bindirme boyu dahil) kumaşlar yapıştırıcı sürülen beton yüzeye yapıştırıcı henüz yaşken gerilerek yapıştırılmıştır ve ardından el ve rulo yardımıyla kumaşlar lifleri doğrultusunda bastırılarak yapıştırıcının kumaş yüzeyine emdirilmesi, kumaş ve beton yüzey arasında boşluk kalmaması, yapıştırıcının kumaşa homojen şekilde dağılması sağlanmıştır. Beton yüzeye yapıştırılan kumaşın üzerine bir kat daha yapıştırıcı sürülerek ilgili katman için güçlendirme işlemi bitirilerek diğer katmana geçilmiştir. Sargılama sırasında güçlü bir kenetlenme için her kumaş katında bindirme farklı eleman yüzeylerinde uygulanmıştır. Her katmanın sargılanması sırasında bir önceki katmanda bekleme yapılmamış ve sargılama işlemine devam edilmiştir. Çerçeve modelinin polimer kumaşla güçlendirilmesi aşamalarına ait bazı fotoğraflar Şekil 2.24’te verilmektedir.



a) Astar malzemesinin hazırlanması



b) Astar malzemesinin elemanlara sürülmesi



c) Astar malzemesi sürme aşamasının tamamlanmış hali

Şekil 2.24. Çerçeve modelinin LP kumaş ile güçlendirilmesi aşamalarına ait bazı fotoğraflar

Şekil 2.24'ün devamı



d) LP kumaşın hazırlanması



e) Epoksi esaslı yapıştırıcının hazırlanması ve eleman yüzelerindeki pürüzlerin giderilmesi



f) Elemanlara LP kumaş sargılanması

Şekil 2.24'ün devamı



g) LP kumaş sargılama aşamasının tamamlanmış hali

Çerçeve modelinin çevresel titreşim testi (Şekil 2.25), LP kompozit güçlendirme uygulamasından 7 gün sonra, 0-200 Hz frekans ölçüm aralığında ve 20 dakika ölçüm süresi dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir.

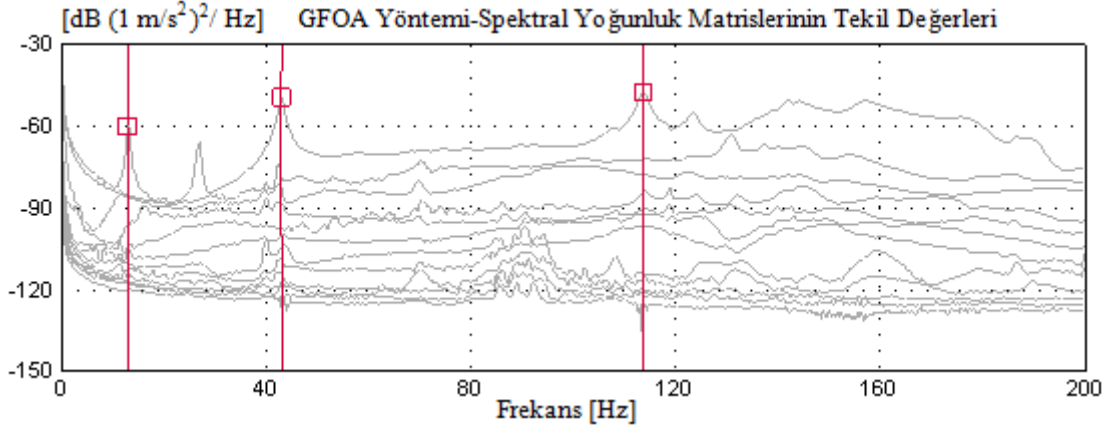


Şekil 2.25. LP kompozit güçlendirmeden sonra çerçeve modeli için gerçekleştirilen çevresel titreşim testi

Çerçeve modelinin güçlendirilmesinden sonra çevresel titreşim testinden toplanan sinyallerin GFOA yöntemine göre ayrıştırılması sonucu elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri ve bu matrislerin ortalaması Şekil 2.26'da, ilk üç mod şekilleri ise Şekil 2.27'de verilmektedir.

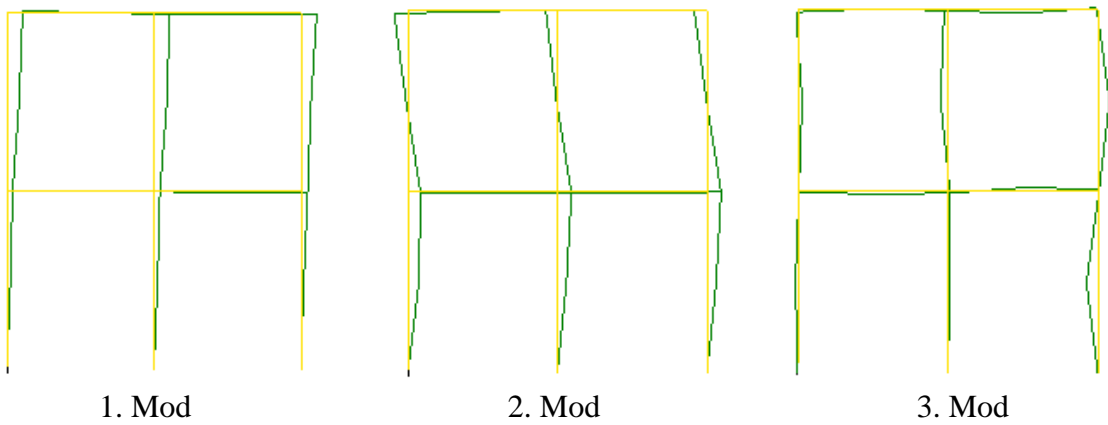
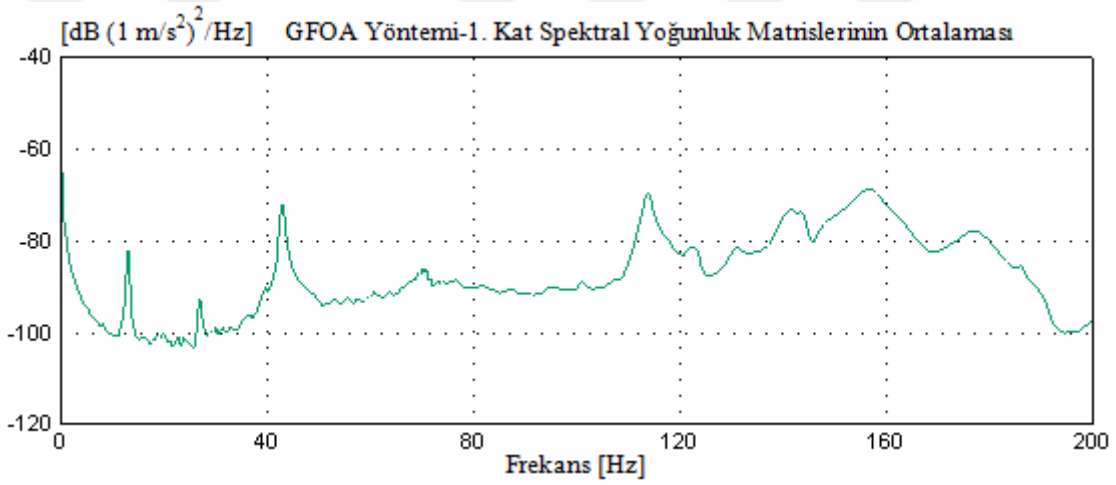
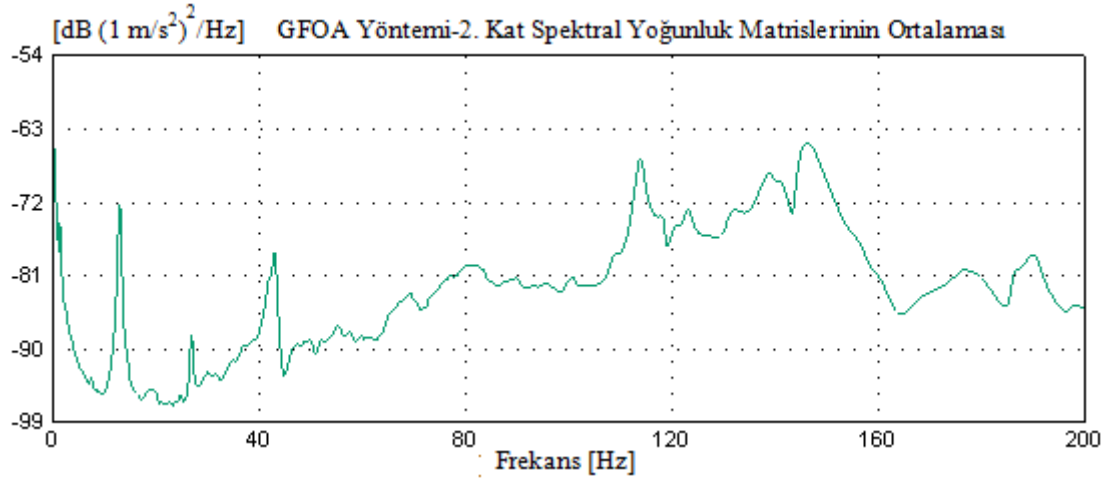
Çerçeve modelinin güçlendirilmesinden sonra çevresel titreşim testinden SAB yöntemine göre elde edilen kararlılık diyagramı ve spektral yoğunluk fonksiyonu grafikleri Şekil 2.28'de, ilk üç mod şekilleri ise Şekil 2.29'da verilmektedir. Her iki yöntemden elde edilen mod şekilleri incelendiğinde benzer olduğu görülmektedir.

Çerçeve modelinin güçlendirilmesinden sonra GFOA ve SAB yöntemlerinden elde edilen frekans değerleri Tablo 2.13'te verilmektedir. Tablo 2.13 incelendiğinde çerçeve modelinin güçlendirilmesinden sonra elde edilen ilk üç frekans değerinin GFOA yöntemine göre 13.14-113.9 Hz arasında, SAB yöntemine göre ise 15.53-113.7 Hz arasında değiştiği görülmektedir. SAB yöntemine göre ilk moda ait sönüm oranı belirlenememiştir. Tablo 2.14'te onarılmış ve güçlendirilmiş durumlara ait frekans değerleri arasındaki farklar GFOA ve SAB yöntemi için karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

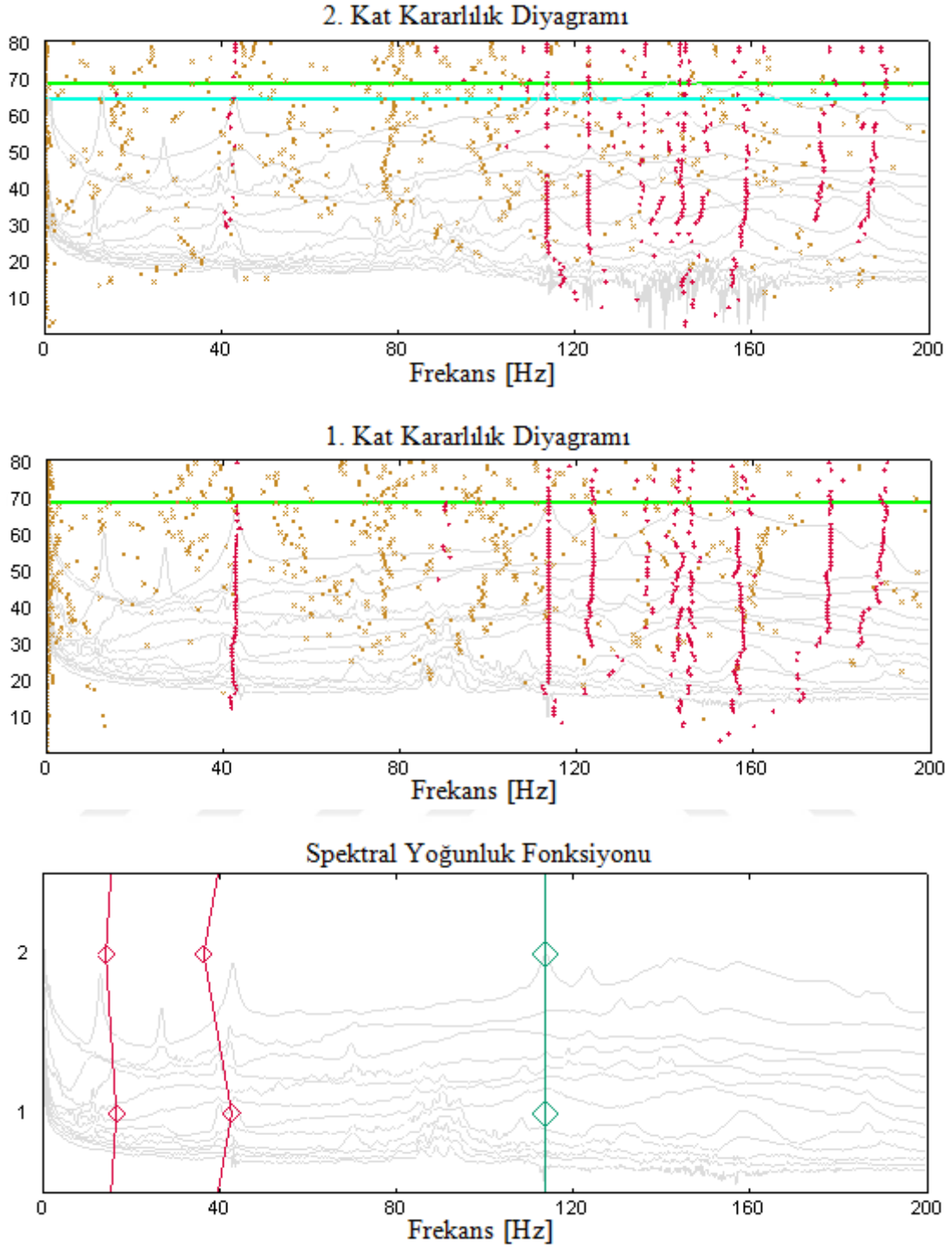


Şekil 2.26. Çerçeve modelinin güçlendirilmesinden sonra GFOA yönteminden elde edilen spektral yoğunluk matrisleri

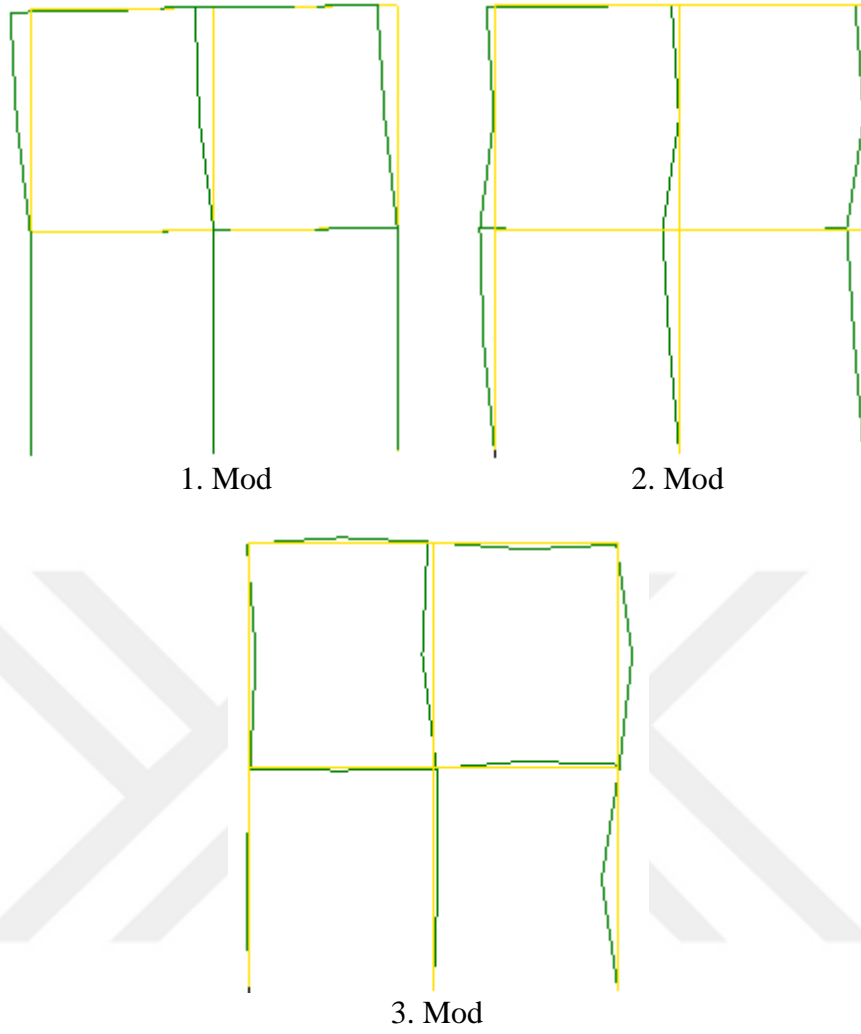
Şekil 2.26'nın devamı



Şekil 2.27. Çerçeve modelinin güçlendirilmesinden sonra GFOA yöntemine göre elde edilen mod şekilleri



Şekil 2.28. Çerçeve modelinin güçlendirilmesinden sonra SAB yönteminden elde edilen kararlılık ve spektral yoğunluk fonksiyonu diyagramları



Şekil 2.29. Çerçeve modelinin güçlendirilmesinden sonra SAB yöntemine göre elde edilen mod şekilleri

GFOA ve SAB yöntemlerinden elde edilen mod şekilleri karşılaştırıldığında benzer olduğu görülmektedir.

Tablo 2.13. Çerçeve modelinin güçlendirilmesinden sonra GFOA ve SAB yöntemlerinden elde edilen frekans değerleri

Mod	Frekans (Hz)		Sönüm Oranı (%)	
	GFOA	SAB	GFOA	SAB
1	13.14	15.53	1.500	-
2	43.12	39.65	1.085	0.964
3	113.9	113.7	0.910	0.816

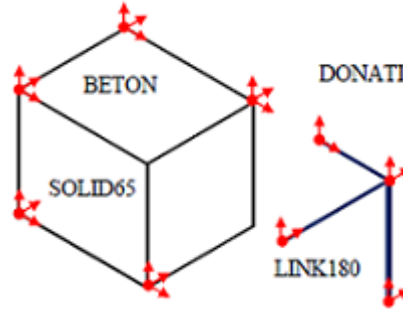
Tablo 2.14. Betonarme çerçeve sistemine ait onarılmış ve güçlendirilmiş durumlar için deneysel olarak elde edilen frekansların karşılaştırılması

Mod	Frekans (Hz)					
	GFOA			SAB		
	Onarılmış	Fark(%)	Güçlendirilmiş	Onarılmış	Fark(%)	Güçlendirilmiş
1	9.895	32.79	13.14	9.573	62.23	15.53
2	30.27	42.45	43.12	30.09	31.77	39.65
3	115.6	1.47	113.9	114.8	0.96	113.7

2.4. Analitik Çalışmalar

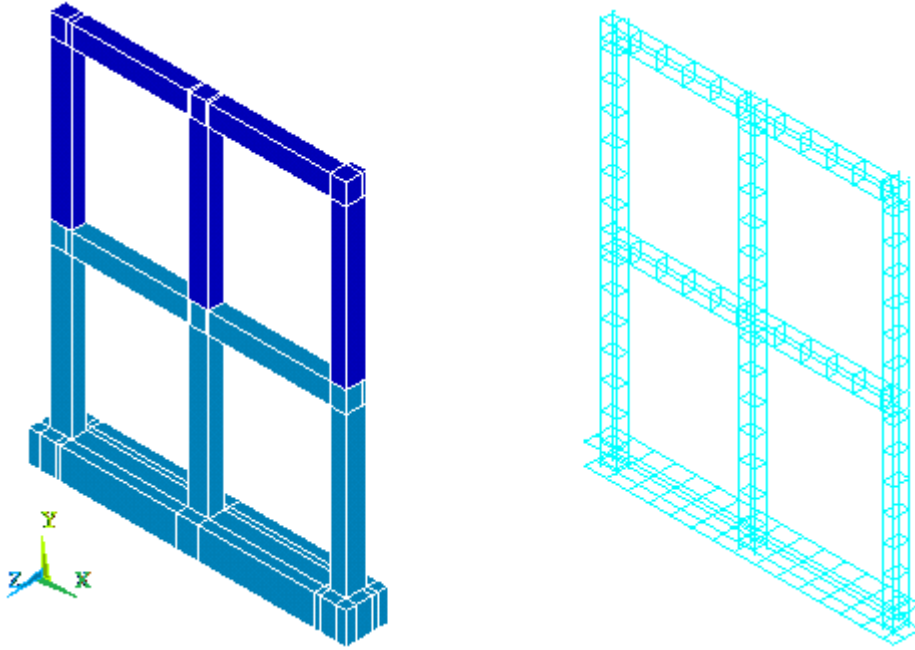
2.4.1. Hasarsız Durumdaki Betonarme Düzlem Çerçevenin Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması

Betonarme düzlem çerçevenin sonlu eleman modeli ANSYS (2016) programında oluşturulmuştur. Modellemede, ANSYS kütüphanesinde bulunan SOLID65 hacimsel elemanı donatısız betonu, LINK180 çubuk elemanı ise beton içerisindeki donatıyı modellemek için kullanılmıştır. SOLID65 elemanı sekiz düğüm noktasına sahip olup, her düğüm noktasında üç ötelenme serbestlik derecesine sahiptir. SOLID65 elemanı beton ve betonarme elemanların modellenmesinde kullanılan, çekmede çatlama, basınçta ezilme, sünme ve plastik deformasyon yapabilme özelliklerini barındıran katı bir elemandır. LINK180 çubuk elemanı, iki düğüm noktalı ve her düğüm noktasında üç ötelenme serbestlik derecesine sahip, tek eksenli çekme ve basınç elemanıdır. SOLID65 elemanı içerisinde donatının eleman sabitlerinin tanımlanmasıyla (malzeme özelliği, hacimsel oranı ve doğrultusu) donatı modellenmektedir. Donatının SOLID65 içerisinde bu şekilde modellenmesine yayılı (smeared) donatı modeli denilmektedir. SOLID65 elemanı içerisinde çubuk elemanların çizilmesiyle de donatılar modellenmektedir. Bu şekilde gerçekleştirilen donatı modellenmesine ayrık (discrete) donatı modeli denilmektedir. Ayrık donatı modelinde eleman sabiti olarak donatı alanı tanımlanmaktadır. Çalışma kapsamında betonarme düzlem çerçeve modeli için ayrık donatı modeli kullanılmıştır. Bu modellemede beton ve donatı arasında tam aderansın olduğu yani beton ve donatının birim şekilgeçirime oranlarının eşit olduğu varsayılmaktadır. Buradan beton ve donatının aynı düğüm noktalarını paylaştığı anlaşılır (Şekil 2.30). Bu sayede beton ile donatının beraber çalışması yani betonarme davranışı elde edilmektedir.



Şekil 2.30. Beton ve donatının sonlu eleman modeli

Çerçeve modelinin sonlu eleman modeli Şekil 2.1 ve Şekil 2.2’de verilen geometrik ölçüler ve donatı yerleşim planı ile aynıdır. Modellemede; temel, kolon, kiriş elemanlar SOLID65 ile, donatılar ise LINK180 elemanı ile temsil edilmiştir. Çerçeve modeli için oluşturulan sonlu elemanlar modeli ve elemanların içerisine yerleştirilen donatı düzeni Şekil 2.31’de verilmiştir.



Şekil 2.31. Çerçeve modelinin sonlu eleman modeli için oluşturulan temel, kolon, kiriş elemanlar ve bu elemanlara yerleştirilen donatı kafesi

Sonlu eleman modelinde beton ve donatının malzeme özelliklerinin programa tanıtılması gerekmektedir. Çerçeve modelinde hedef beton dayanımı C16/20 MPa olduğu önceden belirtilmiştir. Başlangıç sonlu eleman modelinde beton için ihtiyaç duyulan

elastisite modülü değeri denklem (1.70) yardımıyla hesaplanmıştır. Temel, kolonlar ve kirişlerde S420 inşaat çeliği kullanılmıştır. Donatının elastisite modülü 210000 MPa olarak dikkate alınmıştır. Çerçeve modeline ait başlangıç sonlu eleman modelinde dikkate alınan malzeme özellikleri Tablo 2.15'te verilmektedir.

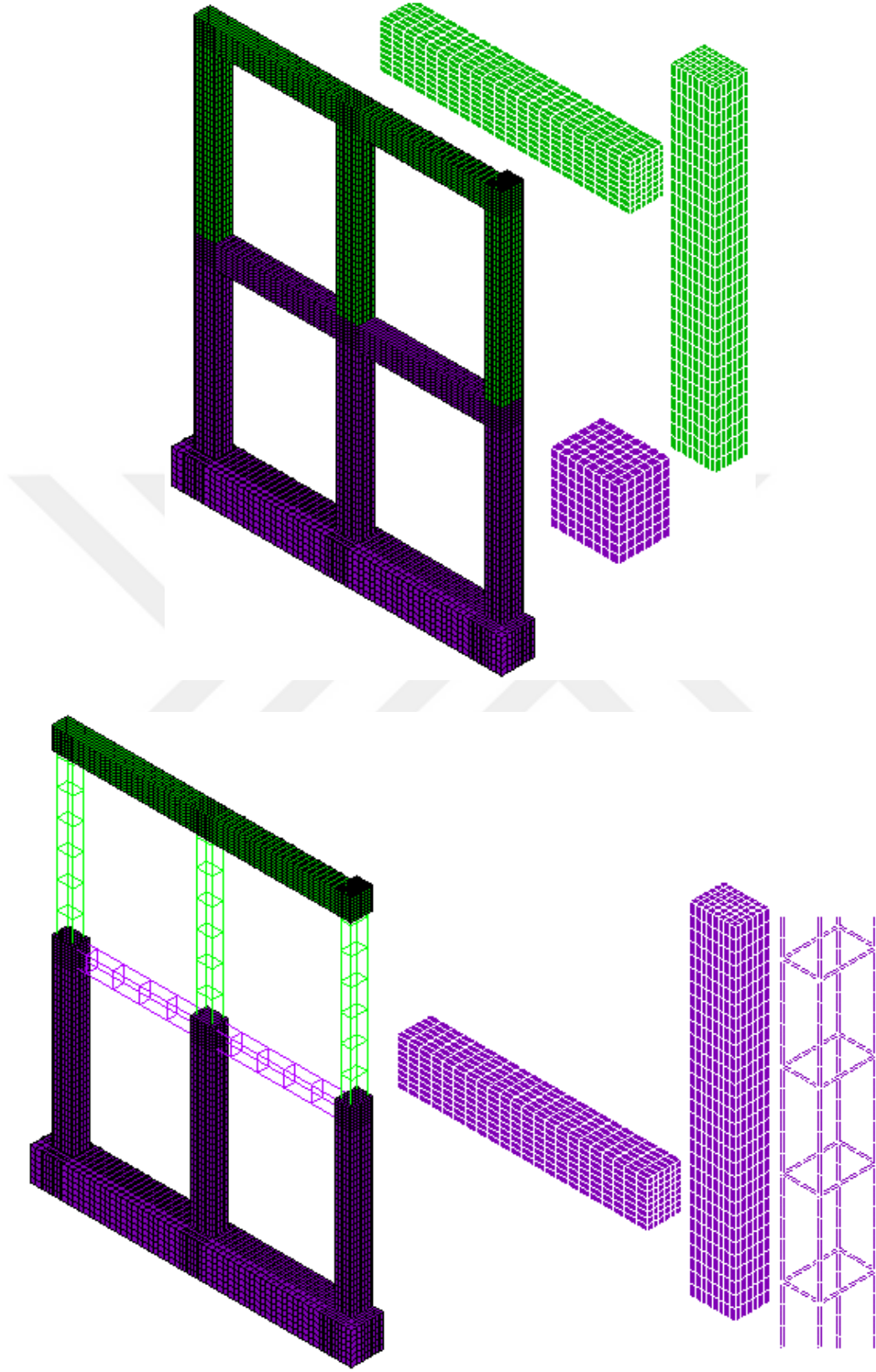
Tablo 2.15. Çerçeve modelinin başlangıç sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme özellikleri

Eleman	Malzeme Özellikleri			
	Dayanım (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)	Poisson Oranı	Yoğunluk (kg/m ³)
Temel-Kolon-Kiriş	16	27000	0.2	2400

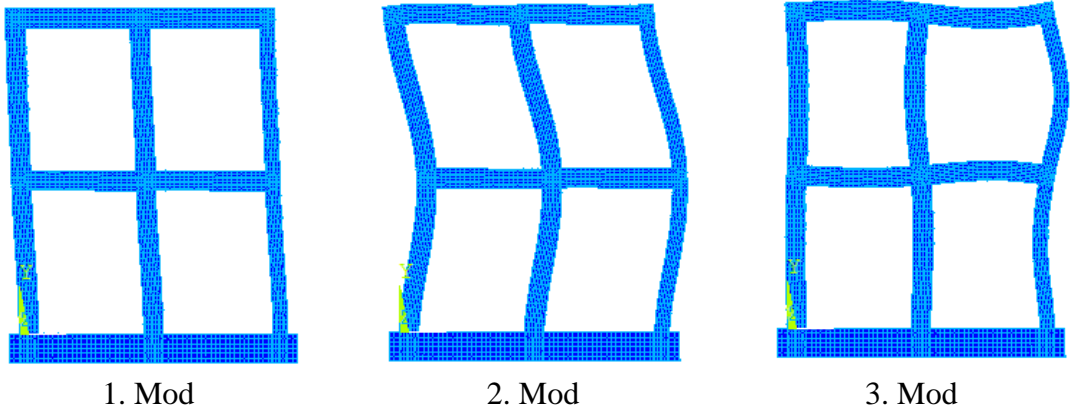
ANSYS'de sonlu elemanlara ayrılmış beton ve donatı elemanların düğüm noktalarının üst üste çakıştırılması gerekmektedir. Bunu gerçekleştirmekteki amaç beton ve donatının birlikte çalışmasını sağlamaktır. Bu çakışmayı sağlayabilmek için de programda kontrollü bir ağ seçilmesi gerekmektedir. Bu noktada bazı kısıtlayıcı durumlar oluşmaktadır. Modeli sonlu elemanlara bölerken kesit boyutları, paspayı gibi parametreler sonlu eleman ağındaki eleman boyutlarına karar vermede belirleyici unsurlar olmuştur. Beton ve donatı elemanlar; 25x25x25 mm'lik, 25x25x50 mm'lik ve 50x50x50 mm'lik dikdörtgen prizma şeklinde sonlu elemanlara bölünmüştür. Sonlu eleman modelinde sınır şartları olarak temelin zemine ankastre bağlandığı kabul edilmiştir. Çerçeve modeline ait sonlu eleman modeli Şekil 2.32'de verilmektedir.

Çerçeve modelinin ANSYS programı kullanılarak gerçekleştirilen modal analizlerinden elde edilen ilk üç moda ait mod şekilleri Şekil 2.33'te verilmektedir. Modal analiz sonucu elde edilen ilk üç doğal frekans değerleri sırasıyla; 18.012 Hz, 55.225 Hz, 149.47 Hz'dir.

Çerçeve modeline ait deneysel ve analitik olarak elde edilen frekans değerlerinin karşılaştırılması Tablo 2.16'da verilmektedir. Ayrıca elde edilen deneysel ve analitik mod şekilleri arasında hesaplanan MGK değerleri de Tablo 2.16'da görülmektedir.



Şekil 2.32. Çerçeve modeline ait sonlu eleman modeli



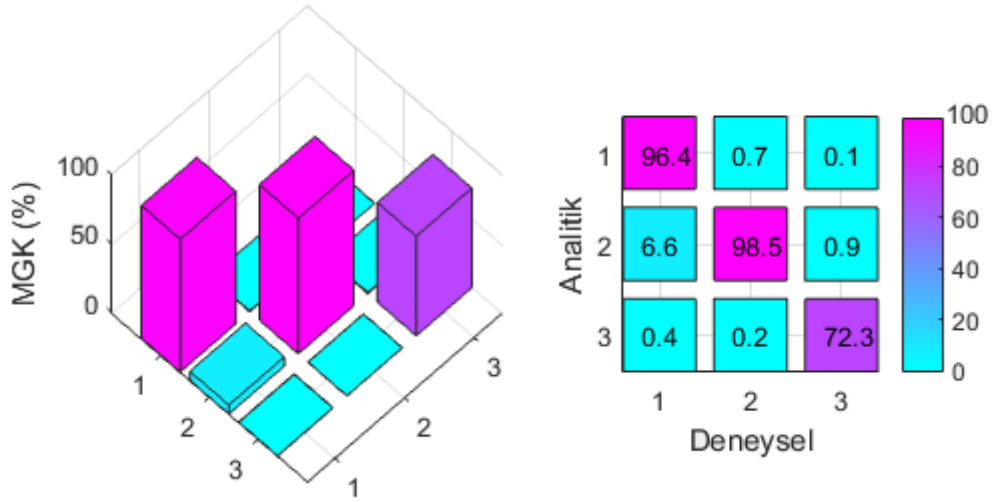
Şekil 2.33. ANSYS programında çerçeve modelinin analitik mod şekilleri

Tablo 2.16’da görüldüğü üzere deneysel ve analitik yollarla elde edilen frekans değerleri arasındaki maksimum fark %38.38, minimum fark ise %20.7’dir. Bu durum, hasarsız durumdaki sonlu eleman modelinin güncellenmesinin gerektiğini ortaya koymaktadır.

Tablo 2.16. Hasarsız durumdaki çerçeve modeli için analitik ve deneysel yolla elde edilen frekans değerlerinin karşılaştırılması

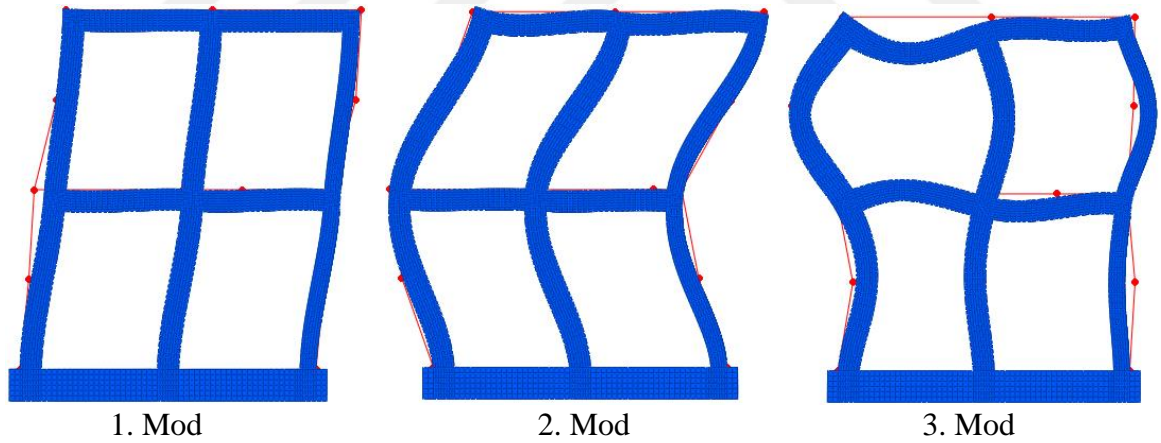
Mod	Frekans (Hz)			
	GFOA	SEY	Fark (%)	MGK (%)
1	13.898	18.012	+29.6	96.4
2	39.907	55.225	+38.38	98.5
3	123.84	149.47	+20.7	72.3

Şekil 2.34 hasarsız çerçeve modeli için analitik ve deneysel olarak elde edilen modal yerdeğişimlerden (genliklerden) oluşturulan mod şekilleri arasındaki MGK grafiğini göstermektedir. Şekil 2.34 incelendiğinde analitik ve deneysel yöntemler sonucunda elde edilen modlar arasındaki MGK değerlerinin ilk iki modda birbirine çok yakın, üçüncü modda ise ilk iki moddaki değerlere nazaran daha farklı olduğu görülmektedir.



Şekil 2.34. Analitik ve deneysel yolla elde edilen hasarsız duruma ait MGK değerleri

Şekil 2.35'te, çerçeve modeline ait analitik ve deneysel yollarla elde edilen mod şekilleri üst üste çakıştırılarak karşılaştırılmıştır.



Şekil 2.35. Hasarsız betonarme çerçeve modelinin analitik ve deneysel yolla elde edilen mod şekillerinin karşılaştırılması

Hasarsız betonarme çerçeve modelinin analitik ve deneysel dinamik karakteristiklerini birbirine yakınsatmak için duyarlılığa bağlı Model Güncelleme yapılmıştır. Model güncelleme, Bütünsel Güncelleme ve Yerel Güncelleme olmak üzere iki şekilde yapılmaktadır. Bütünsel Model Güncellemede, yapıyı temsil eden modeldeki tüm elemanların tek bir malzeme özelliğine sahip olduğu kabul edilmektedir. Yerel Model

Güncellemede ise sonlu elemanlara ayrılmış yapıda her elemanın kendine ait malzeme özelliğine sahip olduğu kabul edilmektedir. Bu doğrultuda çerçeve modelinde, öncelikle Bütünsel Güncelleme yapılmıştır ve elde edilen sonuçlar değerlendirildikten sonra Yerel Güncelleme yöntemi uygulanmıştır.

Güncelleme işlemine başlamadan önce güncellemede kullanılacak parametrelerin belirlenmesi gerekmektedir. Çünkü güncelleme yaparken doğruluğu büyük oranda bilinen parametrelerin belirsiz parametre olarak seçilmesi doğru sonuçların elde edilmesini olanaksız kılmaktadır. Sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme özellikleri, sınır şartları veya sonlu eleman ağ seçimi gibi deney modeliyle karşılaştırıldığında kesinliği tam olarak bilinmeyen parametreler kabul edilir sınırlar içerisinde değiştirilerek güncelleme yapılmaktadır.

Belirsiz parametreler olarak Elastisite Modülü (E) ve birim hacim ağırlığı (BHA) seçilmiştir. Bu noktada, laboratuvar ortamında temel ve 1. kat kolon ve kirişlerinin aynı anda, 2. Kat kolon ve kirişlerinin ise farklı zamanda inşa edildiği düşünüldüğünde; temel ve 1. kat kolon ve kirişleri için aynı grup malzeme özellikleri, 2. Kat kolon ve kirişleri için ise kendi içerisinde aynı malzeme özelliklerinin verilmesi uygun görülmüştür. Ayrıca belirsiz parametreler olarak bilinen Elastisite Modülü ve birim hacim ağırlık için alt ve üst sınır değerleri belirlenerek bu aralıkta çözümün aranması hedeflenmektedir.

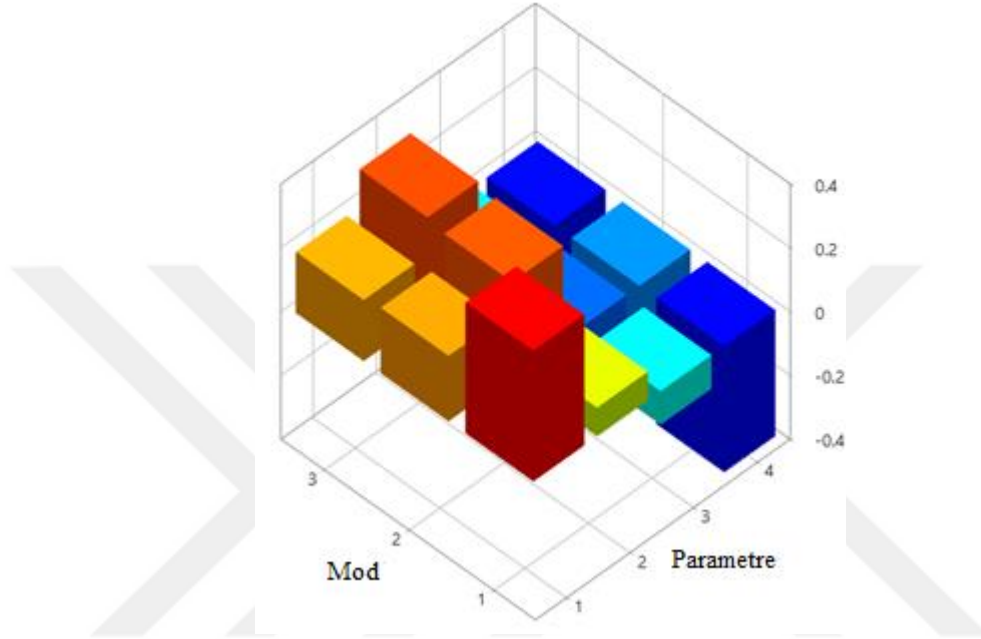
Tablo 2.17’de Bütünsel Güncellemede, Elastisite Modülü ve birim hacim ağırlık parametreleri için seçilen başlangıç değerleri ile bu değerlere ait alt ve üst sınırlar verilmektedir.

Tablo 2.17. Bütünsel Güncelleme için seçilen belirsiz parametrelerin özellikleri

Parametre Numarası	Eleman	Bütünsel Güncelleme			
		Parametre	Alt Limit	Üst Limit	Başlangıç Değeri
1	1.Kat Kolon, Kiriş ve Temel	E	-48.1	11.1	2.7E10 (N/m ²)
2	2.Kat Kolon, Kiriş	E	-48.1	11.1	2.7E10 (N/m ²)
3	1.Kat Kolon, Kiriş ve Temel	BHA	-8	2	2400 (kg/m ³)
4	2.Kat Kolon, Kiriş	BHA	-8	2	2400 (kg/m ³)

Hasarsız duruma ait başlangıç çerçeve modelini güncellemek için FEMtools (2017) programından yararlanılmıştır. Şekil 2.36’da hasarsız durumdaki betonarme çerçeve

modeline ait Bütünsel Güncelleme için gerçekleştirilen Duyarlılık Analizi sonuçları görülmektedir. Şekil 2.36'da belirlenen parametrelerin ilk üç mod üzerindeki etkilerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir. Buradan hareketle model güncellemede tüm parametreler dikkate alınmıştır.



Şekil 2.36. Çerçeve modelinin hasarsız durumuna ait Bütünsel Güncelleme için elde edilen Duyarlılık Analizi sonuçları

Betonarme çerçeve sisteminde belirsiz parametrelerin belirlenmesinin ardından Bütünsel Güncelleme yapılmıştır. Tablo 2.18 hasarsız durumdaki çerçeve modeline ait Bütünsel Güncelleme ile parametrelerin değişim sonuçlarını göstermektedir. Tablo 2.18 incelendiğinde temel, 1. kat kolon, kiriş elemanlarının Elastisite Modülü değerinin başlangıçta kabul edilen Elastisite Modülü değerinden %48.15 oranında azalarak 1.40×10^{10} N/m², birim hacim ağırlığı değerinin ise %2 oranında artarak 2448 kg/m³; 2. kat kolon ve kiriş elemanların Elastisite Modülü değerinin %36.67 oranında azalarak 1.71×10^{10} N/m², birim hacim ağırlığı değerinin ise %8 oranında azalarak 2208 kg/m³ olarak belirlendiği görülmektedir.

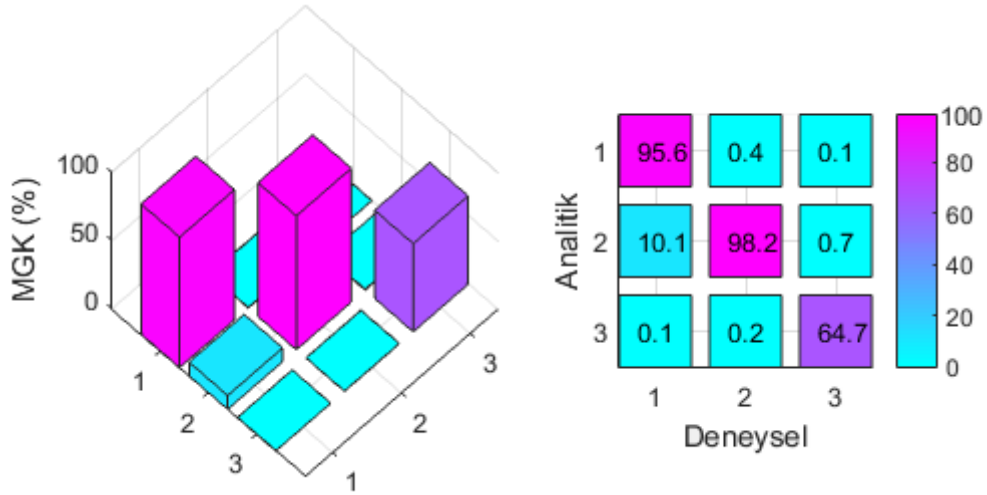
Tablo 2.18. Hasarsız duruma ait Bütünsel Güncelleme ile parametrelerin değişim sonuçları

Parametre	Elemanlar	Bütünsel Güncelleme			
		Tipi	Başlangıç Değer	Fark (%)	Güncel Değer
1	1.Kat Kolon, Kiriş ve Temel	E	2.7E10 (N/m ²)	-48.15	1.40E10 (N/m ²)
2	2.Kat Kolon ve Kiriş	E	2.7E10 (N/m ²)	-36.67	1.71E10 (N/m ²)
3	1.Kat Kolon, Kiriş ve Temel	BHA	2400 (kg/m ³)	2	2448 (kg/m ³)
4	2.Kat Kolon ve Kiriş	BHA	2400 (kg/m ³)	-8	2208 (kg/m ³)

Tablo 2.19’da hasarsız durumdaki betonarme çerçeve modeline uygulanan Bütünsel Güncelleme sonucu analitik olarak elde edilen ve deneysel olarak daha önceden elde edilen frekans değerleri karşılaştırılmış ve MGK yüzdeleri verilmiştir. Ayrıca Şekil 2.37’de MGK değerleri grafiklerle sunulmuştur.

Tablo 2.19. Hasarsız duruma ait Bütünsel Güncelleme sonucu elde edilen ve deneysel olarak elde edilen frekans değerleri arasındaki farklılıklar

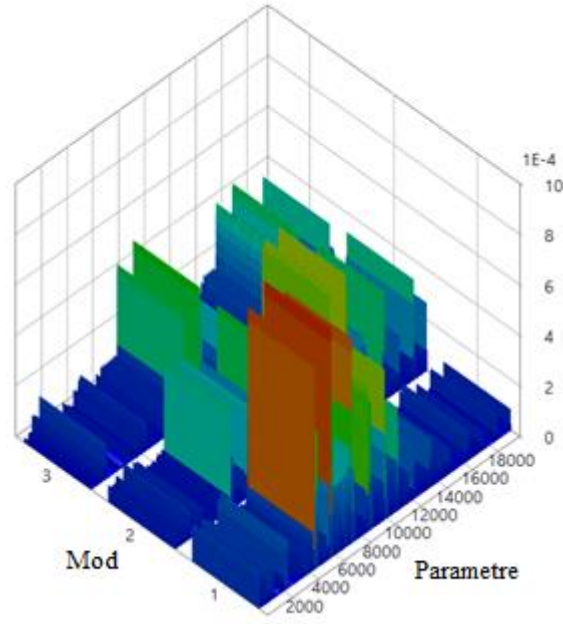
Mod Numarası	Frekans (Hz)			
	GFOA	SEY	Fark (%)	MGK (%)
1	13.898	13.629	-1.94	95.6
2	39.907	41.631	+4.14	98.2
3	123.84	118.38	-4.4	64.7



Şekil 2.37. Analitik ve deneysel yolla elde edilen hasarsız duruma ait bütünsel güncelleme sonrası MGK değerleri

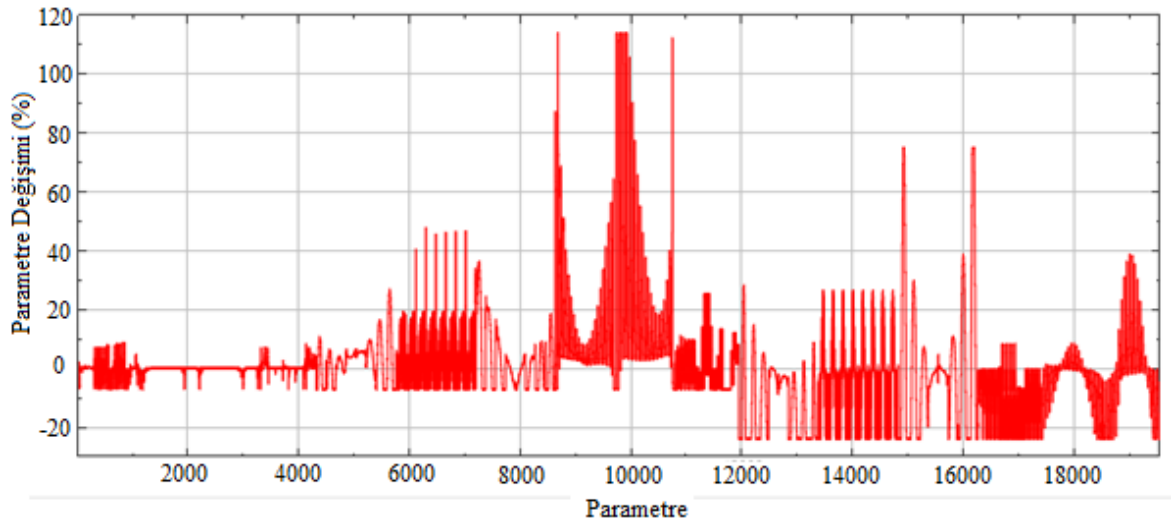
Tablo 2.19’da görüldüğü üzere deneysel ve bütünsel güncelleme sonucu elde edilen frekans değerleri arasındaki fark maksimum %4.4 olarak elde edilmiştir. MGK yüzdelerinde ise azalma gözlenmektedir. Tüm bu veriler değerlendirildiğinde frekans değerlerini ve mod şekillerini birbirine daha da yaklaştırmak amacıyla yerel güncelleme yapılmıştır. Yerel güncelleme yapılarak sonlu eleman modelinin gerçek modeli daha iyi temsil etmesi hedeflenmiştir.

Yerel güncelleme yaparken belirsiz parametrelerden birim hacim ağırlık tüm elemanlarda sabit tutulmuş, Elastisite Modülü değeri için ise sınır değerler girilmiştir. Elastisite modülü temel, 1. kat kolon ve kirişlerinde alt limit için -%7, üst limit için ise %114 olarak, 2. kat kolon ve kirişler için alt limit -%24, üst limit %75 olarak belirlenmiştir. Belirlenmiş olan bu parametrelere ait duyarlılık analizi sonuçları Şekil 2.38’de verilmiştir.



Şekil 2.38. Hasarsız durumdaki betonarme çerçeveye ait yerel güncelleme için elde edilen duyarlılık analizi sonuçları

Şekil 2.39'da betonarme çerçeve modelinin hasarsız durumuna ait yerel güncelleme ile elde edilen parametre değişimleri görülmektedir. Parametrelerdeki maksimum değişim %114'tür.

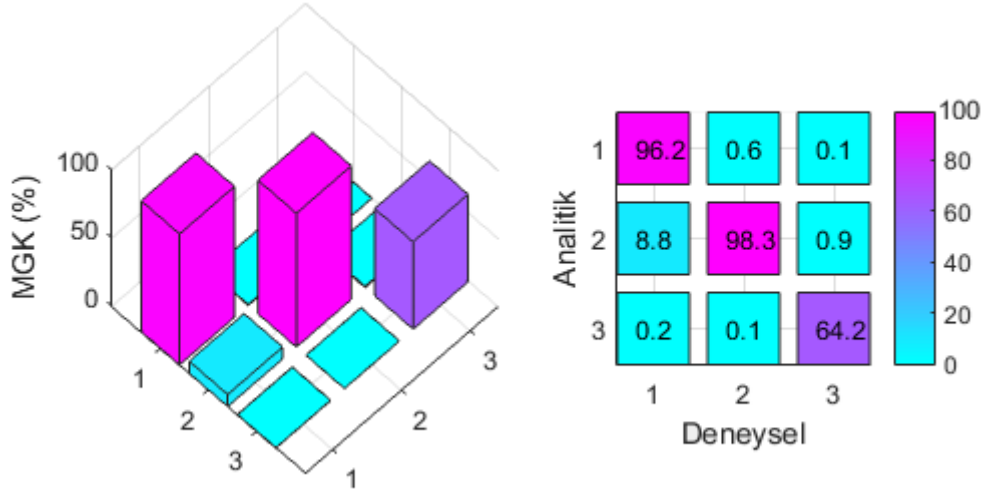


Şekil 2.39. Çerçeve modelinin hasarsız durumuna ait yerel güncelleme ile elde edilen parametre değişimleri

Tablo 2.20’de betonarme çerçeve modelinin hasarsız durumuna ait yerel güncelleme sonucu ve deneysel olarak elde edilen frekans değerlerinin karşılaştırılması ve MGK değerleri verilmektedir. Tablo 2.20 incelendiğinde frekans değerleri arasındaki maksimum farkın %0.21 olduğu görülmektedir. Ayrıca MGK yüzdeleri Şekil 2.40’da grafiklerle sunulmuştur.

Tablo 2.20. Hasarsız durumdaki betonarme çerçeve modeline ait yerel güncelleme sonucu ve deneysel olarak elde edilen frekans değerlerinin karşılaştırılması

Mod Numarası	Frekans (Hz)			
	GFOA	SEY	Fark (%)	MGK (%)
1	13.898	13.906	+0.05	96.2
2	39.907	39.991	+0.21	98.3
3	123.840	123.870	+0.02	64.2



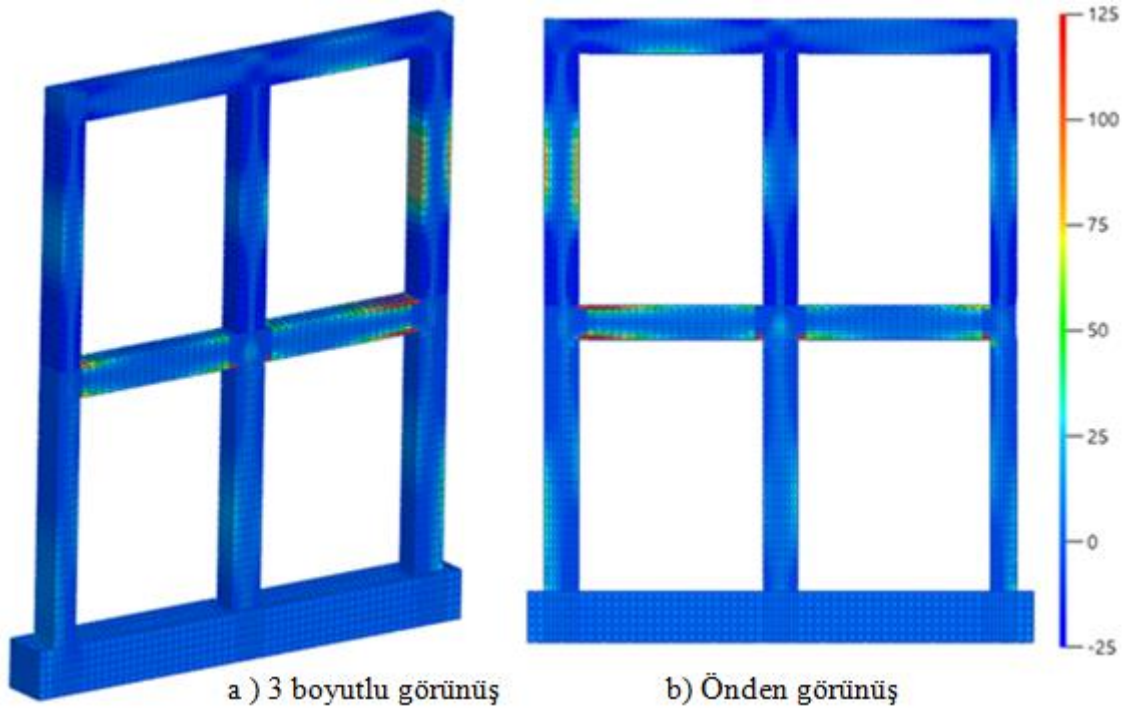
Şekil 2.40. Analitik ve deneysel yolla elde edilen hasarsız duruma ait yerel güncelleme sonrası MGK değerleri

Tablo 2.21’de hasarsız durumdaki betonarme çerçeve modeline ait başlangıç frekans değerleri bütünsel ve yerel güncelleme sonucu elde edilen frekans değerleri ile karşılaştırılmıştır. Tablo 2.21’de genel bir değerlendirme yapıldığında başlangıçta frekans değerleri arasındaki fark maksimum %38.38 iken yapılan bütünsel güncelleme ile bu fark %4.4’e ve sonrasında yerel güncelleme ile %0.21’e kadar indirilmiştir.

Tablo 2.21. Hasarsız durumdaki betonarme çerçeve modeline ait başlangıç durum, bütünsel ve yerel güncelleme sonucu durum ile deneysel olarak elde edilen frekans değerlerinin karşılaştırılması

Mod Numarası	Frekans (Hz)						
	Deneysel Frekanslar (GFOA)	Analitik Frekanslar			Fark (%)	Fark (%)	Fark (%)
		Başlangıç	Bütünsel Güncelleme	Yerel Güncelleme			
1	13.898	18.012	13.629	13.906	29.6	-1.94	0.05
2	39.907	55.225	41.631	39.991	38.38	4.14	0.21
3	123.840	149.470	118.38	123.870	20.7	-4.4	0.02

Şekil 2.41 hasarsız durumdaki betonarme düzlem çerçeveye ait yerel güncelleme ile elde edilen parametre değişimlerinin sonlu eleman modeli üzerindeki görünüşleri verilmektedir. Şekil 2.41 incelendiğinde, sonlu elemanlardaki malzeme özelliklerinin genel anlamda homojen dağılım gösterdiği görülmektedir.



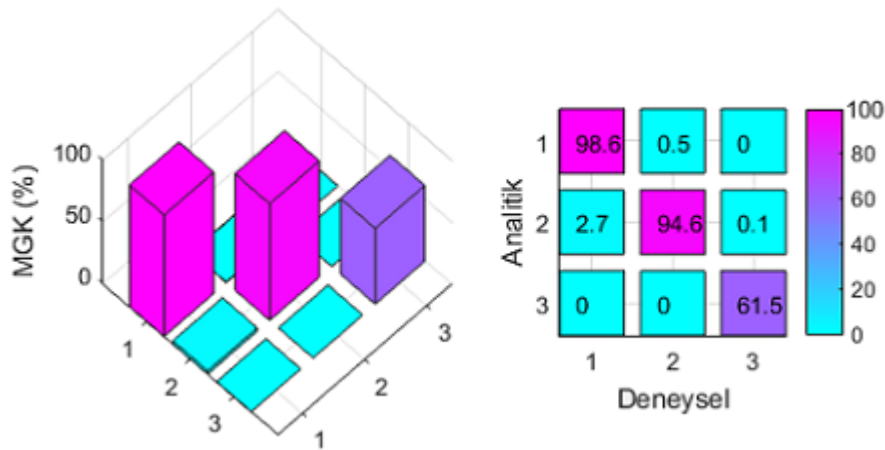
Şekil 2.41. Hasarsız durumdaki betonarme düzlem çerçeve modeline ait Yerel Güncelleme ile elde edilen parametre değişimlerinin sonlu eleman modeli üzerindeki değişimleri

2.4.2. Hasarlı Durumdaki Betonarme Düzlem Çerçevenin Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması

Çalışma kapsamında betonarme çerçeve modeline hasar verilerek yapının dinamik davranışlarında meydana gelen değişiklikler deneysel olarak incelenmişti. Analitik olarak ise hasarsız modele güncelleme yapılarak gerçek modeli temsil etmesi amaçlanmıştır. Gerçek hasarlı modeli temsil etmesi için ise hasarsız güncellenmiş model, başlangıç şartları olarak kabul edilerek tekrar güncellenmiş ve deneysel modelin temsili sağlanmıştır. Tablo 2.22 güncellenen hasarsız sonlu eleman modeli ile hasarlı modelin deneysel ölçümlerinden elde edilen frekans değerleri ve aralarındaki farklılıkları göstermektedir. Tablo 2.22 incelendiğinde, güncellenen hasarsız sonlu eleman modeli ile hasarlı modelin deneysel ölçümlerinden elde edilen frekans değerleri arasındaki maksimum farkın %91.30 olduğu görülmektedir. Şekil 2.42’de MGK yüzdelerinin grafiksel gösterimi verilmektedir.

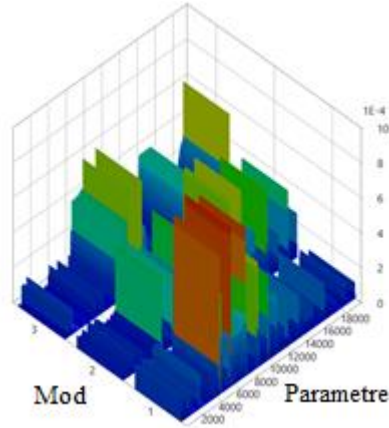
Tablo 2.22. Başlangıç haldeki hasarsız betonarme düzlem çerçeve sonlu eleman modeli ile hasarlı betonarme düzlem çerçeveye ait deneysel frekans değerlerinin karşılaştırılması

Mod Numarası	Frekans (Hz)			
	GFOA	SEY	Fark (%)	MGK (%)
1	7.269	13.906	+ 91.30	98.6
2	23.263	39.991	+71.91	94.6
3	69.293	123.870	+78.76	61.5



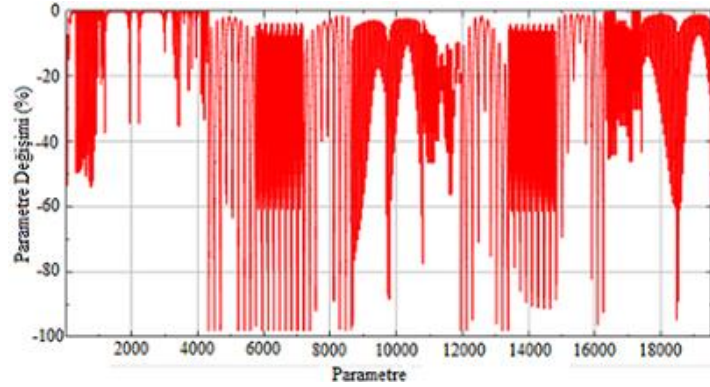
Şekil 2.42. Başlangıç haldeki hasarsız betonarme düzlem çerçeve sonlu eleman modeli ile hasarlı betonarme düzlem çerçeveye ait deneysel mod şekilleri arasındaki MGK değerleri

Tablo 2.22’den de görüldüğü üzere frekanslar arasındaki farklar oldukça yüksektir ve model güncellenmenin uygulanması gerekmektedir. Hasarsız duruma benzer olarak, belirsiz parametre olarak Elastisite Modülü seçilmiş ve bu parametre için alt ve üst limitler sırasıyla -%98 ve %5 olarak belirlenmiştir. Şekil 2.43 hasarlı durumdaki betonarme düzlem çerçeveye ait yerel güncelleme için elde edilen duyarlılık analizi sonuçlarını göstermektedir.



Şekil 2.43. Hasarlı durumdaki betonarme düzlem çerçeveye ait yerel güncelleme için elde edilen duyarlılık analizi sonuçları

Şekil 2.44 hasarlı durumdaki betonarme düzlem çerçeve modeline ait yerel güncelleme ile elde edilen parametre değişimlerini göstermektedir. Şekil 2.44’te parametrelerdeki maksimum değişimin %98 olduğu görülmektedir.

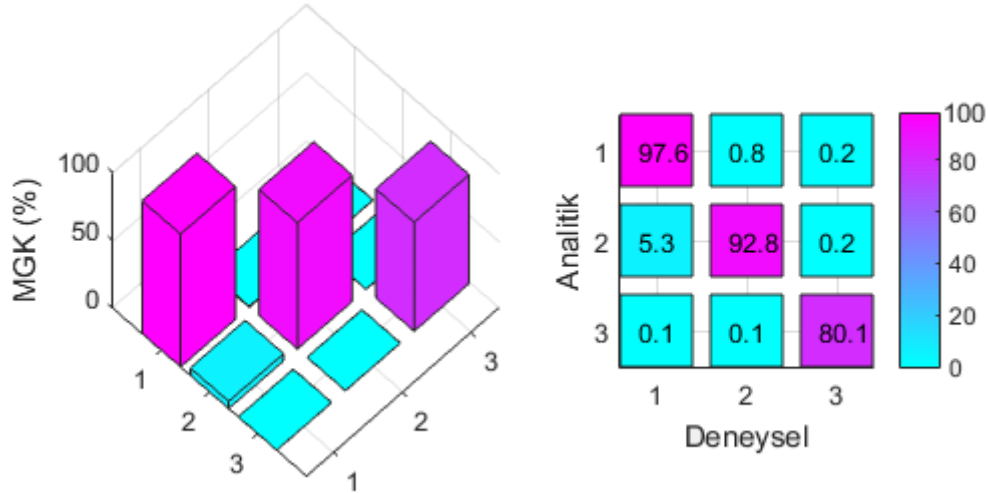


Şekil 2.44. Hasarlı durumdaki betonarme çerçeve modeline ait yerel güncelleme ile elde edilen parametre değişimleri

Tablo 2.23'te hasarlı durumdaki betonarme düzlem çerçeveye ait yerel güncelleme sonucu ve deneysel olarak elde edilen frekansların karşılaştırılması görülmektedir. Tablo 2.23 incelendiğinde, frekans değerleri arasındaki maksimum farkın %0.19 olduğu görülmektedir. MGK değerleri ise 1'e oldukça yaklaşmıştır. Şekil 2.45'te MGK değerleri grafiksel olarak verilmiştir.

Tablo 2.23. Hasarlı durumdaki betonarme düzlem çerçeveye ait yerel güncelleme sonucu ve deneysel olarak elde edilen frekansların karşılaştırılması

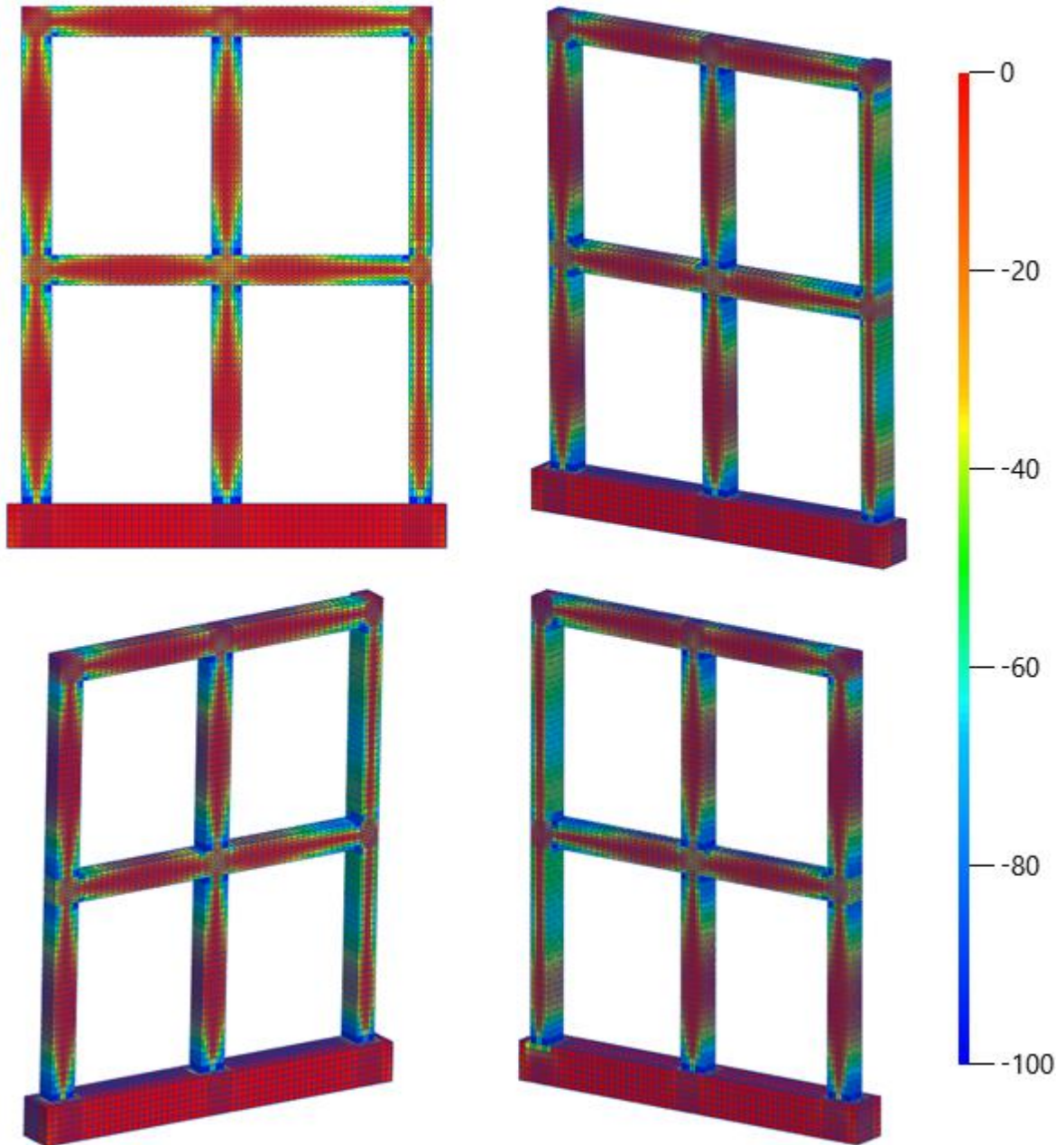
Mod Numarası	Frekans (Hz)			
	GFOA	SEY	Fark (%)	MGK (%)
1	7.269	7.283	+0.19	97.6
2	23.263	23.277	+0.06	92.8
3	69.293	69.304	+0.02	80.1



Şekil 2.45. Yerel güncelleme yapılmış hasarsız betonarme düzlem çerçeve sonlu eleman modeli ile hasarlı betonarme düzlem çerçeveye ait deneysel mod şekilleri arasındaki MGK değerleri

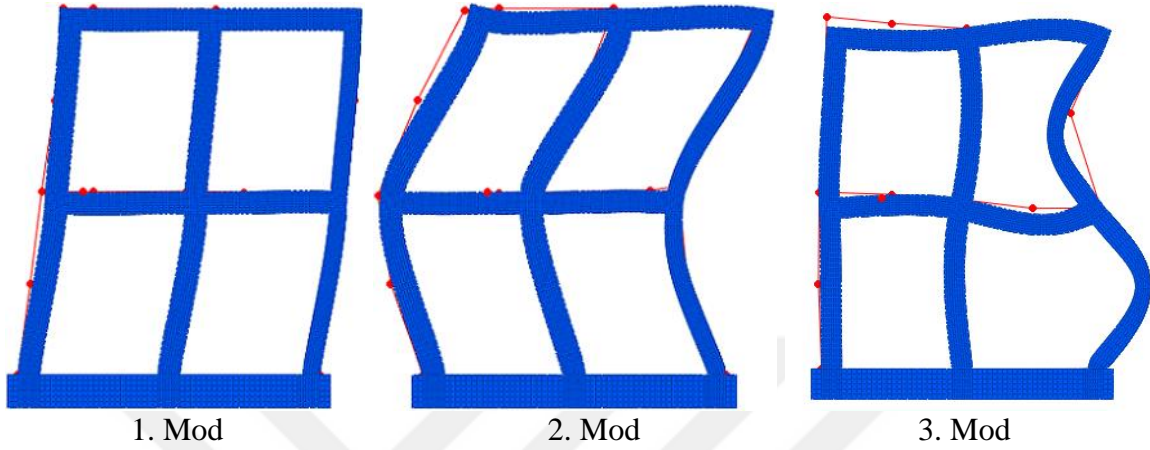
Şekil 2.46'da hasarlı durumdaki betonarme düzlem çerçeveye ait yerel güncelleme ile elde edilen parametre değişimlerinin sonlu eleman modeli üzerindeki görünüşleri verilmektedir. Şekil 2.46 incelendiğinde, sonlu eleman modelinde parametrelerin en büyük değişim gösterdiği bölgelerin kolon-kiriş birleşim bölgelerinde olduğu görülmektedir. Buradan hasarın çok büyük oranda bu bölgelerde meydana geldiği sonucuna

varlabilmektedir. Ayrıca Şekil 2.11 incelendiğinde laboratuvar modeli üzerinde işaretlenen hasar bölgeleriyle Şekil 2.46'da parametrelerin değişim gösterdiği bölgelerin uyumlu olduğu görülmekte ve yapılan güncellemenin deneysel modeli temsil edebileceği söylenebilmektedir.



Şekil 2.46. Hasarlı durumdaki betonarme düzlem çerçeveye ait yerel güncelleme ile elde edilen parametre değişimlerinin sonlu eleman modeli üzerindeki görünüşleri

Şekil 2.47’de hasarlı durumdaki betonarme düzlem çerçeveye ait yerel güncellenmiş analitik modelden ve deney modelinden elde edilen mod şekillerinin üst üste çakıştırıldığında uyumlu olduğu görülmektedir.



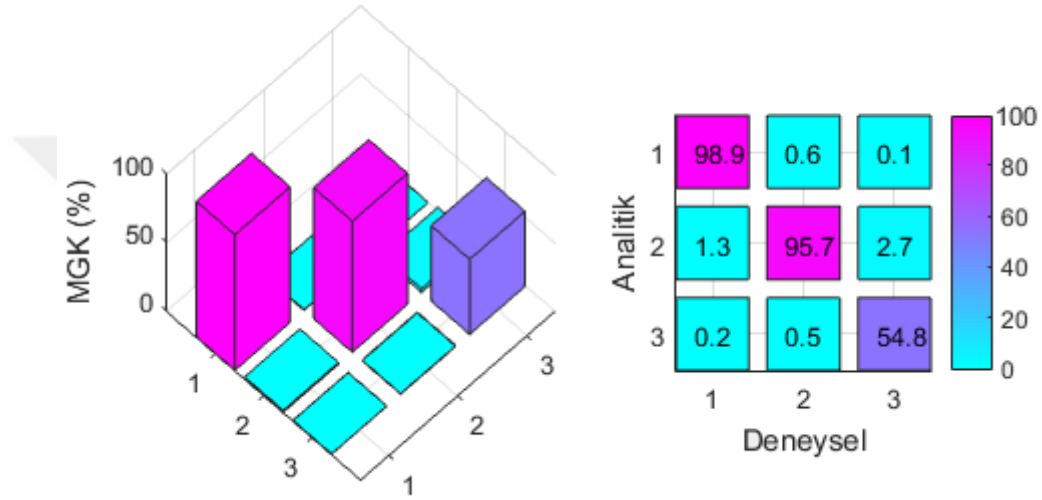
Şekil 2.47. Hasarlı durumdaki betonarme düzlem çerçeveye ait yerel güncellenmiş analitik model ve deney modelinden elde edilen mod şekillerinin çakıştırılması

2.4.3. Onarılmış Durumdaki Betonarme Düzlem Çerçevenin Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması

Onarılmış durumdaki betonarme düzlem çerçeve modelinin deneysel ölçüm sonuçları Bölüm 2.3.3’te verilmişti. Hasarlı durumdaki model için gerçekleştirilen güncelleme sonucunda elde edilen frekans değerleri ile deneysel olarak elde edilen onarılmış modelin frekans değerleri arasındaki fark Tablo 2.24’te verilmiştir. Tablo 2.24’te görüldüğü üzere frekans değerleri arasındaki maksimum fark %40.05’tir ve frekans değerleri arasındaki farkları düşürmek, analitik modelin deney modelini tam anlamıyla temsil etmesini sağlayabilmek için model güncelleme yapılması gerekmektedir. Tablo 2.24’te verilen değerler yerel güncelleme yapılmadan önceki başlangıç durum içindir. Şekil 2.48’de hasarlı durumdaki yerel güncelleme yapılmış betonarme düzlem çerçeveye ait analitik mod şekilleri ile onarılmış deneysel modelden elde edilmiş mod şekilleri arasındaki MGK değerleri grafiksel olarak gösterilmiştir.

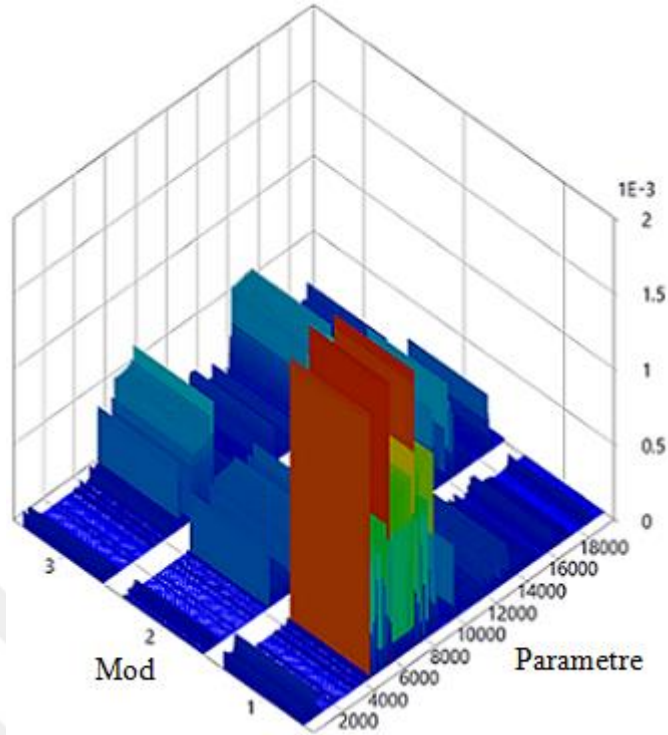
Tablo 2.24. Hasarlı durumdaki yerel güncelleme yapılmış betonarme düzlem çerçeveye ait başlangıç frekans değerleri ve onarılmış modelden deneysel olarak elde edilen frekansların karşılaştırılması

Mod Numarası	Frekans (Hz)			
	GFOA	SEY	Fark (%)	MGK (%)
1	9.895	7.283	-26.40	98.9
2	30.27	23.277	-23.10	95.7
3	115.6	69.304	-40.05	54.8



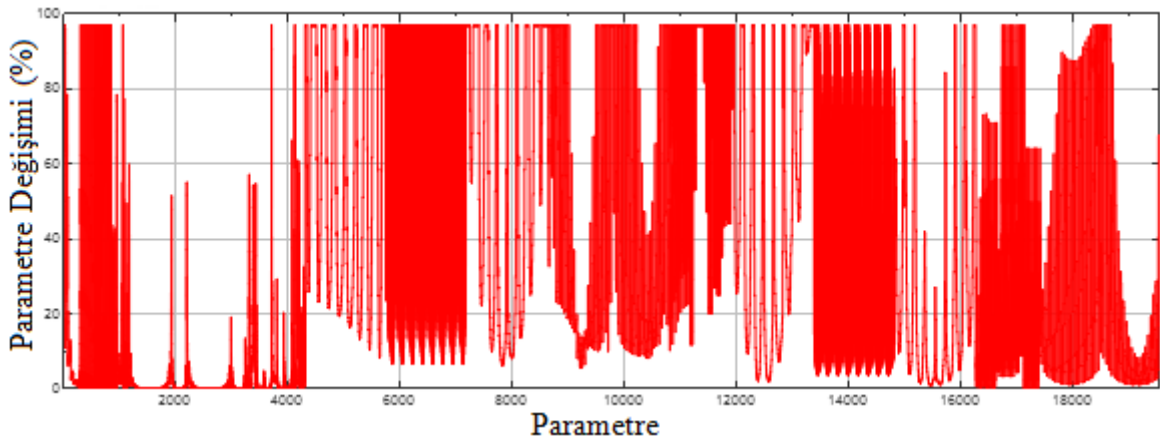
Şekil 2.48. Hasarlı durumdaki yerel güncelleme yapılmış betonarme düzlem çerçeveye ait analitik mod şekilleri ile onarılmış deneysel modelden elde edilen mod şekilleri arasındaki MGK değerleri

Yerel güncelleme yaparken belirsiz parametre olarak Elastisite Modülü seçilmiş ve bu parametre için alt limit sıfır, üst limit %97 olarak belirlenmiştir. Şekil 2.49 onarılmış durumdaki betonarme düzlem çerçeveye ait yerel güncelleme için elde edilen duyarlılık analizi sonuçlarını göstermektedir.



Şekil 2.49. Onarılmış durumdaki betonarme düzlem çerçeveye ait yerel güncelleme için elde edilen duyarlılık analizi sonuçları

Şekil 2.50 onarılmış durumdaki betonarme düzlem çerçeveye ait yerel güncelleme ile elde edilen parametre değişimlerini göstermektedir. Şekil 2.50’de görülen parametrelerdeki maksimum değişim %97’dir.

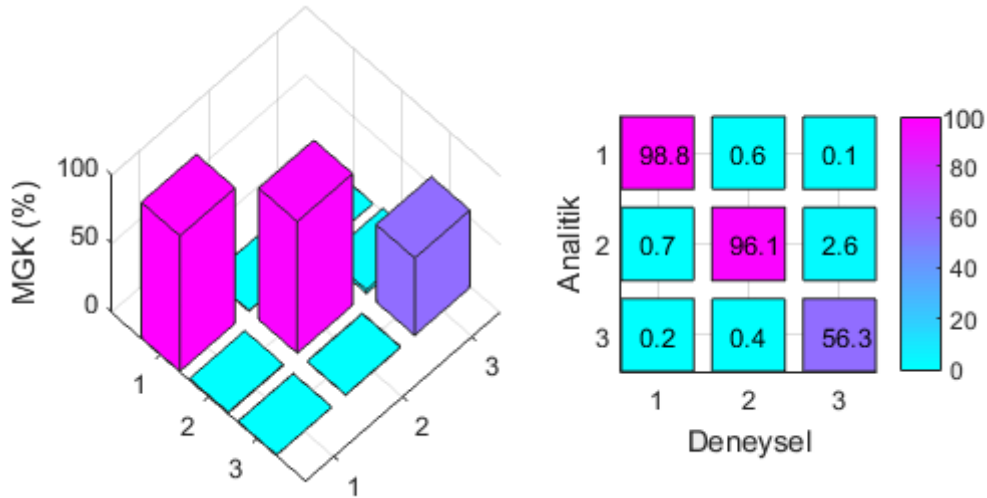


Şekil 2.50. Onarılmış durumdaki betonarme çerçeve modeline ait yerel güncelleme ile elde edilen parametre değişimleri

Tablo 2.25'te onarılmış durumdaki betonarme düzlem çerçeveye ait yerel güncelleme sonucu ve deneysel olarak elde edilen frekansların karşılaştırılması verilmektedir. Tablo 2.25 incelendiğinde, frekans değerleri arasındaki maksimum fark %0.98 olarak elde edilmiştir. MGK değerlerinde başlangıç durumuna kıyasla bir artışla %100'e yaklaşma görülmektedir. Şekil 2.51'de yerel güncelleme yapılan onarılmış modelin mod şekilleri ile onarılmış olan deney modelinden elde edilen mod şekilleri arasındaki MGK değerleri grafiksel olarak verilmiştir.

Tablo 2.25. Onarılmış durumdaki betonarme düzlem çerçeveye ait yerel güncelleme sonucu ve deneysel olarak elde edilen frekansların karşılaştırılması

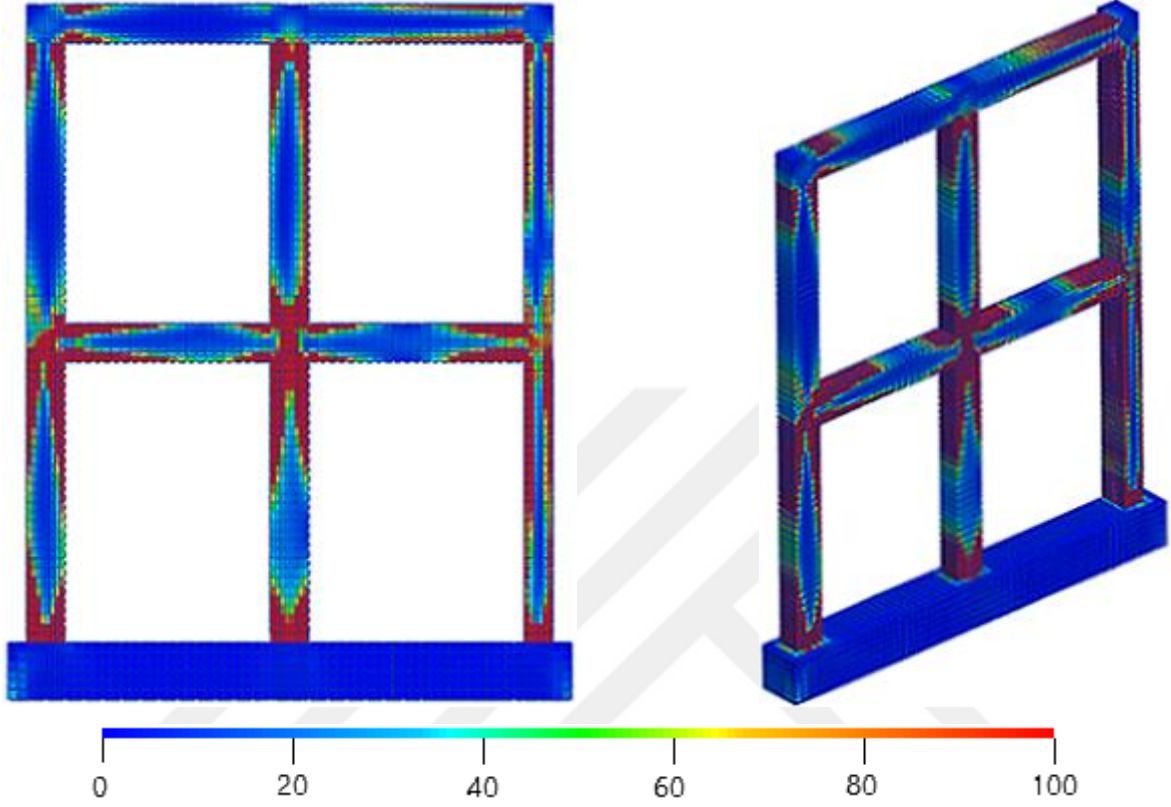
Mod Numarası	Frekans (Hz)			
	GFOA	SEY	Fark (%)	MGK (%)
1	9.895	9.9673	-0.73	98.8
2	30.27	30.568	-0.98	96.1
3	115.6	116.38	-0.67	56.3



Şekil 2.51. Yerel güncelleme yapılan onarılmış modelin mod şekilleri ile onarılmış olan deney modelinden elde edilen mod şekilleri arasındaki MGK değerleri

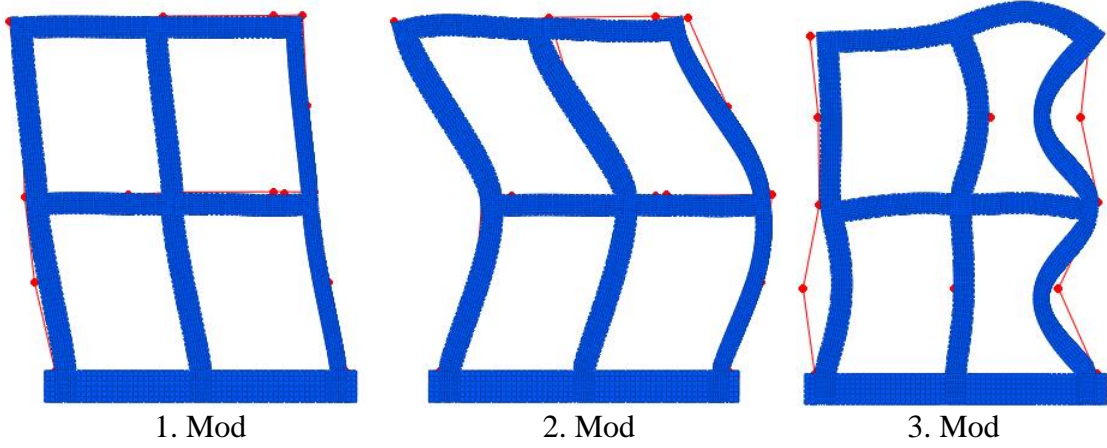
Şekil 2.52'de onarılmış durumdaki betonarme düzlem çerçeveye ait yerel güncelleme ile elde edilen parametre değişimlerinin sonlu eleman modeli üzerindeki görüntüleri verilmektedir. Şekil 2.52 incelendiğinde, sonlu eleman modelinde parametrelerin en büyük değişim gösterdiği bölgelerin kolon-kiriş birleşim bölgelerinde olduğu görülmektedir.

Buradan onarımın çok büyük oranda bu bölgelerde meydana geldiği sonucuna varılabilmektedir.



Şekil 2.52. Onarılmış durumdaki betonarme düzlem çerçeveye ait yerel güncelleme ile elde edilen parametre değişimlerinin sonlu eleman modeli üzerindeki görünüşleri

Şekil 2.53'te onarılmış durumdaki betonarme düzlem çerçevenin yerel güncelleme yapılarak elde edilen mod şekilleri ile deneysel olarak elde edilen mod şekillerinin karşılaştırıldığı görülmektedir. Şekil 2.53'te ilk iki modun uyum içinde olduğu üçüncü mod şekillerinin ise farklılıklar gösterdiği görülmektedir.



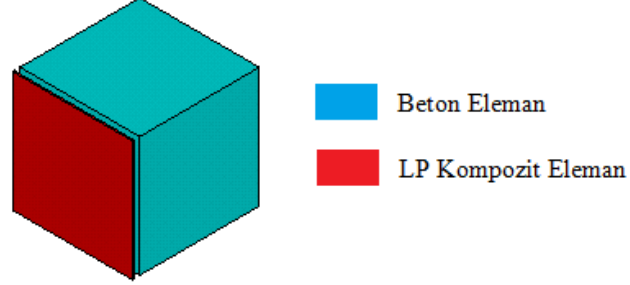
Şekil 2.53. Onarılmış durumdaki betonarme düzlem çerçevenin yerel güncelleme ile elde edilen mod şekilleri ve deneysel olarak elde edilen mod şekillerinin karşılaştırılması

2.4.4. Güçlendirilmiş Durumdaki Betonarme Düzlem Çerçevenin Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması

Laboratuvar ortamındaki betonarme düzlem çerçeve modeline hem hasar verilerek hem de verilen hasardan sonra onarılarak iki durum için de dinamik karakteristiklerin başlangıç duruma göre değişimi analitik ve deneysel olarak daha önce incelenmiştir. Bu bölümde ise güçlendirilmiş duruma ait deneysel olarak elde edilen dinamik karakteristiklerin analitik olarak da elde edilmesiyle modelin doğru bir şekilde temsili ve güçlendirmenin dinamik davranış üzerindeki etkilerini görebilmek hedeflenmiştir.

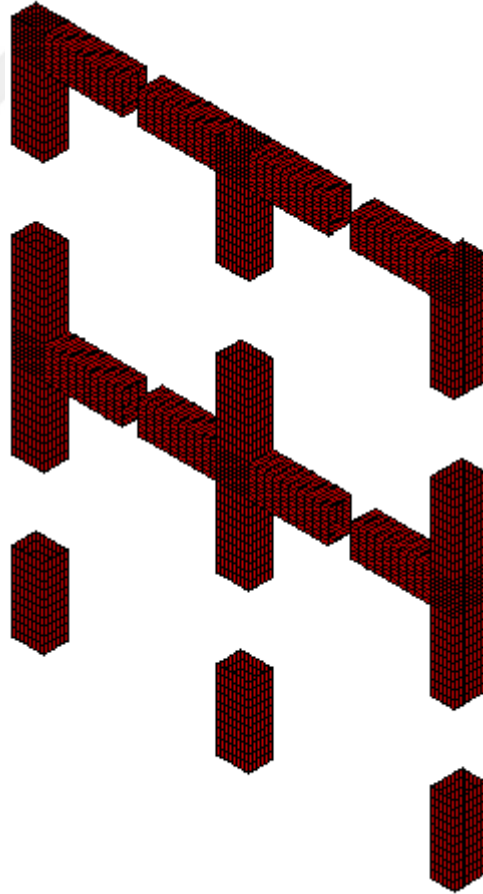
Analitik model ANSYS programında oluşturulmuştur. Betonarme düzlem çerçevenin onarılmış hali yerel güncelleme yapılarak deneysel modeli temsil etmesi sağlandıktan sonra sonlu eleman modeli LP kompozit kumaş ile sargılanarak güçlendirilmiştir. Sargılama işleminde LP kumaş eleman yüzeylerine 3 kat olarak ve 50 cm uzunluğunda uygulanmıştır. LP kompozit kumaşın modellenmesinde SHELL41 elemanı kullanılmıştır. SHELL41 elemanı sekiz düğüm noktasına sahip olup, her düğüm noktasında üç ötelenme serbestlik derecesine sahiptir. SHELL41 elemanı düzlem içi rijitliğe sahip olup, düzlem dışı rijitliği yoktur. Eleman sadece çekme ya da basınç gerilmesi taşıma özelliğine sahiptir. Modellemede kullanılan LP kumaş için Tablo 2.11'in ikinci sütununda verilen malzeme özellikleri dikkate alınmıştır. Ayrıca karbon LP kumaşın özgül ağırlığı 1820 kg/m^3 , 3 kat uygulanacak olan LP kumaşın kalınlığı ise 0.333 mm olarak dikkate alınmıştır. Güçlendirilecek olan kolon ve kiriş elemanların yüzeylerine LP kumaş tek tabaka (0.333 mm) halinde tanımlanmıştır. LP kompozit tabaka ile beton arasında tam aderans olduğu

kabul edilmiştir. Bu amaçla beton ve LP kompozit tabakaların sonlu eleman ağ boyutları aynı seçilerek düğüm noktaları çakıştırılmıştır (Şekil 2.54).



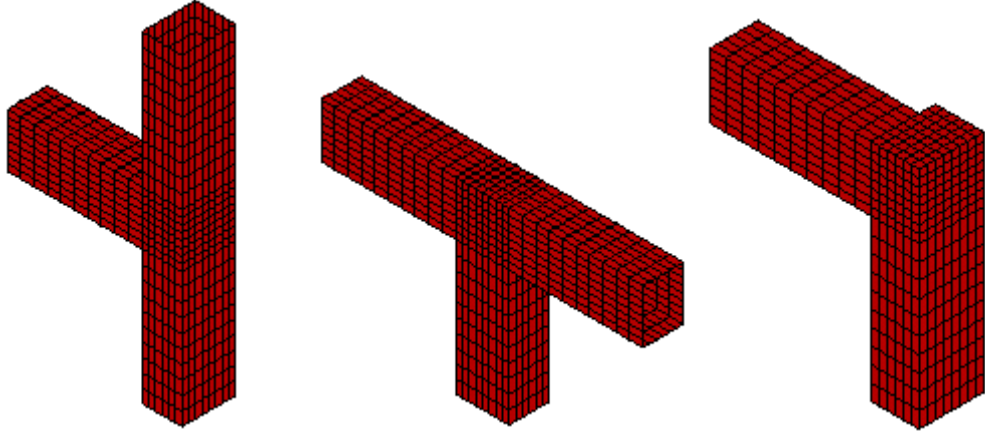
Şekil 2.54. Beton ve LP kompozit tabakanın sonlu eleman modeli

LP kompozit kumaş için SHELL41 elemanı kullanılarak oluşturulan alanlar Şekil 2.55'te verilmektedir.

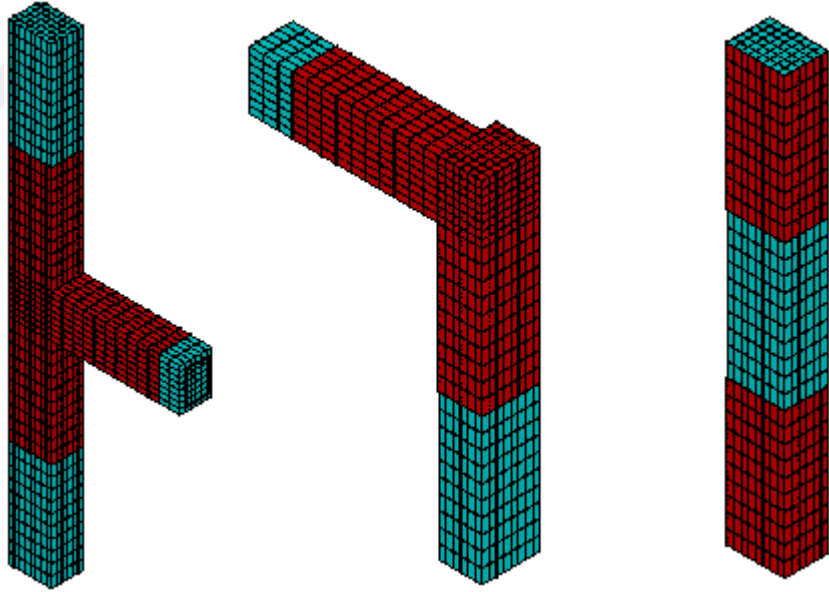


Şekil 2.55. Betonarme çerçeve modelin güçlendirilmesinde SHELL41 elemanı ile oluşturulan alanlar

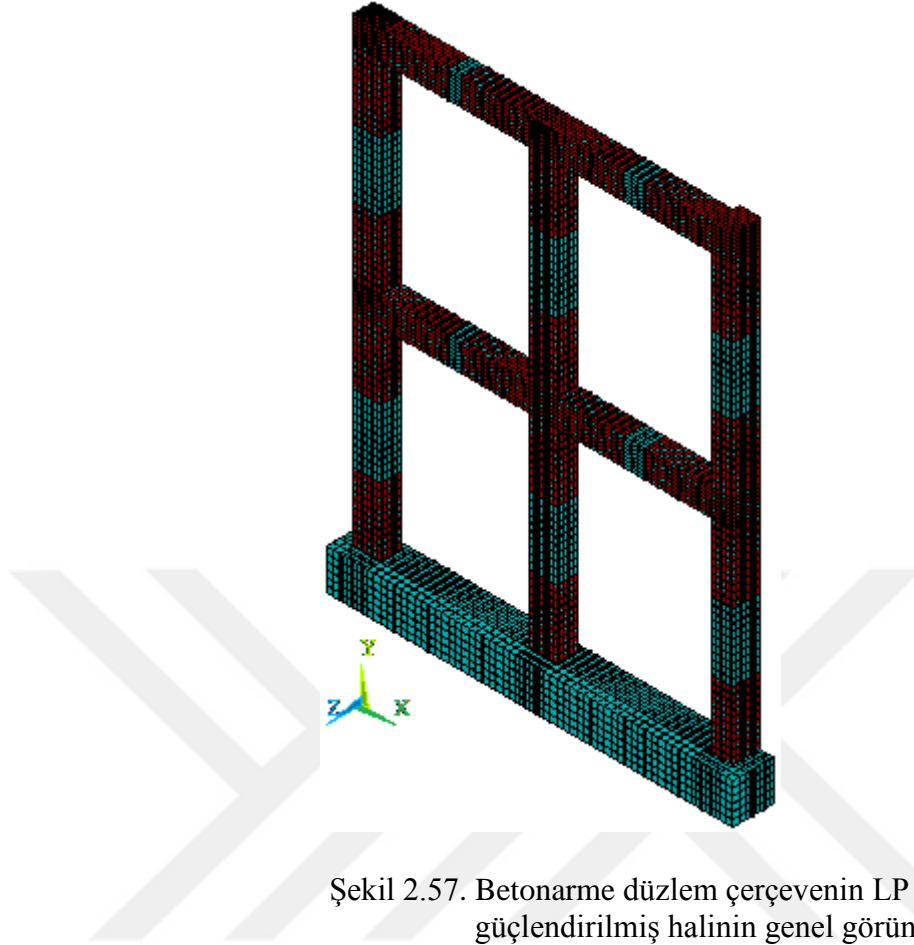
Şekil 2.55'in devamı



LP kompozit kumaş ile sargılanmış bazı elemanların görünümü Şekil 2.56'da, genel görünüm ise Şekil 2.57'de verilmektedir. Şekil 2.56 ve Şekil 2.57'de görüldüğü gibi kolon ve kiriş elemanlar LP kompozit kumaşla sargılanarak güçlendirilmiştir.



Şekil 2.56. Betonarme düzlem çerçevenin LP kumaşla güçlendirilmiş bazı elemanlarının görünümü

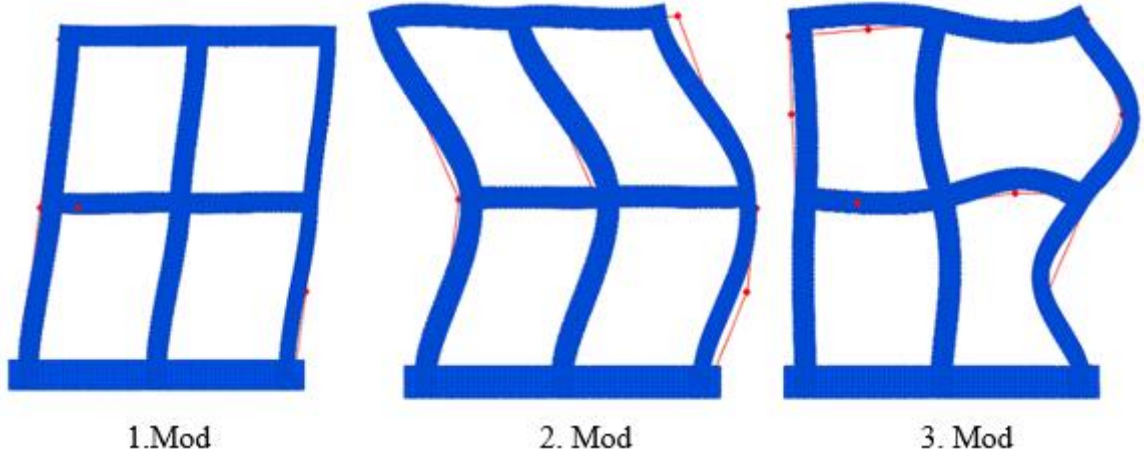


Şekil 2.57. Betonarme düzlem çerçevenin LP kumaşla güçlendirilmiş halinin genel görünümü

Betonarme düzlem çerçevenin güçlendirilmesi durumunda elde edilen analitik ve deneysel dinamik karakteristiklerin karşılaştırılması Tablo 2.26’da verilmektedir. Tablo 2.26 incelendiğinde, betonarme düzlem çerçevenin güçlendirilmesinden sonra analitik olarak ve deneysel olarak elde edilen frekanslar arasındaki maksimum farkın %8.73 olduğu görülmektedir. MGK değerleri ise 1 değerine oldukça yakındır. Betonarme çerçeve modelinin güçlendirilmesinden sonra elde edilen analitik mod şekillerinin deneysel mod şekilleriyle uyumlu olduğu görülmektedir (Şekil 2.58).

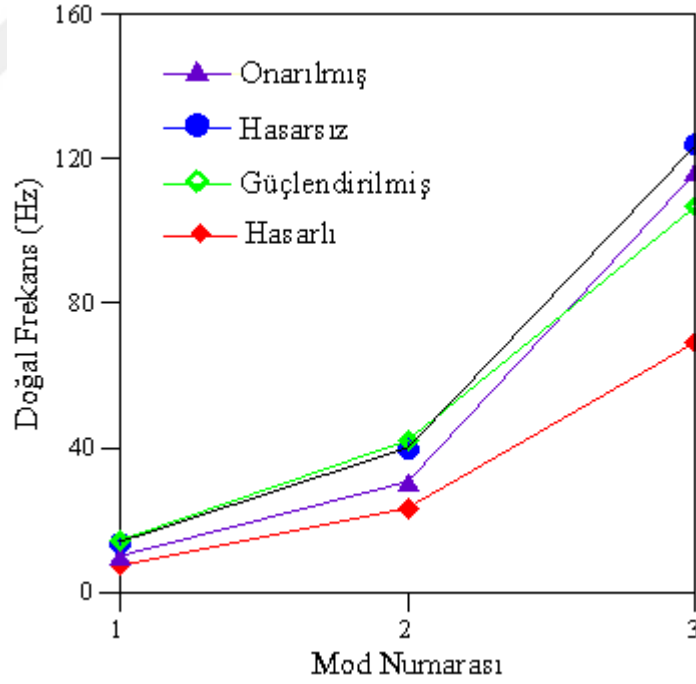
Tablo 2.26. Betonarme düzlem çerçevenin güçlendirilmesinden sonra analitik olarak ve deneysel olarak elde edilen frekansların karşılaştırılması

Mod Numarası	Frekans (Hz)			
	GFOA	SEY	Fark (%)	MGK (%)
1	13.14	14.287	+8.73	97.2
2	43.12	42.010	-2.57	93.2
3	113.9	106.930	-6.12	85.8



Şekil 2.58. Betonarme çerçeve modelinin güçlendirilmesinden sonra elde edilen analitik ve deneysel mod şekillerinin karşılaştırılması

Gerçekleştirilen analitik çalışmalar sonucunda elde edilen frekans değerlerindeki değişimler Şekil 2.59'da karşılaştırmalı olarak verilmektedir.



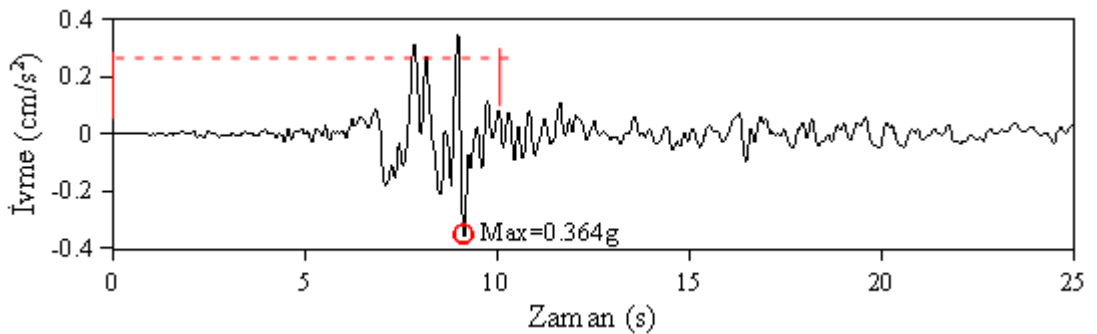
Şekil 2.59. Hasarsız, hasarlı, onarılmış ve güçlendirilmiş durumlardan elde edilen frekans değerlerinin karşılaştırılması

2.4.5. Betonarme Düzlem Çerçeve Modelinin Doğrusal Olmayan Dinamik Davranışlarının Belirlenmesi

Bu bölümde model çerçevenin hasarsız, hasarlı, onarılmış ve güçlendirilmiş durumlarının doğrusal olmayan dinamik davranışları incelenmiştir. Dinamik analizler başlangıç parametrelere sahip hasarsız model, bütünsel güncellenen hasarsız model ve yerel güncelleme yapılan hasarsız, hasarlı, onarılmış, güçlendirilmiş modeller için gerçekleştirilmiştir. Burada amaç model çerçeveye verilen hasar, sonrasında çerçevenin onarım ve güçlendirme aşamaları için yerdeğiştirme, gerilme ve şekildeğiştirme değerlerindeki değişimi incelemektir.

Doğrusal olmayan dinamik analizlerde yer hareketi olarak 1999 yılında meydana gelen Kocaeli depreminin yatay bileşeni çerçeve modeline 0.01 saniyelik zaman adımlarıyla uygulanmıştır. Analizlerde deprem kaydının etkili olduğu ilk 10 saniyelik kısmı dikkate alınmıştır. Kocaeli depreminin yatay bileşeninin ivme kaydı Şekil 2.60'da verilmiştir.

Dinamik hareket denkleminin çözümünde Newmark Yöntemi kullanılmıştır. Analizlerde Rayleigh sönüm katsayıları başlangıç sonlu eleman modelinde ve iki yerel güncelleme yapılmış güçlendirilmiş sonlu eleman modelinden biri için %5 sönüm oranı, diğer güncellenen sonlu eleman modelleri için ise deneysel ölçümler sonucunda elde edilen sönüm oranları için hesaplanarak dikkate alınmıştır. Betonarme düzlem çerçeve modeli için sönüm oranları GFOA yönteminden birinci mod için elde edilen sönüm oranları alınarak belirlenmiştir.



Şekil 2.60. Kocaeli depreminin yatay bileşeninin ivme kaydı

Analizlerde betonun doğrusal olmayan malzeme davranışı Drucker-Prager malzeme modeli ile temsil edilmiştir. Drucker-Prager malzeme modeli betonun kohezyon, içsel

sürtünme açısı ve plastik akış açısı değerlerinin programa girilmesiyle tanımlanmıştır. Betonun içsel sürtünme açısı 32° seçilmiştir (Lubliner vd., 1989; Doran vd., 1998; Özcan, 2010). Betonun kohezyon değeri ise denklem (1.61) kullanılarak hesaplanmıştır. Model çerçeve için 3.1 MPa kohezyon değeri kullanılmıştır. Analizlerde plastik akış açısı değeri sıfır olarak dikkate alınmıştır.

Betonun üç eksenli gerilme altında kırılma şeklini tanımlamak için William ve Warnke (1974) tarafından geliştirilen kırılma modeli kullanılmıştır. Bu modelin tanımlanabilmesi için altı parametreye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu parametrelerin ikisi betonun basınç ve çekme dayanımlarıdır. Diğerleri ise betonun basınç dayanımına bağlı olarak hesaplanan parametrelerdir. Bu parametreler ile ilgili detaylı bilgiler Bölüm 1.5.3.2’de verilmiştir. William-Warnke kırılma modelinde açık ve kapalı çatlaklar için kayma transfer katsayılarının tanımlanması gerekmektedir. Analizlerde çatlak yüzeylerinin temas halinde olmadığı açık çatlaklarda kayma transfer katsayısı 0.5 olarak, çatlak yüzeylerinin temas halinde olduğu kapalı çatlaklarda ise 1 olarak dikkate alınmıştır.

Analizlerde yakınsama toleransı kuvvet ve yerdeğiştirme kontrollü sağlanmıştır. Kuvvet toleransı 0.005, yerdeğiştirme toleransı ise 0.05 olarak dikkate alınmıştır.

Donatının tanımlanmasında gerilme ile birim deformasyon arasındaki ilişkiyi iki doğru ile ifade eden izotropik pekleşmeli plastisite modeli (Bilinear isotropic hardening) kullanılmıştır. Çeliğin akma dayanımı 420 MPa olarak dikkate alınmıştır.

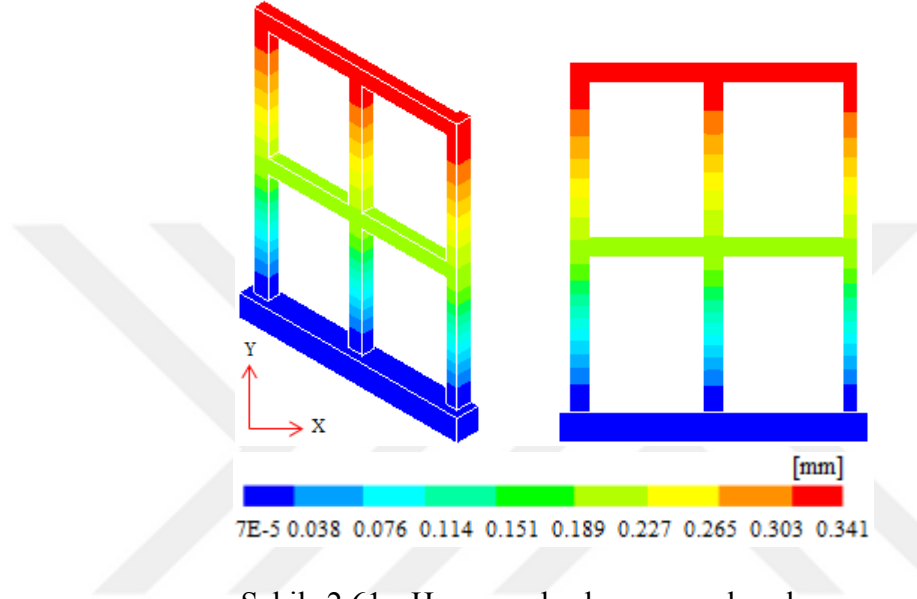
ANSYS’de LP kompozit malzemeler izotropik ve ortotropik olarak tanımlanabilmektedir. Tek yönlü LP kompozit malzemelerin izotropik veya ortotropik tanımlanmasının elde edilen sonuçlar üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı bilinmektedir. LP kompozit malzemeler maksimum çekme gerilmesine kadar lineer elastik davranış göstermektedirler. Analizlerde LP kompozit malzeme izotropik lineer-elastik davranış gösterecek şekilde tanımlanmıştır.

2.4.5.1. Hasarsız Başlangıç Sonlu Eleman Modelinin Doğrusal Olmayan Dinamik Analizi

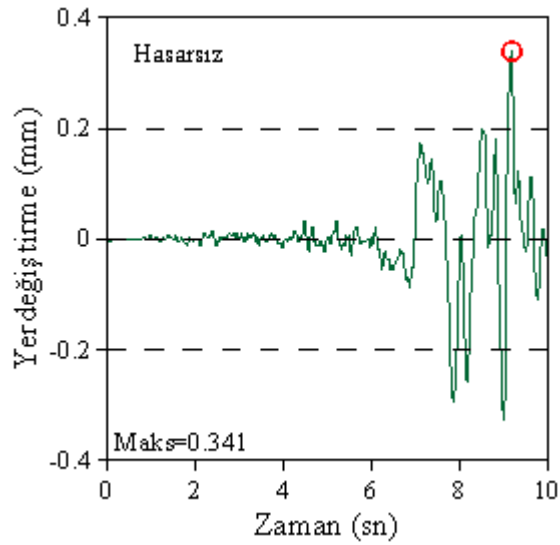
2.4.5.1.1. Yerdeğiştirmeler

Hasarsız başlangıç sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen yerdeğiştirme kontur diyagramı Şekil 2.61’de verilmektedir. Bu kontur diyagramı model

çerçeve üzerinde maksimum yerdeğiştirme meydana geldiği andaki yerdeğiştirme dağılımını göstermektedir. Şekil 2.61 incelendiğinde yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca arttığı görülmektedir. Hasarsız başlangıç sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen maksimum yerdeğiştirmenin zamanla değişimi Şekil 2.62’de verilmektedir. Şekil 2.62’de görüldüğü üzere maksimum yerdeğiştirme 0.341 mm’dir.



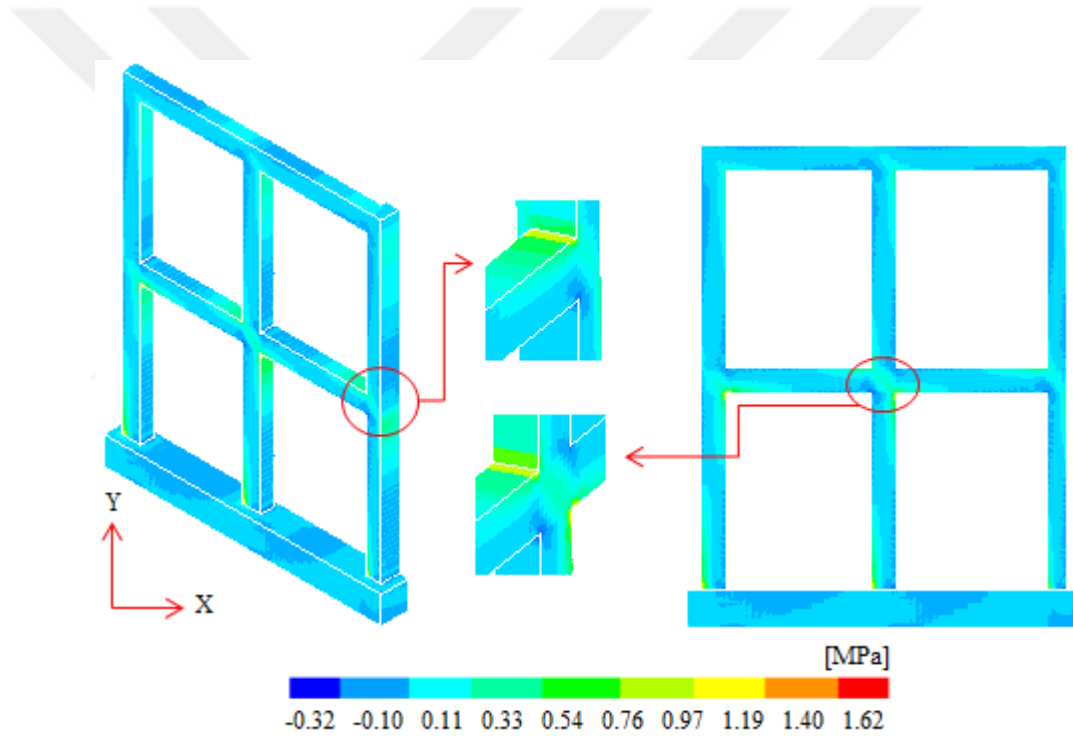
Şekil 2.61. Hasarsız başlangıç sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen yerdeğiştirme kontur diyagramları



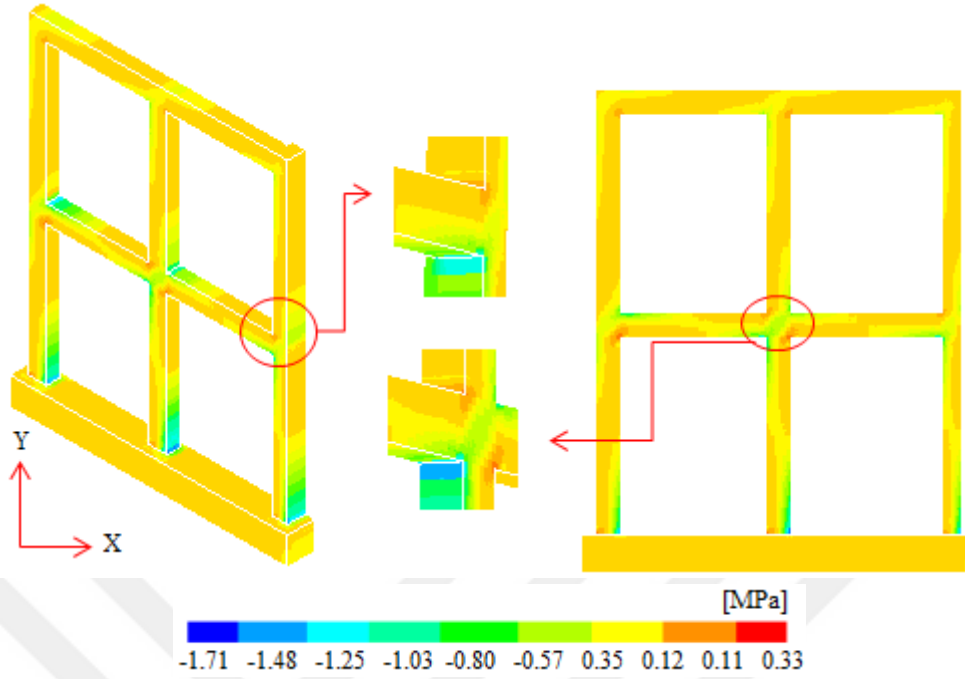
Şekil 2.62. Hasarsız başlangıç sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen maksimum yerdeğiştirmenin zamanla değişimi

2.4.5.1.2. Asal Gerilmeler

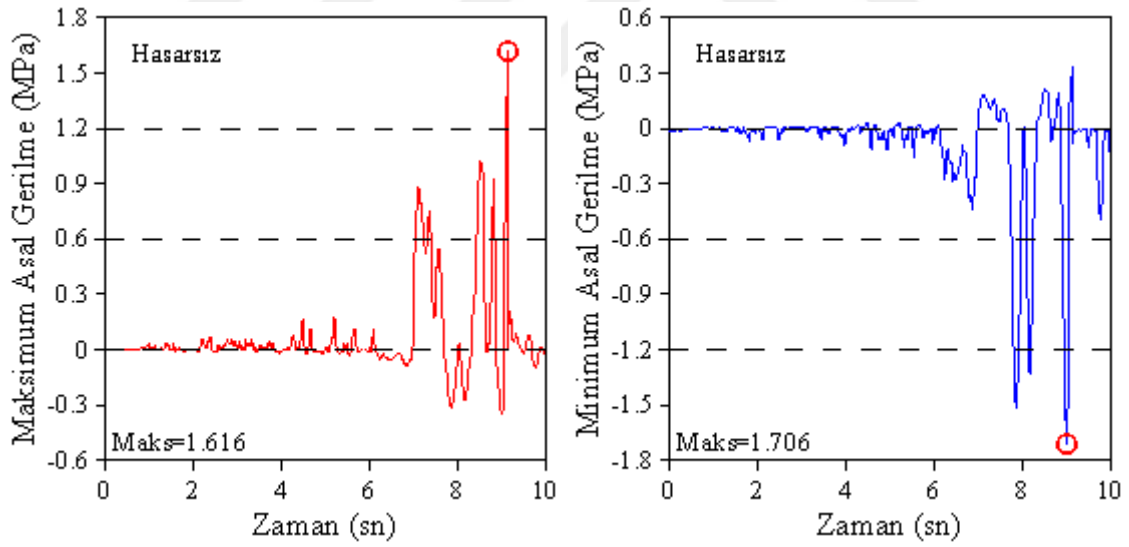
Hasarsız başlangıç sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen maksimum asal gerilme kontur diyagramı Şekil 2.63'te, minimum asal gerilme kontur diyagramı Şekil 2.64'te verilmektedir. Bu kontur diyagramları model çerçeve üzerinde maksimum veya minimum asal gerilme meydana geldiği andaki gerilme dağılımını göstermektedir. Hasarsız başlangıç sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi Şekil 2.65'te verilmektedir. Şekil 2.65'te görüldüğü üzere maksimum asal gerilme değeri 1.616 MPa, minimum asal gerilme değeri ise 1.706 MPa'dır.



Şekil 2.63. Hasarsız başlangıç sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen maksimum asal gerilme kontur diyagramı



Şekil 2.64. Hasarsız başlangıç sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen minimum asal gerilme kontur diyagramı

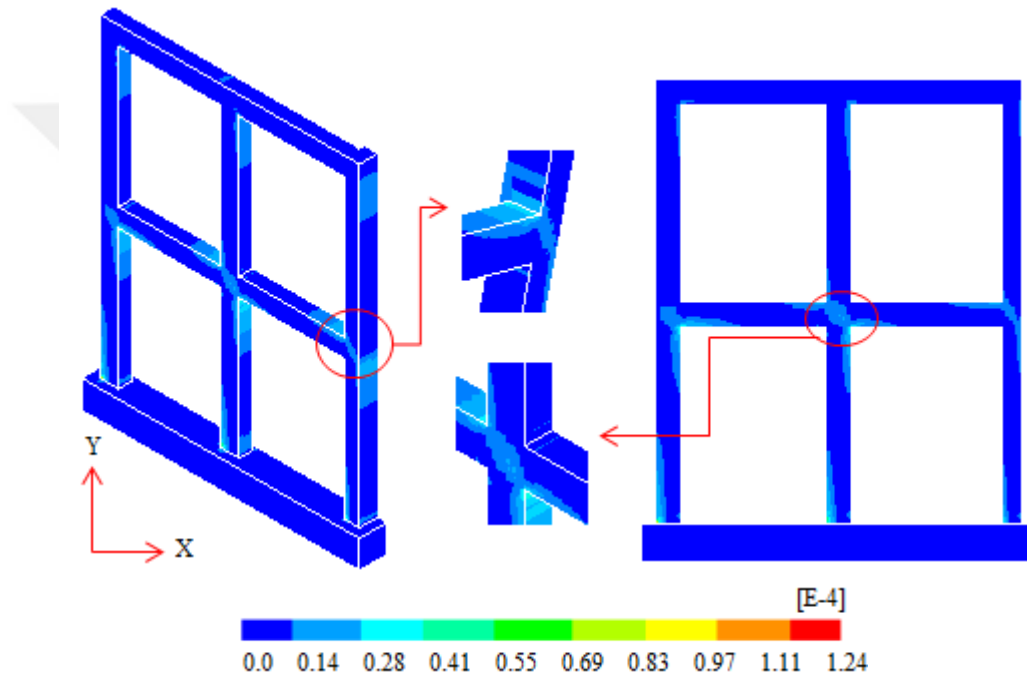


Şekil 2.65. Hasarsız başlangıç sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi

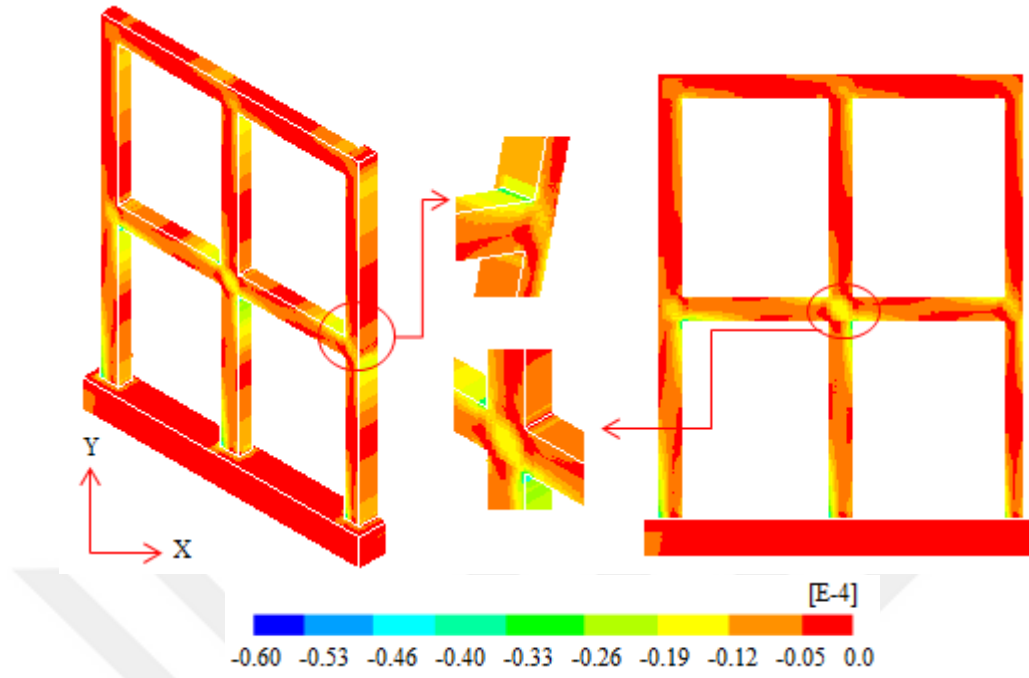
2.4.5.1.3. Asal Şekildeğiştirmeler

Hasarsız başlangıç sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen maksimum asal şekildeğiştirme kontur diyagramı Şekil 2.66'da, minimum asal

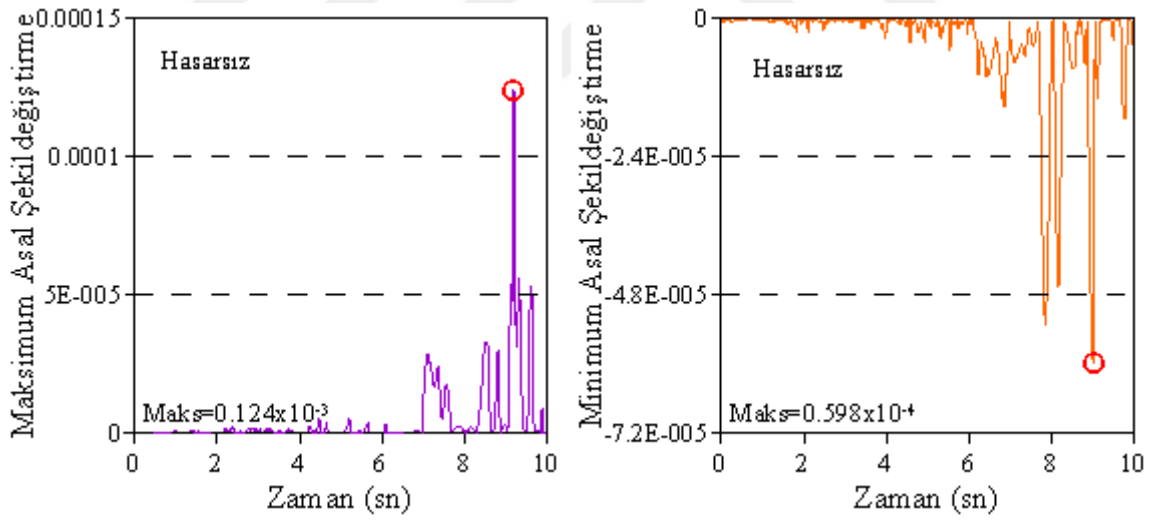
şekildeğiştirme kontur diyagramı ise Şekil 2.67’de verilmektedir. Bu kontur diyagramları model çerçeve üzerinde maksimum veya minimum asal şekildeğiştirme meydana geldiği andaki şekildeğiştirme dağılımını göstermektedir. Hasarsız başlangıç sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen maksimum ve minimum asal şekildeğiştirmelerin zamanla değişimi Şekil 2.68’de verilmektedir. Şekil 2.68’de görüldüğü üzere maksimum asal şekildeğiştirme değeri 0.124×10^{-3} , minimum asal şekildeğiştirme değeri ise 0.598×10^{-4} ’tür.



Şekil 2.66. Hasarsız başlangıç sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen maksimum asal şekildeğiştirme kontur diyagramı



Şekil 2.67. Hasarsız başlangıç sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen minimum asal şekildeğiştirme kontur diyagramı

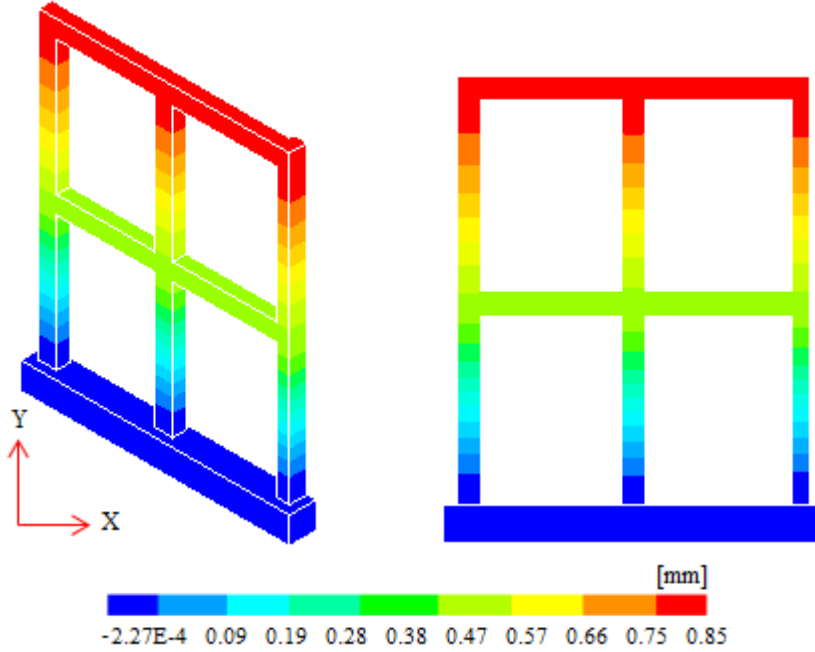


Şekil 2.68. Hasarsız başlangıç sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen maksimum ve minimum asal şekildeğiştirmelerin zamanla değişimi

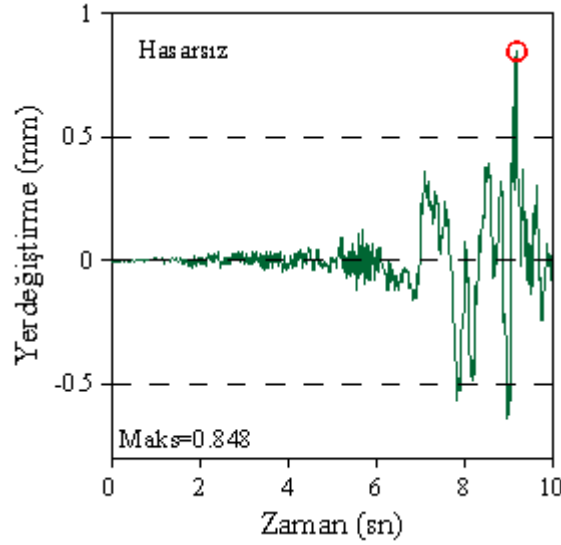
2.4.5.2. Hasarsız Bütünsel Güncelleştirilmiş Sonlu Eleman Modelinin Doğrusal Olmayan Dinamik Analizi

2.4.5.2.1. Yerdeğiştirmeler

Hasarsız bütünsel güncelleştirilmiş sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen yerdeğiştirme kontur diyagramı Şekil 2.69’da verilmektedir. Bu kontur diyagramı model çerçeve üzerinde maksimum yerdeğiştirme meydana geldiği andaki yerdeğiştirme dağılımını göstermektedir. Şekil 2.69 incelendiğinde yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca arttığı görülmektedir. Hasarsız bütünsel güncelleştirilmiş sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen maksimum yerdeğiştirmenin zamanla değişimi Şekil 2.70’te verilmektedir. Şekil 2.70’te görüldüğü üzere maksimum yerdeğiştirme 0.848 mm’dir. Hasarsız başlangıç sonlu eleman modeline göre maksimum yerdeğiştirme değerinde %148.7 oranında bir artış elde edilmiştir.



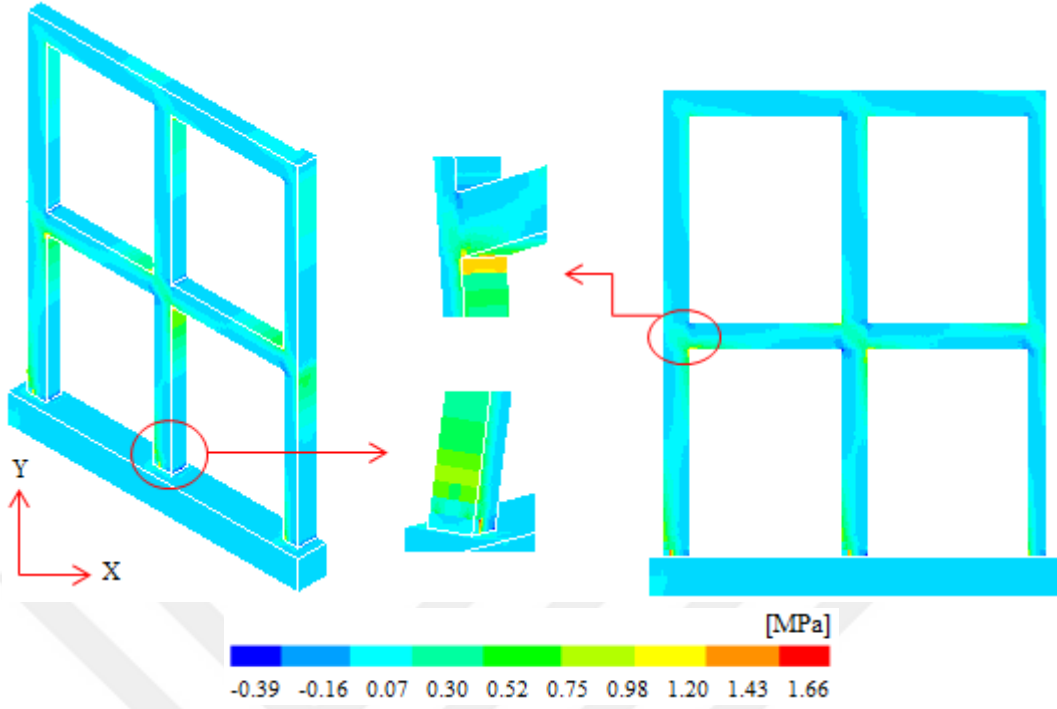
Şekil 2.69. Hasarsız bütünsel güncelleştirilmiş sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen yerdeğiştirme kontur diyagramları



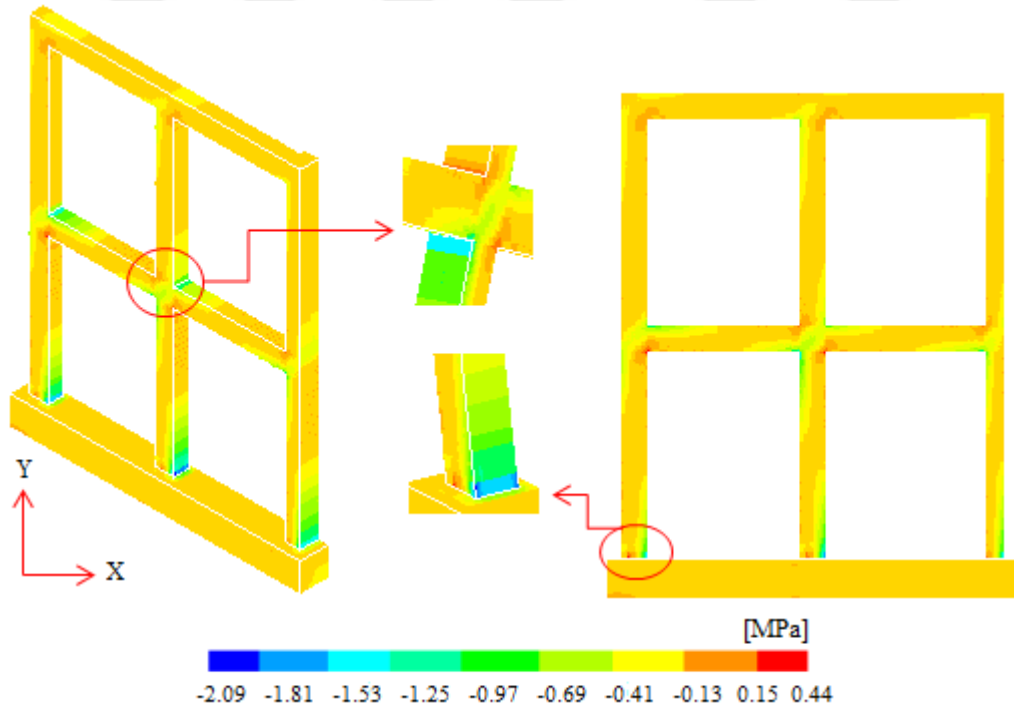
Şekil 2.70. Hasarsız bütünsel güncellenmiş sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen maksimum yerdeğiştirmenin zamanla değişimi

2.4.5.2.2. Asal Gerilmeler

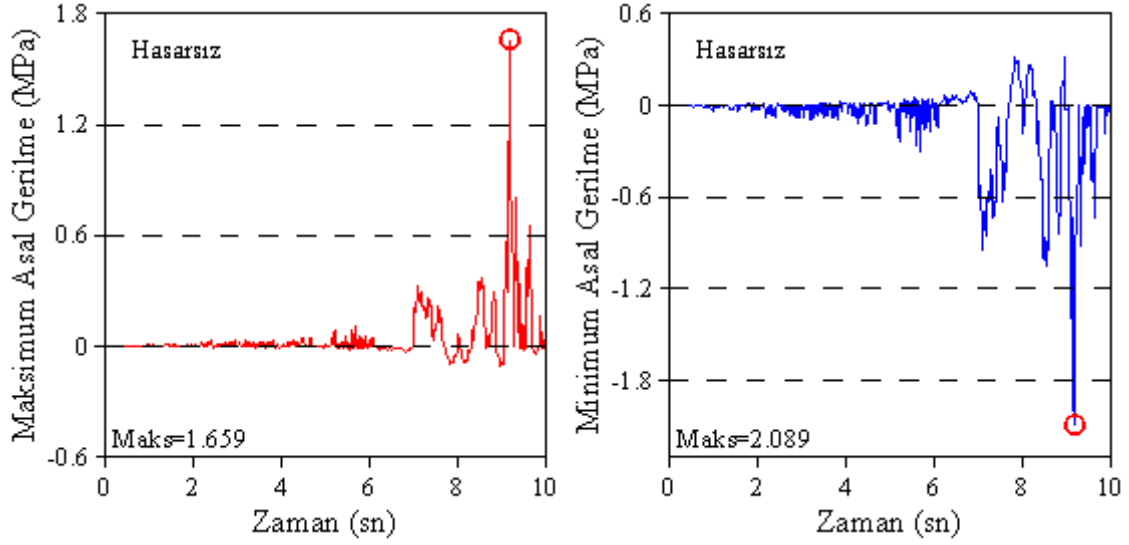
Hasarsız bütünsel güncellenmiş sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen maksimum asal gerilme kontur diyagramı Şekil 2.71’de, minimum asal gerilme kontur diyagramı ise Şekil 2.72’de verilmektedir. Kontur diyagramları model çerçeve üzerinde maksimum veya minimum asal gerilme meydana geldiği andaki gerilme dağılımını göstermektedir. Hasarsız bütünsel güncellenmiş sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi Şekil 2.73’te verilmektedir. Şekil 2.73’te görüldüğü üzere maksimum asal gerilme değeri 1.659 MPa, minimum asal gerilme değeri ise 2.089 MPa’dır. Hasarsız başlangıç sonlu eleman modeline göre maksimum asal gerilme değerinde %2.7, minimum asal gerilme değerinde ise %22.5 oranında bir artış elde edilmiştir.



Şekil 2.71. Hasarsız bütünsel güncelleştirilmiş sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen maksimum asal gerilme kontur diyagramı



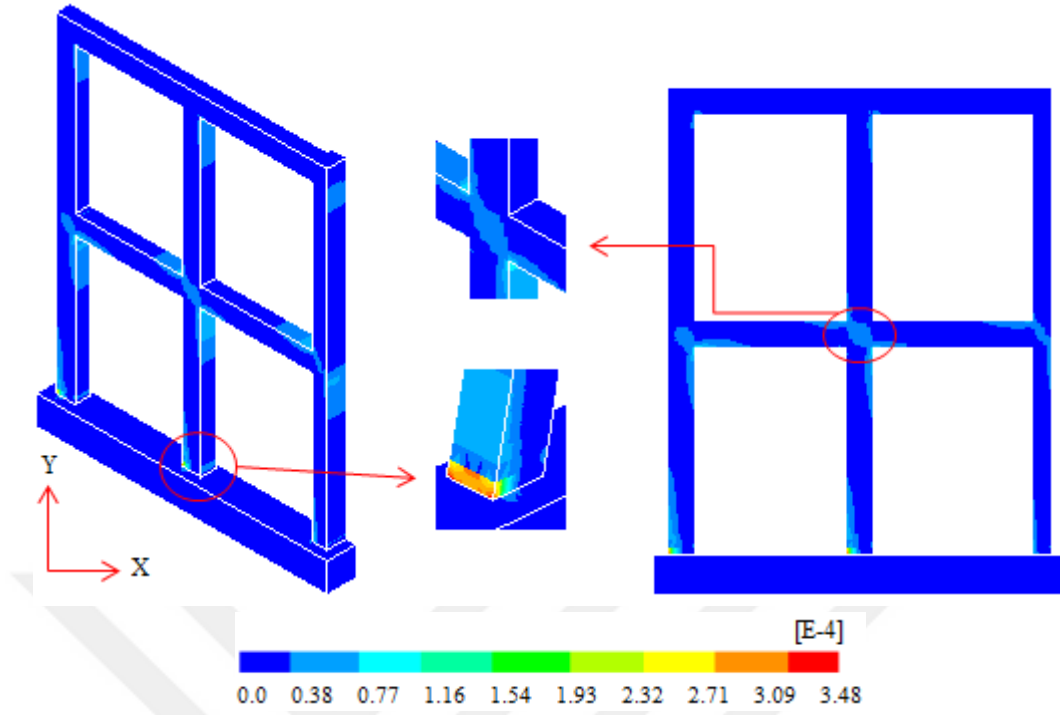
Şekil 2.72. Hasarsız bütünsel güncelleştirilmiş sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen minimum asal gerilme kontur diyagramı



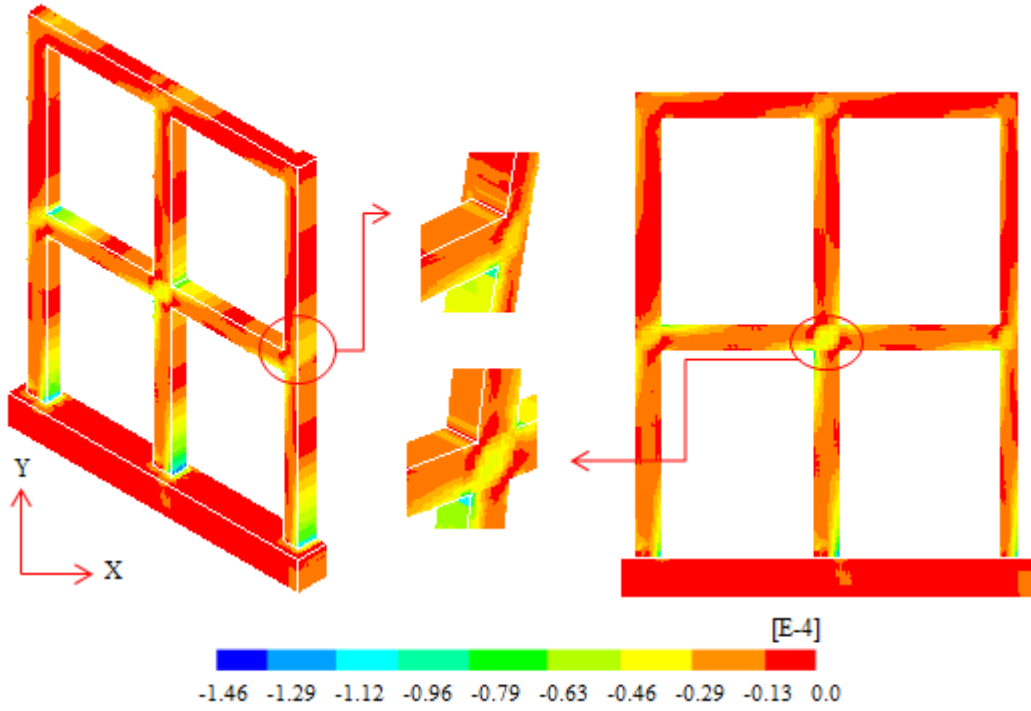
Şekil 2.73. Hasarsız bütünsel güncellenmiş sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi

2.4.5.2.3. Asal Şekildeğiştirmeler

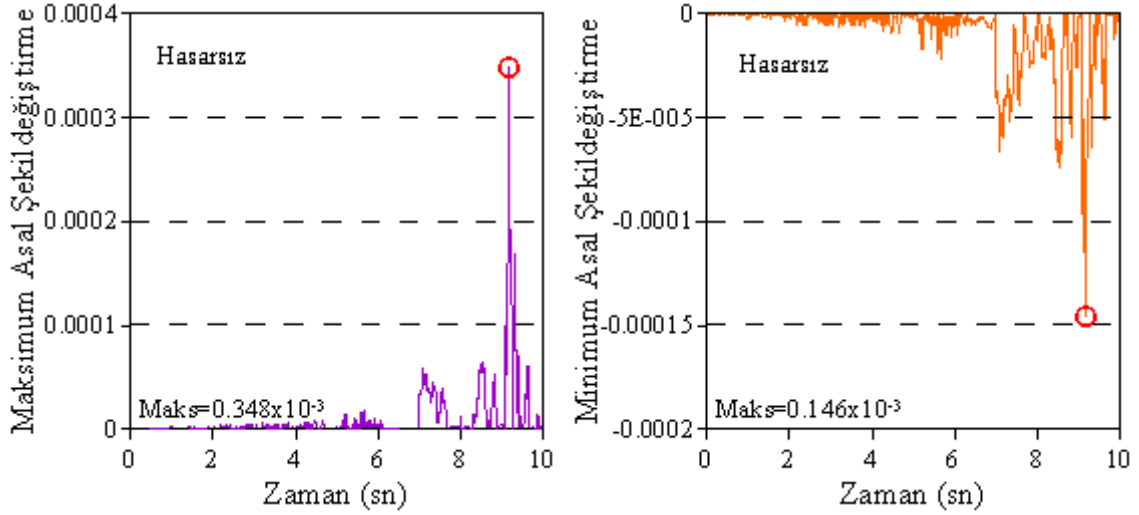
Hasarsız bütünsel güncellenmiş sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen maksimum asal şekildeğiştirme kontur diyagramı Şekil 2.74'te, minimum asal şekildeğiştirme kontur diyagramı ise Şekil 2.75'te verilmektedir. Bu kontur diyagramları model çerçeve üzerinde maksimum veya minimum asal şekildeğiştirme meydana geldiği andaki şekildeğiştirme dağılımını göstermektedir. Hasarsız bütünsel güncellenmiş sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen maksimum ve minimum asal şekildeğiştirmelerin zamanla değişimi Şekil 2.76'da verilmektedir. Şekil 2.76'da görüldüğü üzere maksimum asal şekildeğiştirme değeri 0.348×10^{-3} , minimum asal şekildeğiştirme değeri ise 0.146×10^{-3} 'tür. Hasarsız başlangıç sonlu eleman modeline göre maksimum asal şekildeğiştirme değerinde %180.6, minimum asal şekildeğiştirme değerinde ise %144.1 oranında bir artış elde edilmiştir.



Şekil 2.74. Hasarsız bütünsel güncelleştirilmiş sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen maksimum asal şekildeğiştirme kontur diyagramı



Şekil 2.75. Hasarsız bütünsel güncelleştirilmiş sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen minimum asal şekildeğiştirme kontur diyagramı

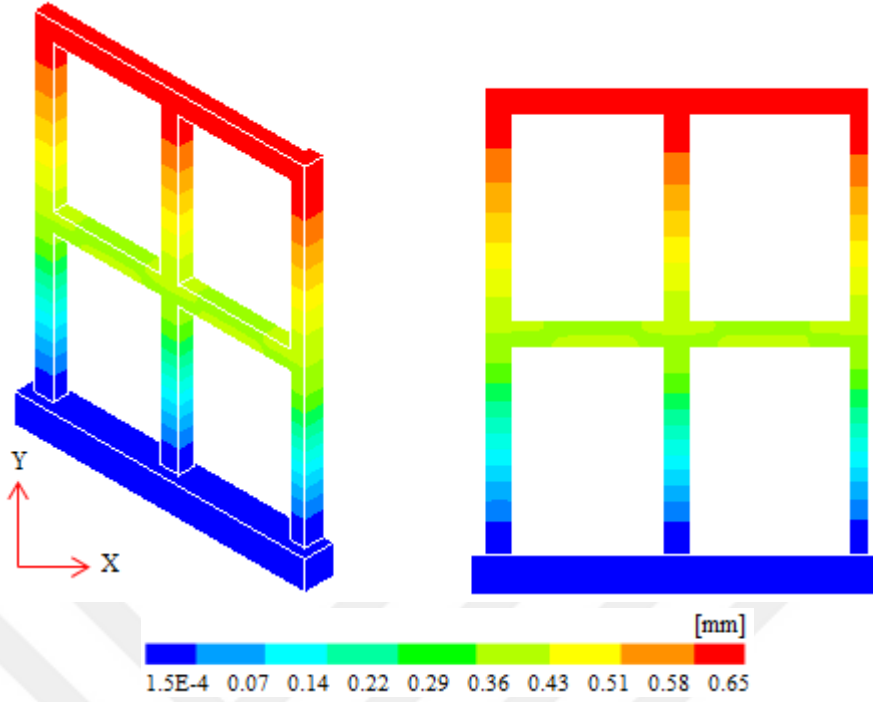


Şekil 2.76. Hasarsız bütünsel güncellenmiş sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen maksimum ve minimum asal şekildeğişirmelerin zamanla değişimi

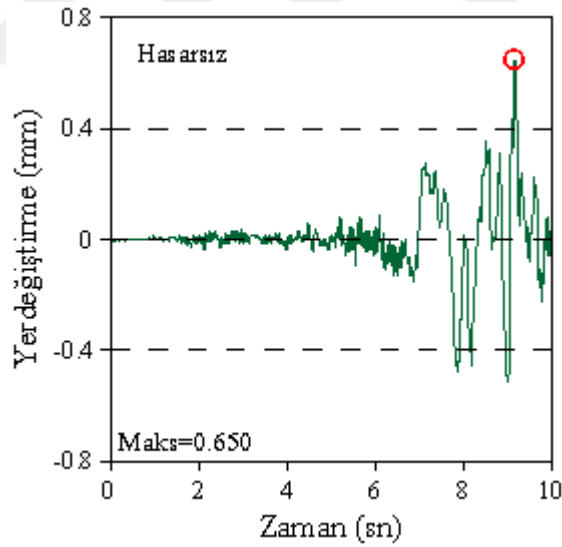
2.4.5.3. Hasarsız Yerel Güncellenmiş Sonlu Eleman Modelinin Doğrusal Olmayan Dinamik Analizi

2.4.5.3.1. Yerdeğişirmeler

Hasarsız yerel güncellenmiş sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen yerdeğişirme kontur diyagramı Şekil 2.77’de verilmektedir. Kontur diyagramı model çerçeve üzerinde maksimum yerdeğişirme meydana geldiği andaki yerdeğişirme dağılımını göstermektedir. Hasarsız yerel güncellenmiş sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen maksimum yerdeğişirmenin zamanla değişimi Şekil 2.78’de verilmektedir. Şekil 2.78’de görüldüğü üzere maksimum yerdeğişirme 0.650 mm’dir. Hasarsız bütünsel güncellenmiş sonlu eleman modeline göre maksimum yerdeğişirme değerinde %23.3 oranında bir azalış elde edilmiştir.



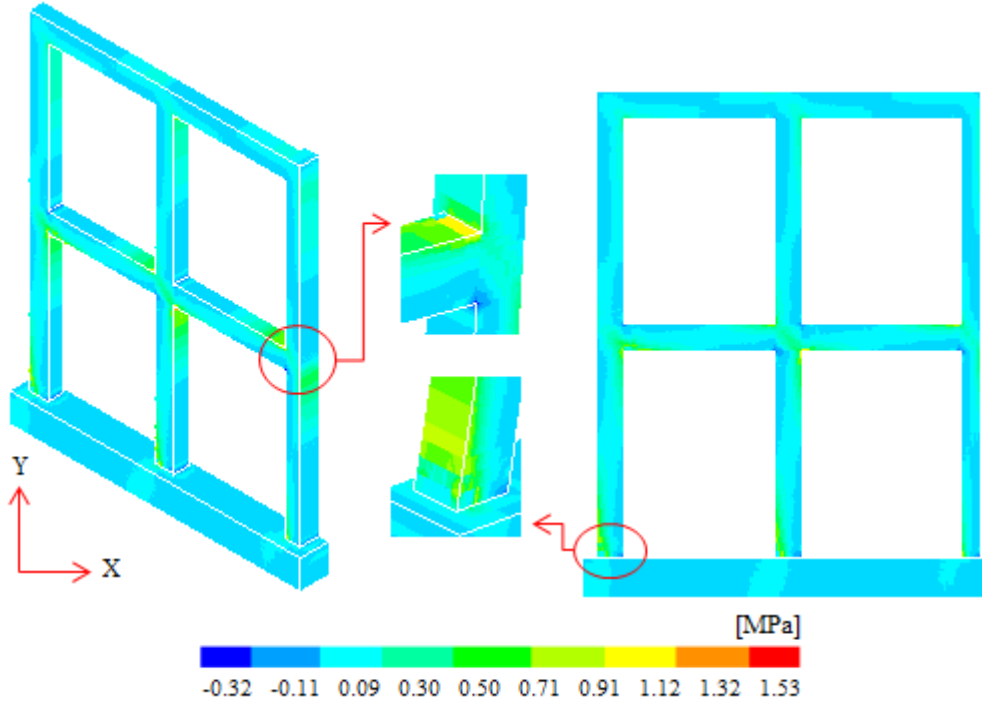
Şekil 2.77. Hasarsız yerel güncelleştirilmiş sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen yerdeğiştirme kontur diyagramları



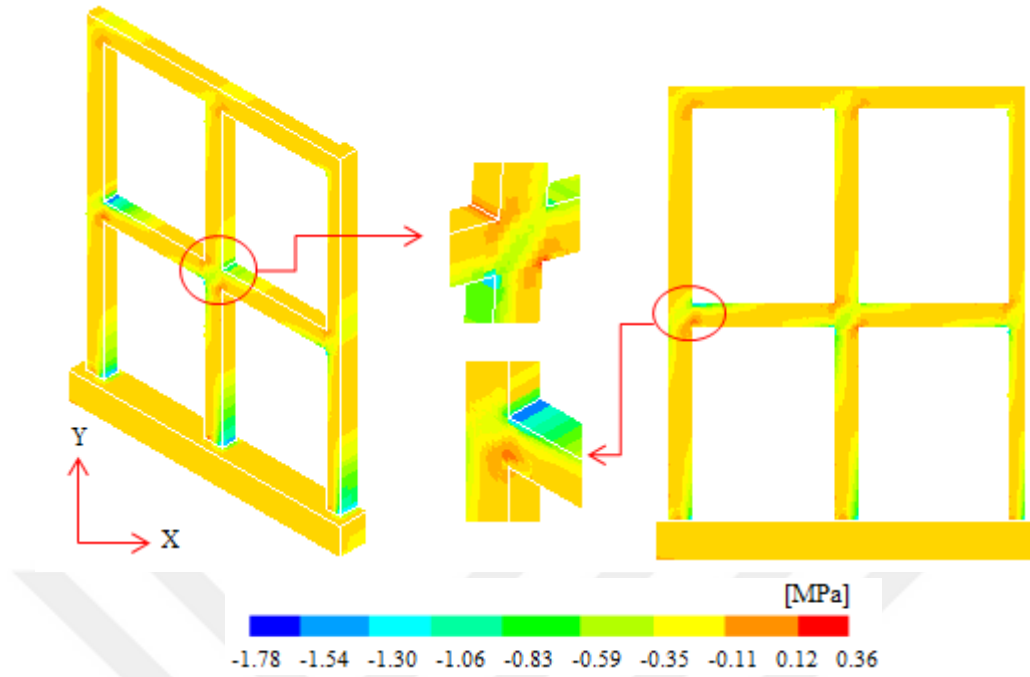
Şekil 2.78. Hasarsız yerel güncelleştirilmiş sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen maksimum yerdeğiştirmenin zamanla değişimi

2.4.5.3.2. Asal Gerilmeler

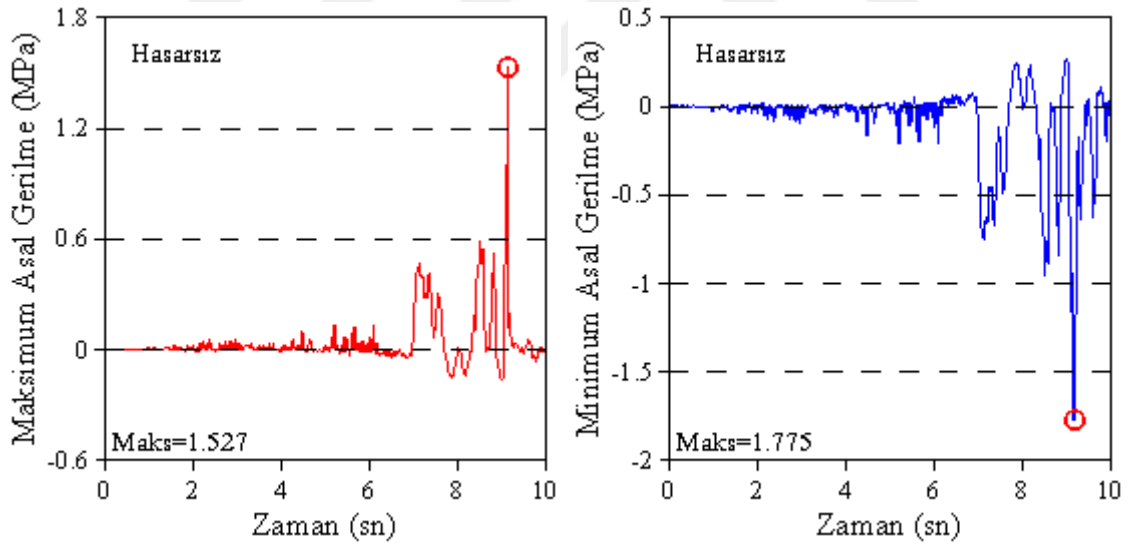
Hasarsız yerel güncelleştirilmiş sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen maksimum asal gerilme kontur diyagramı Şekil 2.79'da, minimum asal gerilme kontur diyagramı ise Şekil 2.80'de verilmektedir. Bu kontur diyagramları model çerçeve üzerinde maksimum veya minimum asal gerilme meydana geldiği andaki gerilme dağılımını göstermektedir. Hasarsız yerel güncelleştirilmiş sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi Şekil 2.81'de verilmektedir. Şekil 2.81'de görüldüğü üzere maksimum asal gerilme değeri 1.527 MPa, minimum asal gerilme değeri ise 1.775 MPa'dır. Hasarsız bütünsel güncelleştirilmiş sonlu eleman modeline göre maksimum asal gerilme değerinde %8, minimum asal gerilme değerinde ise %15 oranında bir azalış elde edilmiştir.



Şekil 2.79. Hasarsız yerel güncelleştirilmiş sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen maksimum asal gerilme kontur diyagramı



Şekil 2.80. Hasarsız yerel güncellenmiş sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen minimum asal gerilme kontur diyagramı

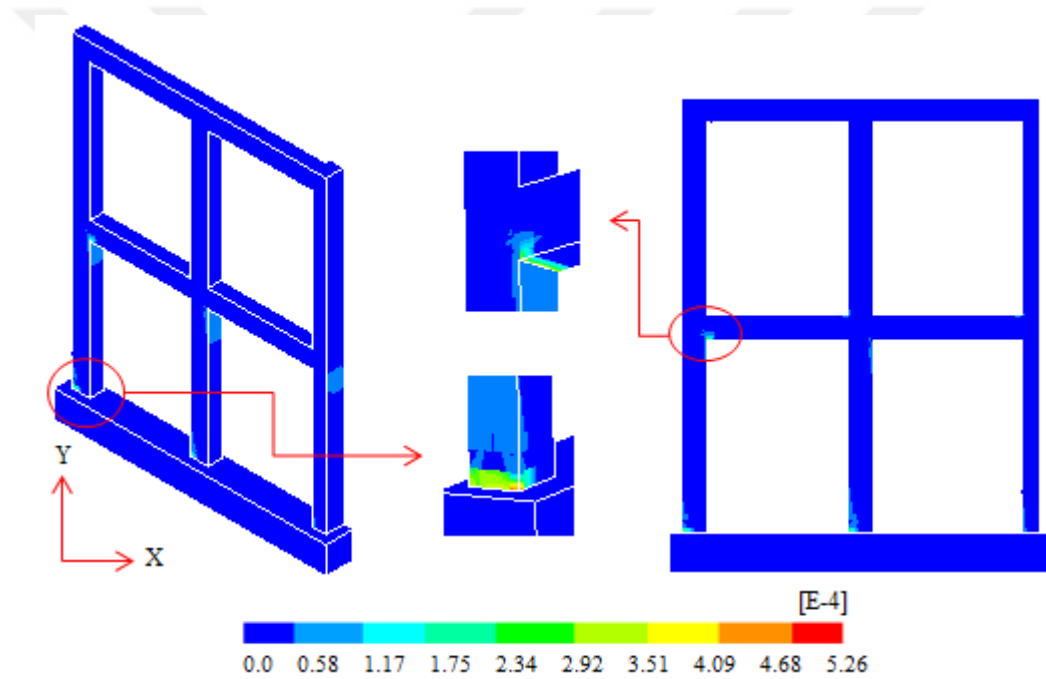


Şekil 2.81. Hasarsız yerel güncellenmiş sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi

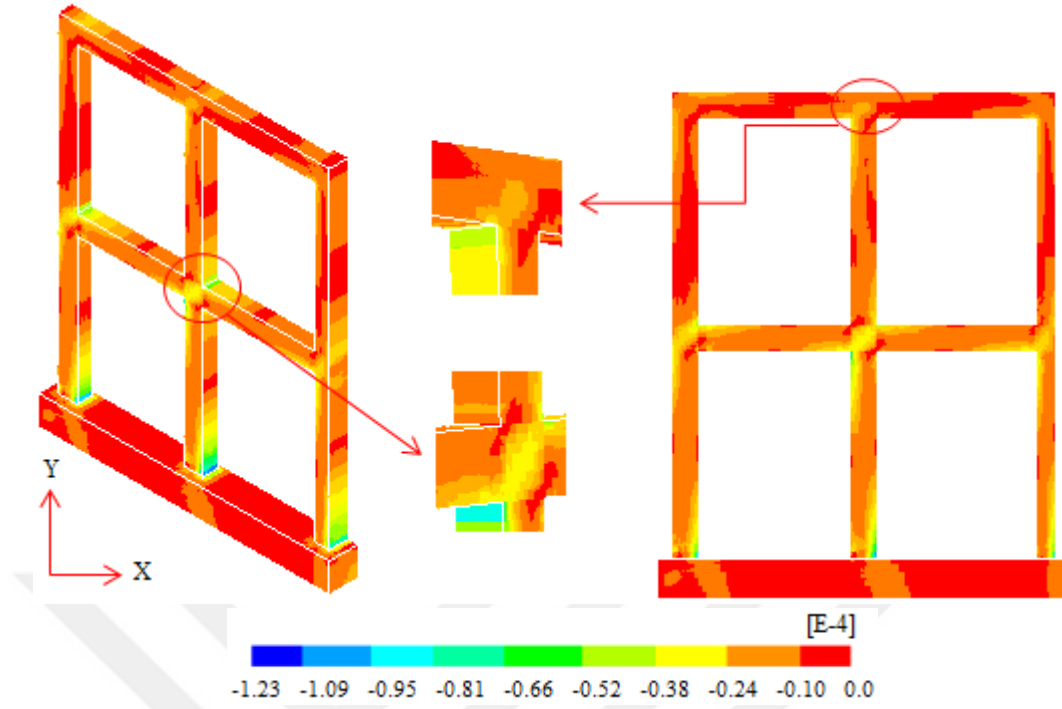
2.4.5.3.3. Asal Şekildeğiştirmeler

Hasarsız yerel güncellenmiş sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen maksimum asal şekildeğiştirme kontur diyagramı Şekil 2.82’de, minimum asal

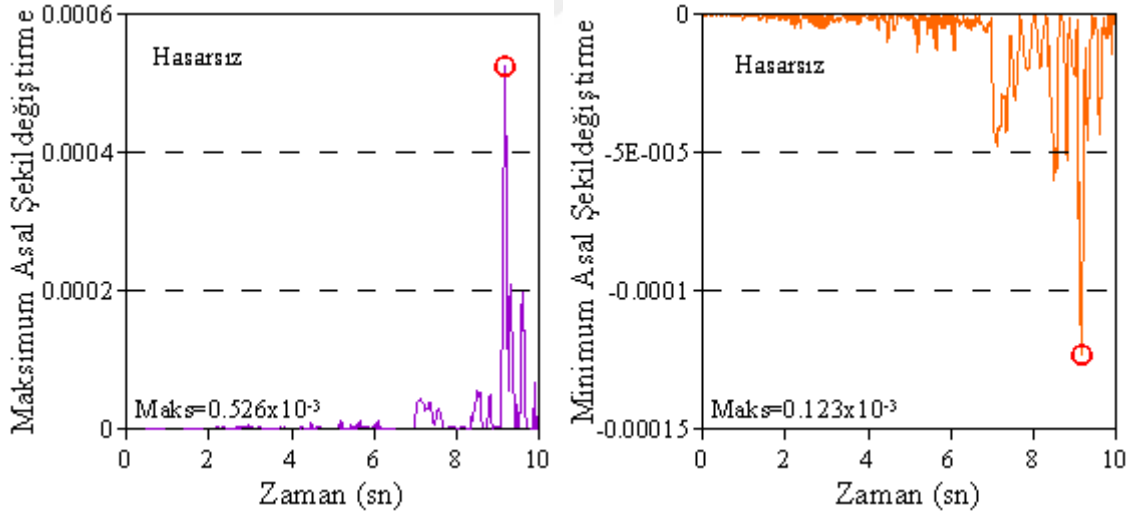
şekildeğiştirme kontur diyagramı ise Şekil 2.83'te verilmektedir. Kontur diyagramları model çerçeve üzerinde maksimum veya minimum asal şekildeğiştirme meydana geldiği andaki şekildeğiştirme dağılımını göstermektedir. Hasarsız yerel güncelleştirilmiş sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen maksimum ve minimum asal şekildeğiştirmelerin zamanla değişimi Şekil 2.84'te verilmektedir. Şekil 2.84'te görüldüğü üzere maksimum asal şekildeğiştirme değeri 0.526×10^{-3} , minimum asal şekildeğiştirme değeri ise 0.123×10^{-3} 'tür. Hasarsız bütünsel güncelleştirilmiş sonlu eleman modeline göre maksimum asal şekildeğiştirme değerinde %51.1 oranında artış, minimum asal şekildeğiştirme değerinde ise %15.8 oranında bir azalış elde edilmiştir.



Şekil 2.82. Hasarsız yerel güncelleştirilmiş sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen maksimum asal şekildeğiştirme kontur diyagramı



Şekil 2.83. Hasarsız yerel güncellenmiş sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen minimum asal şekildeğiştirme kontur diyagramı

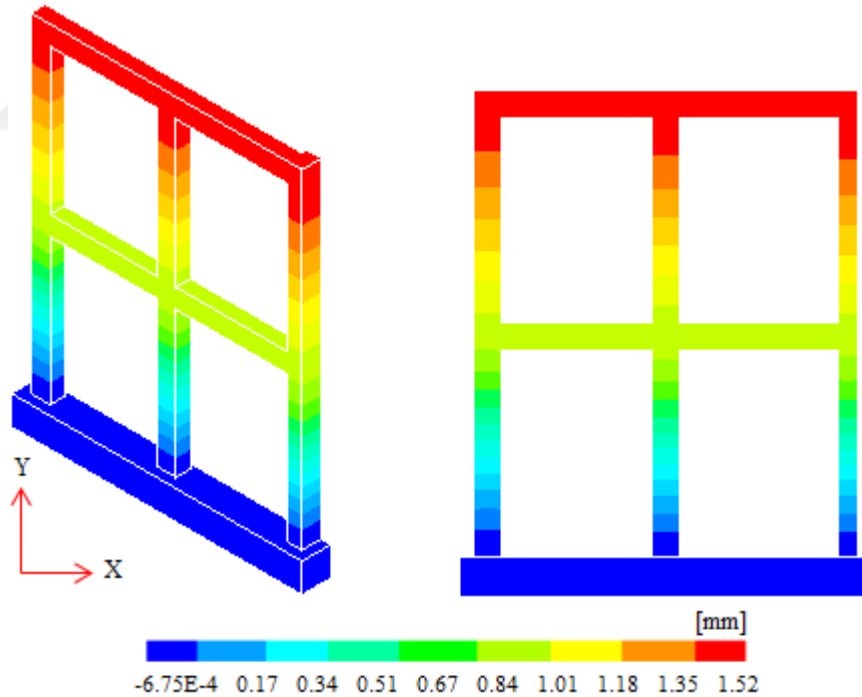


Şekil 2.84. Hasarsız yerel güncellenmiş sonlu eleman modelinin dinamik davranışından elde edilen maksimum ve minimum asal şekildeğiştirmelerin zamanla değişimi

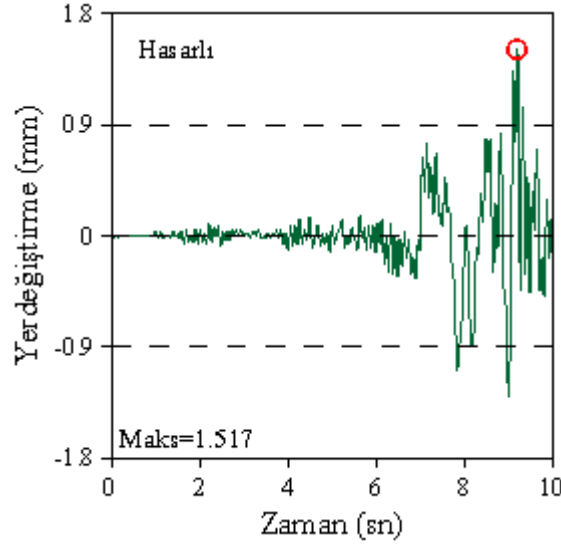
2.4.5.4. Betonarme Düzlem Çerçevenin Hasarlı Durumunun Doğrusal Olmayan Dinamik Analizi

2.4.5.4.1. Yerdeğiştirmeler

Betonarme düzlem çerçevenin hasarlı durumunun dinamik davranışından elde edilen yerdeğiştirme kontur diyagramı Şekil 2.85'te verilmektedir. Bu kontur diyagramı model çerçeve üzerinde maksimum yerdeğiştirme meydana geldiği andaki yerdeğiştirme dağılımını göstermektedir. Şekil 2.85 incelendiğinde yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca arttığı görülmektedir. Betonarme düzlem çerçevenin hasarlı durumunun dinamik davranışından elde edilen maksimum yerdeğiştirmenin zamanla değişimi Şekil 2.86'da verilmektedir. Şekil 2.86'da görüldüğu üzere maksimum yerdeğiştirme 1.517 mm'dir. Hasarsız yerel güncelleştirilmiş sonlu eleman modeline göre maksimum yerdeğiştirme değerinde %133.4 oranında bir artış elde edilmiştir.



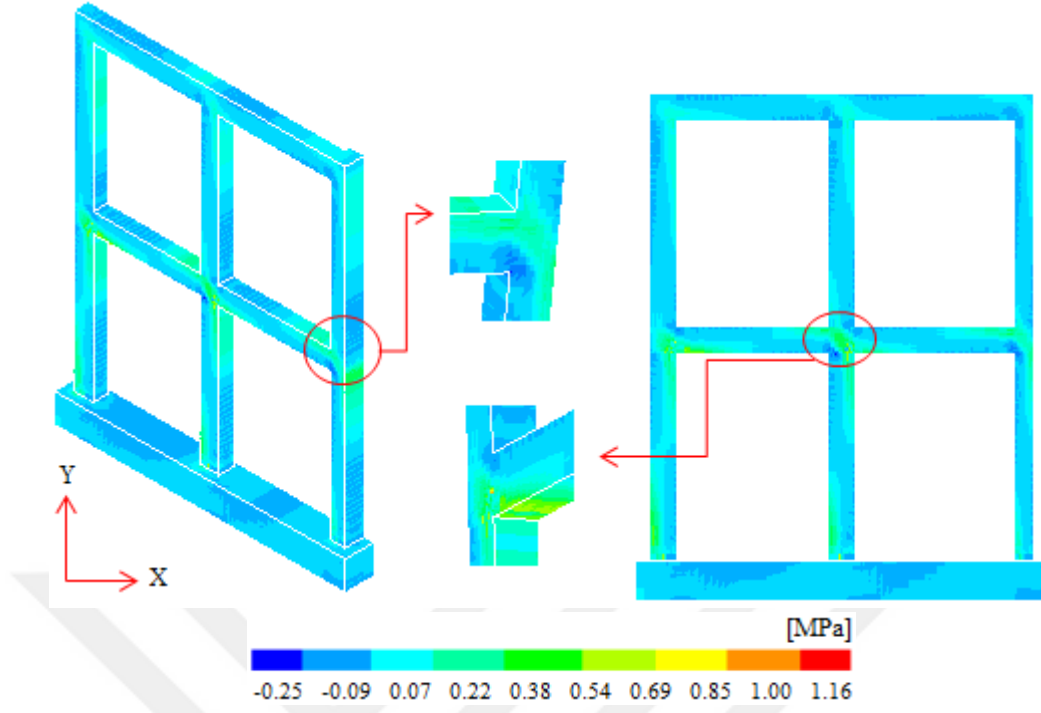
Şekil 2.85. Betonarme düzlem çerçevenin hasarlı durumunun dinamik davranışından elde edilen yerdeğiştirme kontur diyagramları



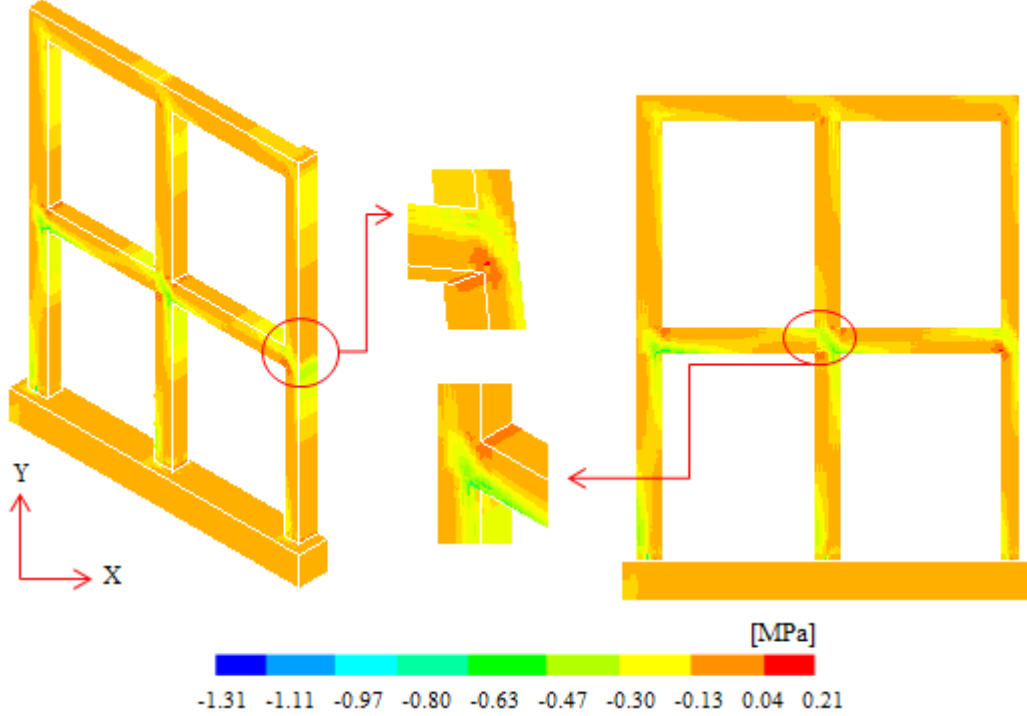
Şekil 2.86. Betonarme düzlem çerçevenin hasarlı durumunun dinamik davranışından elde edilen maksimum yerdeğiştirmenin zamanla değişimi

2.4.5.4.2. Asal Gerilmeler

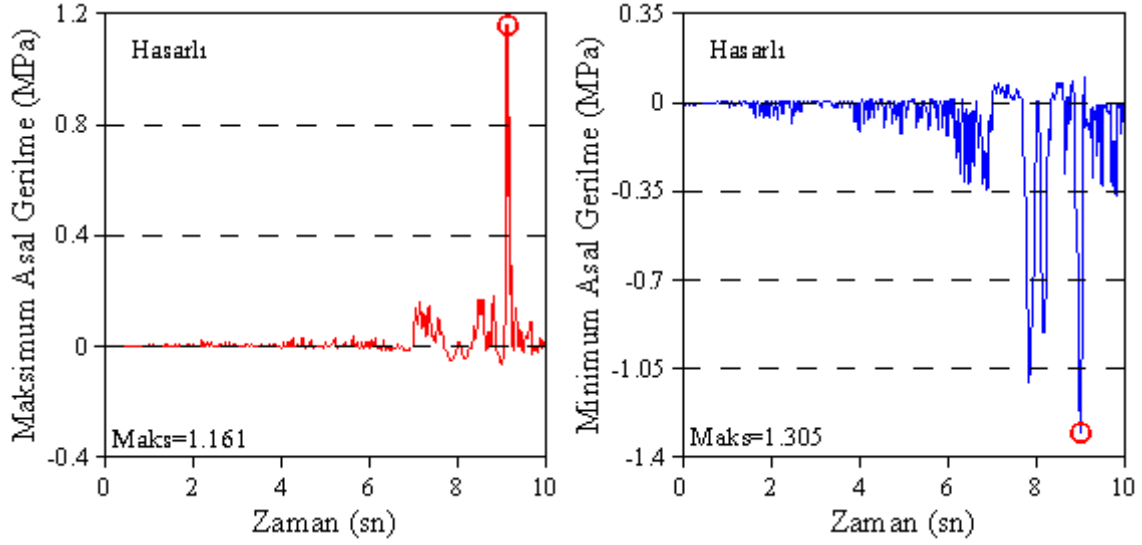
Betonarme düzlem çerçevenin hasarlı durumunun dinamik davranışından elde edilen maksimum asal gerilme kontur diyagramı Şekil 2.87'de, minimum asal gerilme kontur diyagramı ise Şekil 2.88'de verilmektedir. Kontur diyagramları model çerçeve üzerinde maksimum veya minimum asal gerilme meydana geldiği andaki gerilme dağılımını göstermektedir. Betonarme düzlem çerçevenin hasarlı durumunun dinamik davranışından elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi Şekil 2.89'da verilmektedir. Şekil 2.89'da görüldüğü gibi maksimum asal gerilme 1.161 MPa, minimum asal gerilme 1.305 MPa olarak elde edilmiştir. Hasarsız yerel güncelleştirilmiş sonlu eleman modeline göre maksimum asal gerilme değerinde %24, minimum asal gerilme değerinde ise %26.5 oranında bir azalış elde edilmiştir.



Şekil 2.87. Betonarme düzlem çerçevenin hasarlı durumunun dinamik davranışından elde edilen maksimum asal gerilme kontur diyagramı



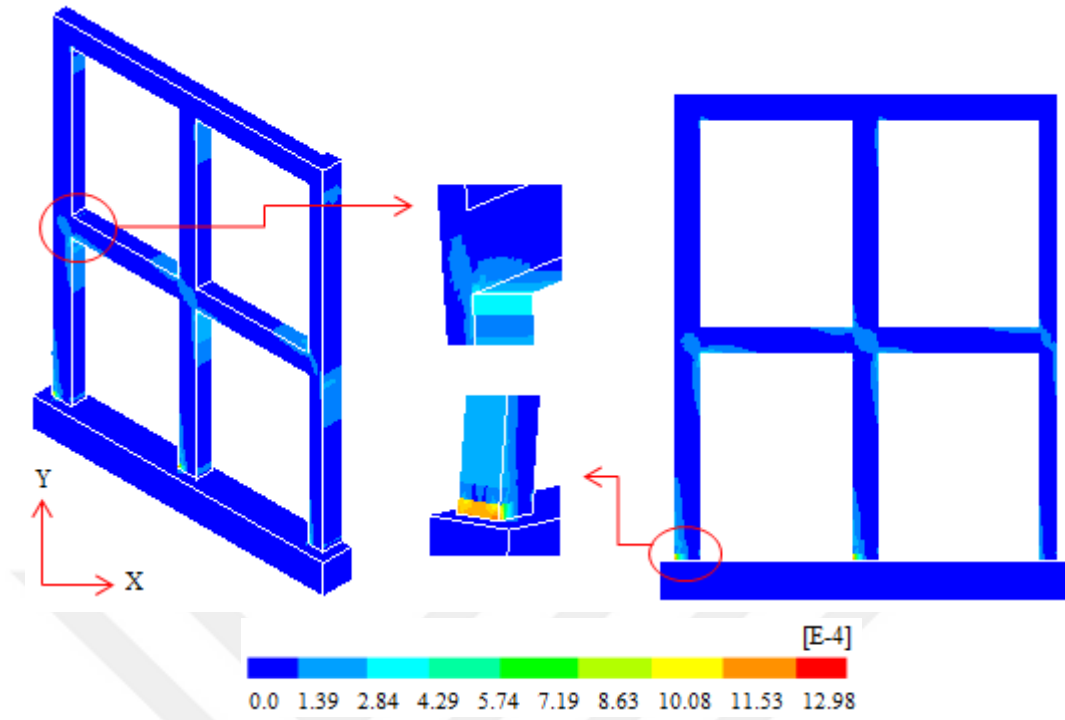
Şekil 2.88. Betonarme düzlem çerçevenin hasarlı durumunun dinamik davranışından elde edilen minimum asal gerilme kontur diyagramı



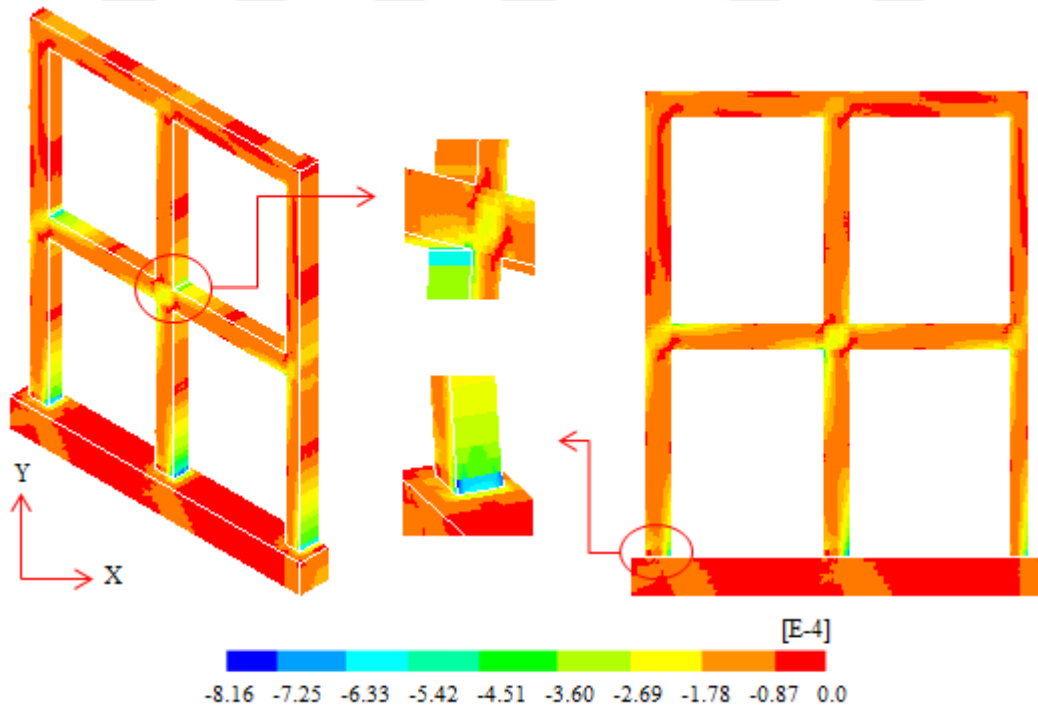
Şekil 2.89. Betonarme düzlem çerçevenin hasarlı durumunun dinamik davranışından elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi

2.4.5.4.3. Asal Şekildeğiştirmeler

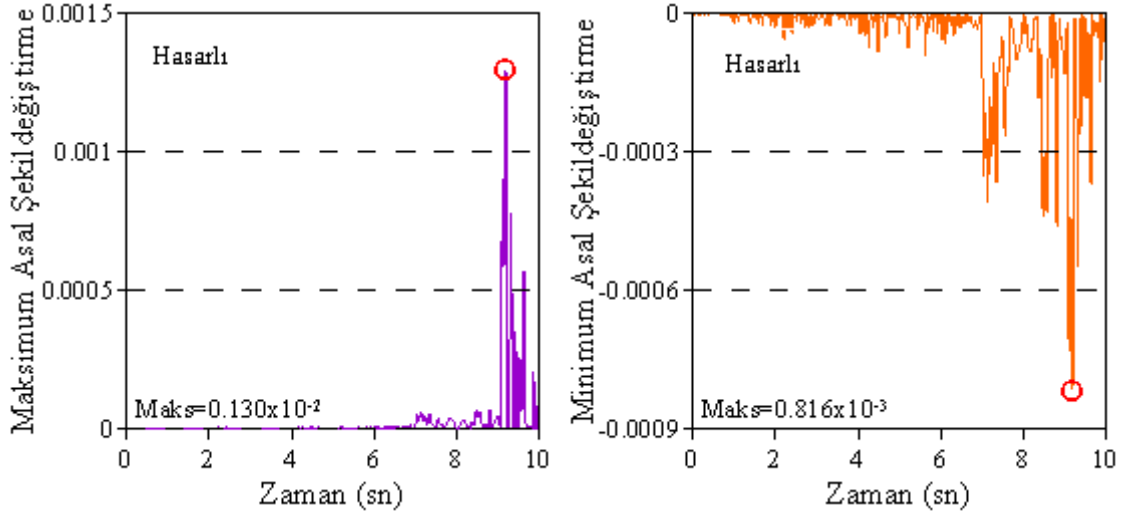
Betonarme düzlem çerçevenin hasarlı durumunun dinamik davranışından elde edilen maksimum asal şekildeğiştirme kontur diyagramı Şekil 2.90'da, minimum asal şekildeğiştirme kontur diyagramı ise Şekil 2.91'de verilmektedir. Kontur diyagramları model çerçeve üzerinde maksimum veya minimum asal şekildeğiştirme meydana geldiği andaki şekildeğiştirme dağılımını göstermektedir. Betonarme düzlem çerçevenin hasarlı durumunun dinamik davranışından elde edilen maksimum ve minimum asal şekildeğiştirmelerin zamanla değişimi Şekil 2.92'de verilmektedir. Şekil 2.92'de görüldüğü gibi maksimum asal şekildeğiştirme 0.130×10^{-2} , minimum asal şekildeğiştirme ise 0.816×10^{-3} olarak elde edilmiştir. Hasarsız yerel güncelleştirilmiş sonlu eleman modeline göre maksimum asal şekildeğiştirme değerinde %147.1 oranında, minimum asal şekildeğiştirme değerinde ise %563.4 oranında bir artış elde edilmiştir.



Şekil 2.90. Betonarme düzlem çerçevenin hasarlı durumunun dinamik davranışından elde edilen maksimum asal şekildeğiştirme kontur diyagramı



Şekil 2.91. Betonarme düzlem çerçevenin hasarlı durumunun dinamik davranışından elde edilen minimum asal şekildeğiştirme kontur diyagramı

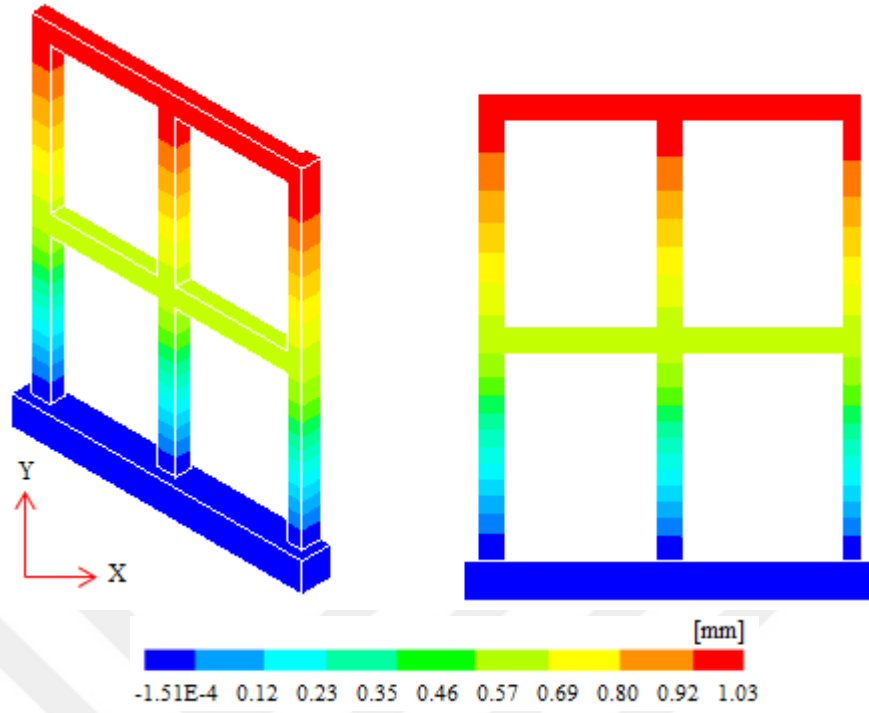


Şekil 2.92. Betonarme düzlem çerçevenin hasarlı durumunun dinamik davranışından elde edilen maksimum ve minimum asal şekildeğişirmelerin zamanla değişimi

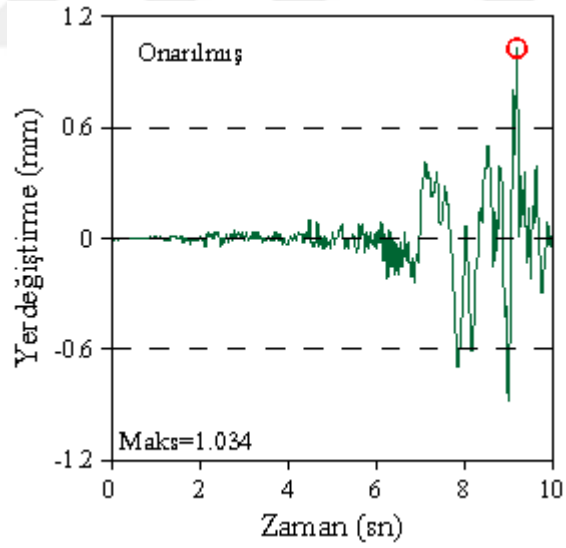
2.4.5.5. Betonarme Düzlem Çerçevenin Onarılmış Durumunun Doğrusal Olmayan Dinamik Analizi

2.4.5.5.1. Yerdeğişirmeler

Betonarme düzlem çerçevenin onarılmış durumunun dinamik davranışından elde edilen yerdeğiştirme kontur diyagramı Şekil 2.93'te verilmektedir. Bu kontur diyagramı model çerçeve üzerinde maksimum yerdeğiştirme meydana geldiği andaki yerdeğiştirme dağılımını göstermektedir. Şekil 2.93 incelendiğinde yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca arttığı görülmektedir. Betonarme düzlem çerçevenin onarılmış durumunun dinamik davranışından elde edilen maksimum yerdeğiştirmenin zamanla değişimi Şekil 2.94'te verilmektedir. Maksimum yerdeğiştirme değeri 1.034 mm olarak elde edilmiş olup bu değer betonarme düzlem çerçevenin hasarlı durumuna göre %31.8 oranında azalmıştır.



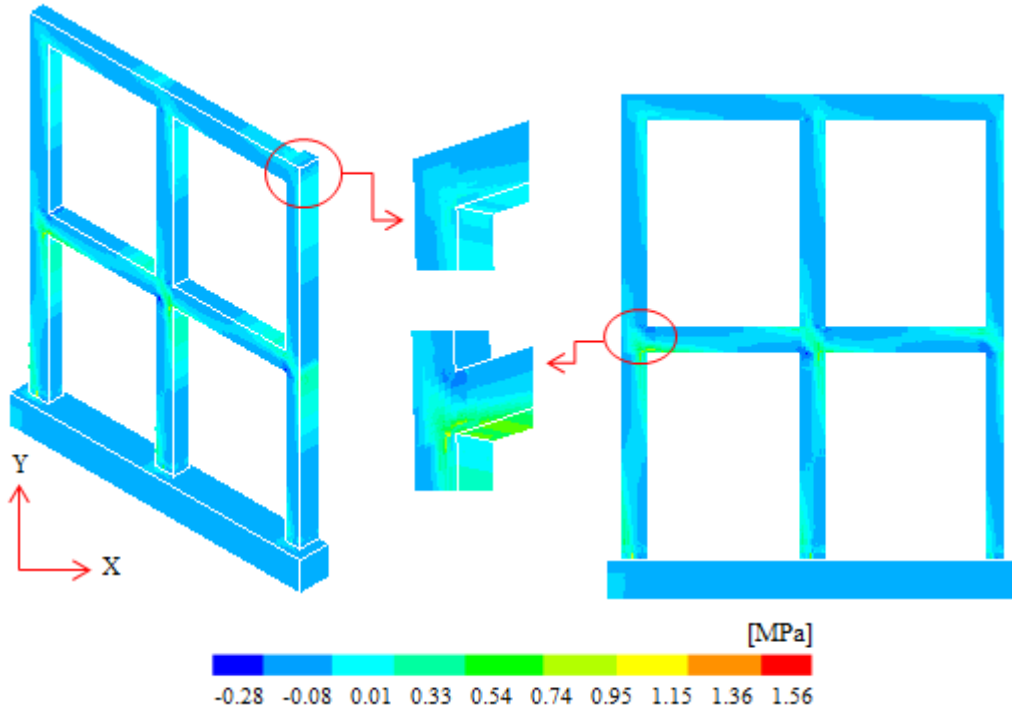
Şekil 2.93. Betonarme düzlem çerçevenin onarılmış durumunun dinamik davranışından elde edilen yerdeğiştirme kontur diyagramları



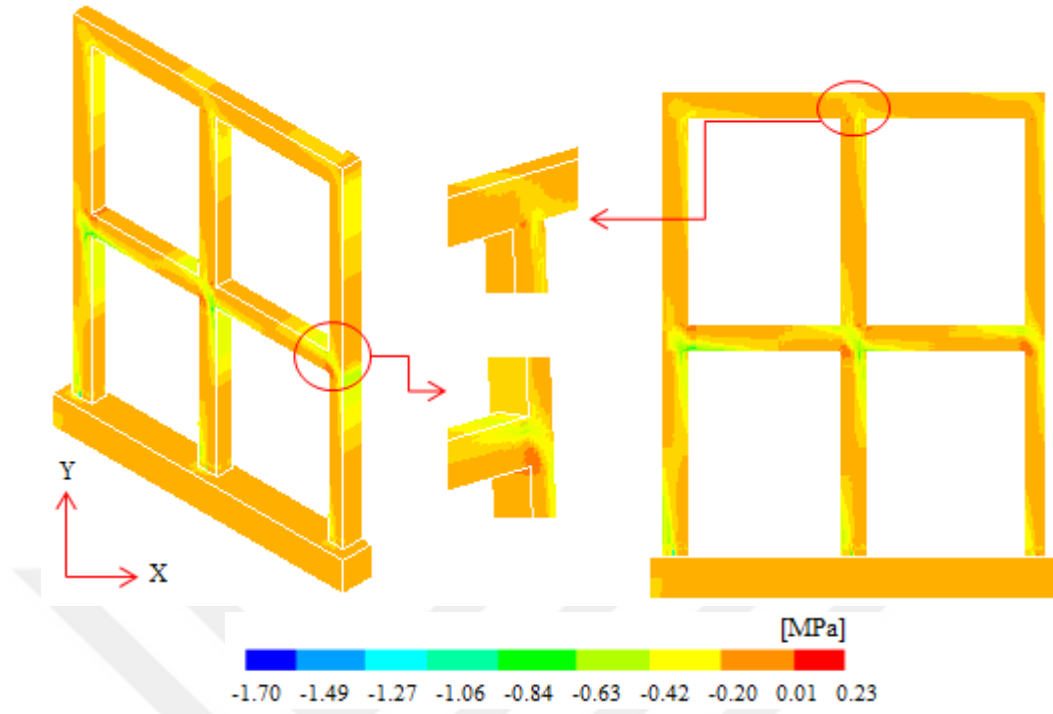
Şekil 2.94. Betonarme düzlem çerçevenin onarılmış durumunun dinamik davranışından elde edilen maksimum yerdeğiştirmenin zamanla değişimi

2.4.5.5.2. Asal Gerilmeler

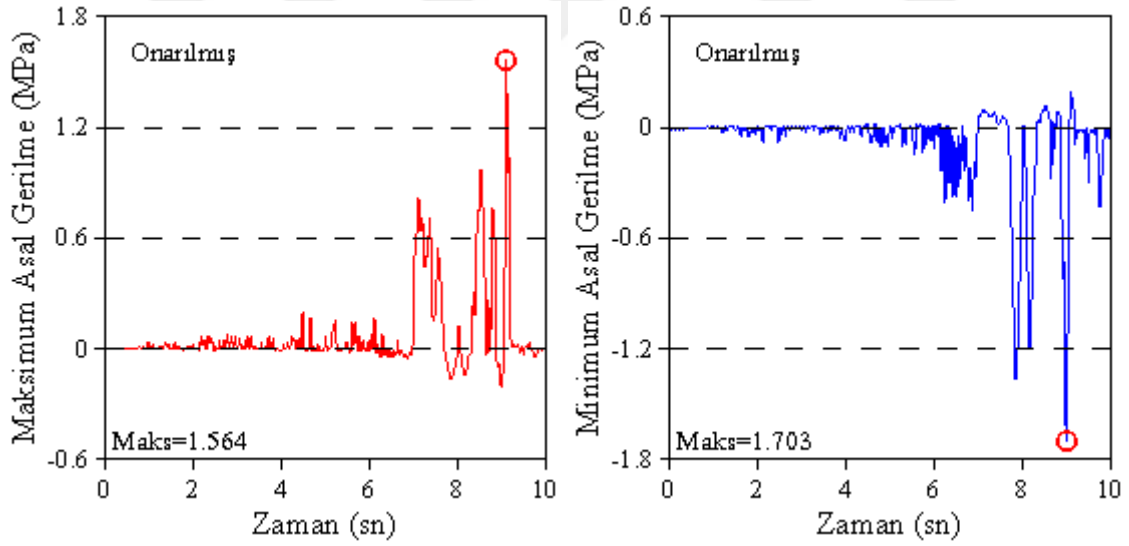
Betonarme düzlem çerçevenin onarılmış durumunun dinamik davranışından elde edilen maksimum asal gerilme kontur diyagramı Şekil 2.95'te, minimum asal gerilme kontur diyagramı Şekil 2.96'da verilmektedir. Kontur diyagramları model çerçeve üzerinde maksimum veya minimum asal gerilme meydana geldiği andaki gerilme dağılımını göstermektedir. Betonarme düzlem çerçevenin onarılmış durumunun dinamik davranışından elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi Şekil 2.97'de verilmektedir. Şekil 2.97'de görüldüğü gibi maksimum asal gerilme 1.564 MPa olarak, minimum asal gerilme ise 1.703 MPa olarak elde edilmiştir. Bu değerler hasarlı durum ile karşılaştırıldığında maksimum asal gerilme ve minimum asal gerilme değerlerinde sırasıyla %34.7 ve %30.5 oranında bir artış elde edilmiştir.



Şekil 2.95. Betonarme düzlem çerçevenin onarılmış durumunun dinamik davranışından elde edilen maksimum asal gerilme kontur diyagramı



Şekil 2.96. Betonarme düzlem çerçevenin onarılmış durumunun dinamik davranışından elde edilen minimum asal gerilme kontur diyagramı

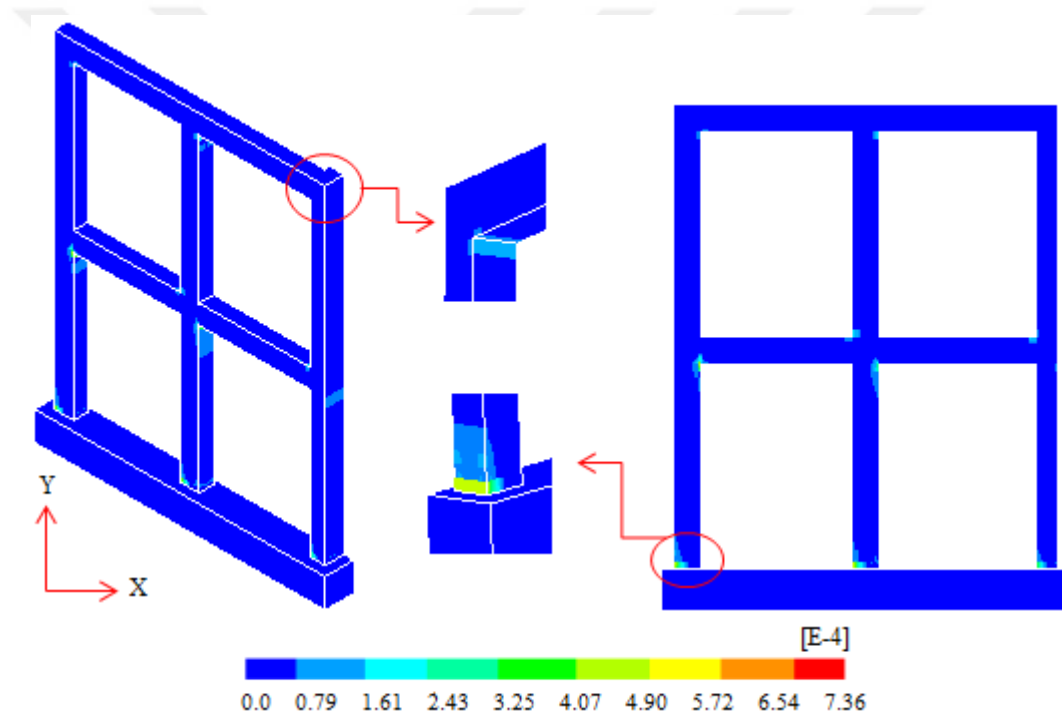


Şekil 2.97. Betonarme düzlem çerçevenin onarılmış durumunun dinamik davranışından elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi

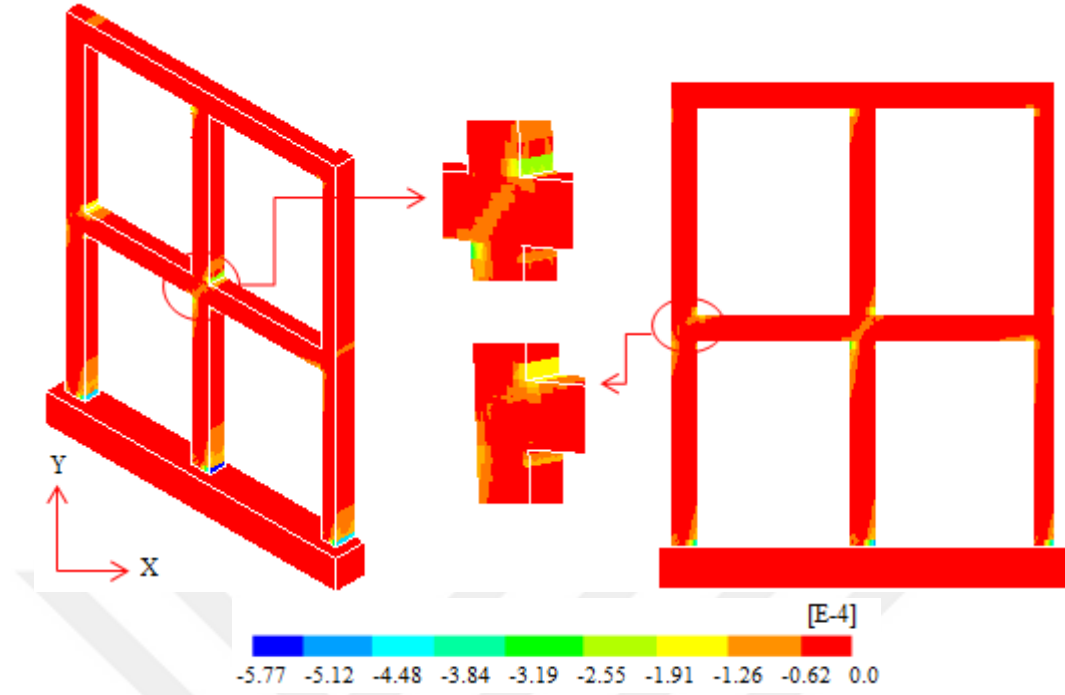
2.4.5.5.3. Asal Şekildeğiştirmeler

Betonarme düzlem çerçevenin onarılmış durumunun dinamik davranışından elde edilen maksimum asal şekildeğiştirme kontur diyagramı Şekil 2.98'de, minimum asal

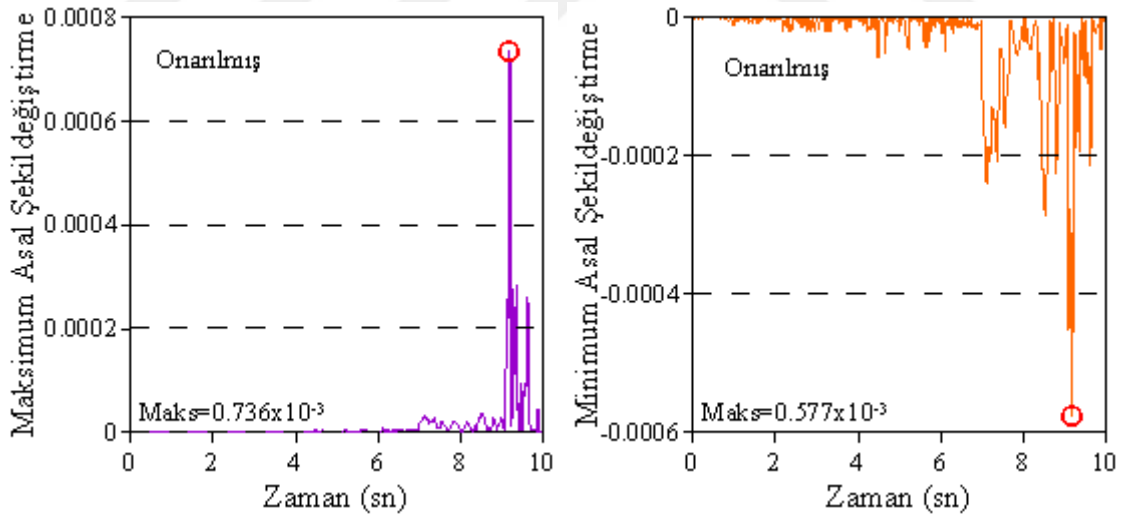
şekildeğiştirme kontur diyagramı ise Şekil 2.99'da verilmektedir. Model çerçeve üzerinde maksimum veya minimum asal şekildeğiştirme meydana geldiği andaki şekildeğiştirme dağılımı kontur diyagramında görülmektedir. Betonarme düzlem çerçevenin onarılmış durumunun dinamik davranışından elde edilen maksimum ve minimum asal şekildeğiştirmelerin zamanla değişimi Şekil 2.100'de verilmektedir. Şekil 2.100'de görüldüğü üzere maksimum asal şekildeğiştirme değeri 0.736×10^{-3} , minimum asal şekildeğiştirme değeri ise 0.577×10^{-3} olarak elde edilmiştir. Hasarlı durum ile karşılaştırıldığında maksimum asal şekildeğiştirme değerinde %43.4 oranında, minimum asal şekildeğiştirme değerinde ise %29.3 oranında bir azalış elde edilmiştir.



Şekil 2.98. Betonarme düzlem çerçevenin onarılmış durumunun dinamik davranışından elde edilen maksimum asal şekildeğiştirme kontur diyagramı



Şekil 2.99. Betonarme düzlem çerçevenin onarılmış durumunun dinamik davranışından elde edilen minimum asal şekildeğiştirme kontur diyagramı

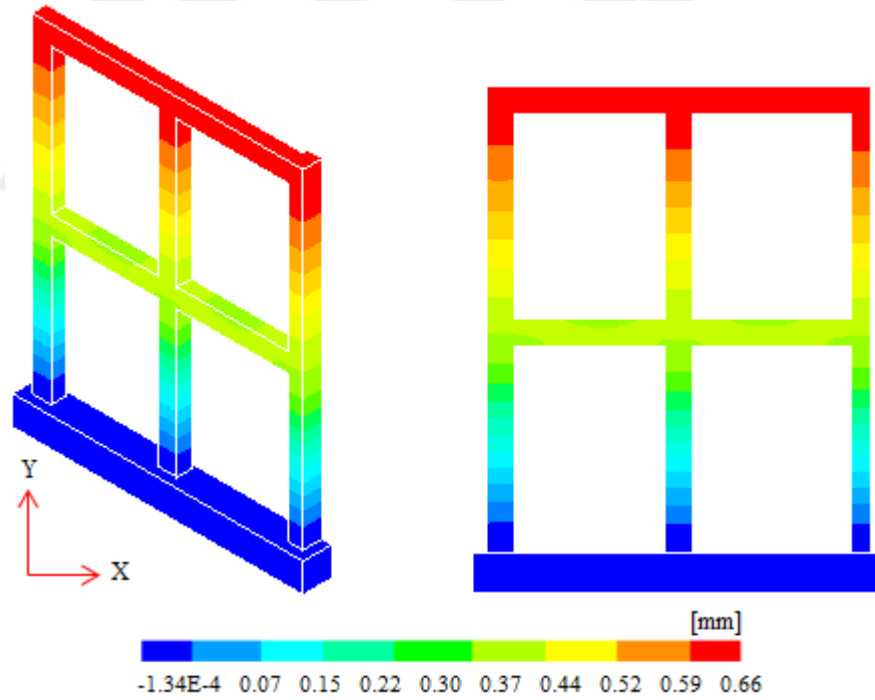


Şekil 2.100. Betonarme düzlem çerçevenin onarılmış durumunun dinamik davranışından elde edilen maksimum ve minimum asal şekildeğiştirmelerin zamanla değişimi

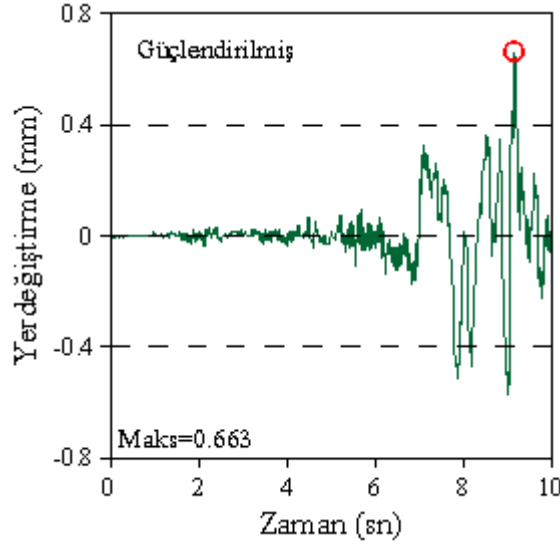
2.4.5.6. Betonarme Düzlem Çerçevenin Güçlendirilmiş Durumunun Doğrusal Olmayan Dinamik Analizi

2.4.5.6.1. Yerdeğiştirmeler

Betonarme düzlem çerçevenin güçlendirilmiş durumunun dinamik davranışından elde edilen yerdeğiştirme kontur diyagramı Şekil 2.101’de verilmektedir. Model çerçeve üzerinde maksimum yerdeğiştirme meydana geldiği andaki yerdeğiştirme dağılımı kontur diyagramında gösterilmektedir. Şekil 2.102’de model çerçevenin güçlendirilmiş durumunun dinamik davranışından elde edilen maksimum yerdeğiştirmenin zamanla değişimi verilmektedir. Şekil 2.102’de görüldüğü üzere maksimum yerdeğiştirme 0.663 mm’dir. Betonarme düzlem çerçevenin onarılmış durumuna göre maksimum yerdeğiştirme değerinde %35.9 oranında bir azalış elde edilmiştir.



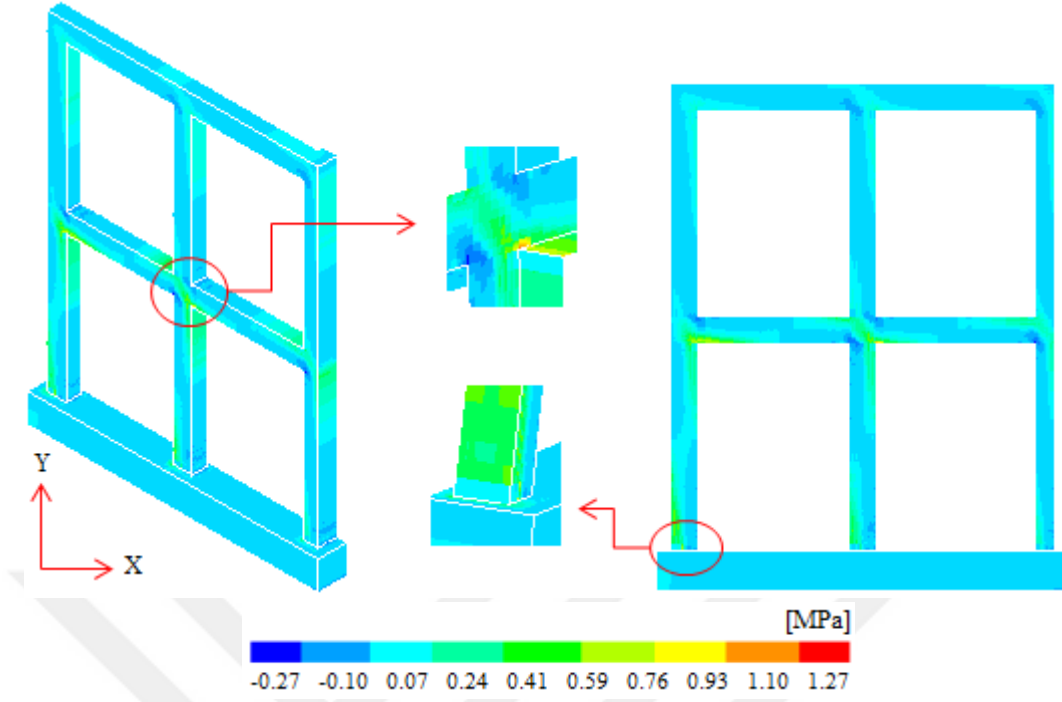
Şekil 2.101. Betonarme düzlem çerçevenin güçlendirilmiş durumunun dinamik davranışından elde edilen yerdeğiştirme kontur diyagramları



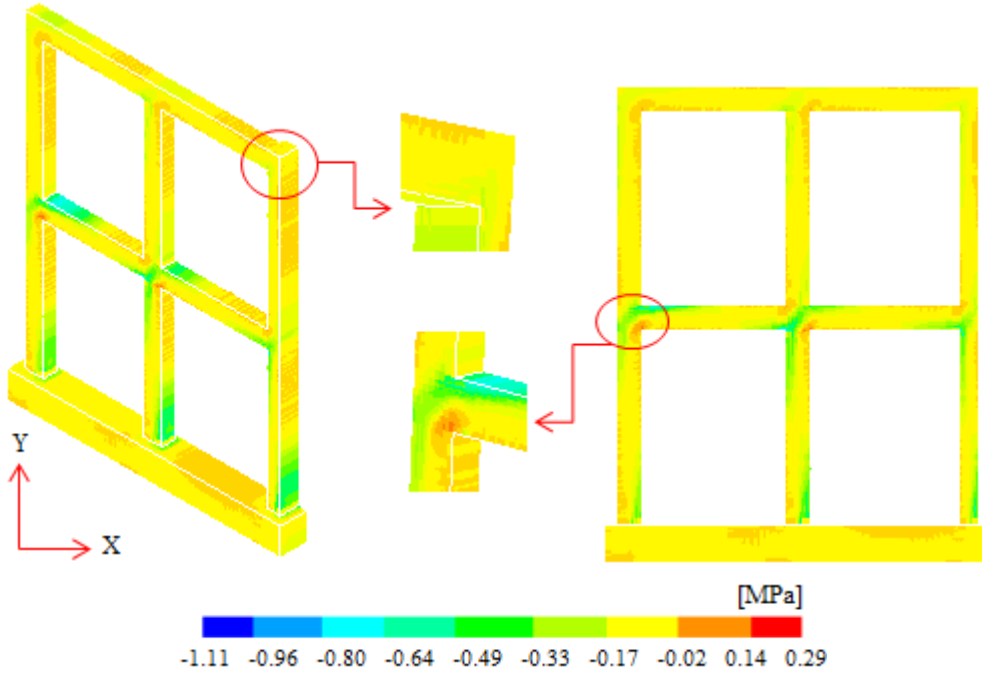
Şekil 2.102. Betonarme düzlem çerçevenin güçlendirilmiş durumunun dinamik davranışından elde edilen maksimum yerdeğiştirmenin zamanla değişimi

2.4.5.6.2. Asal Gerilmeler

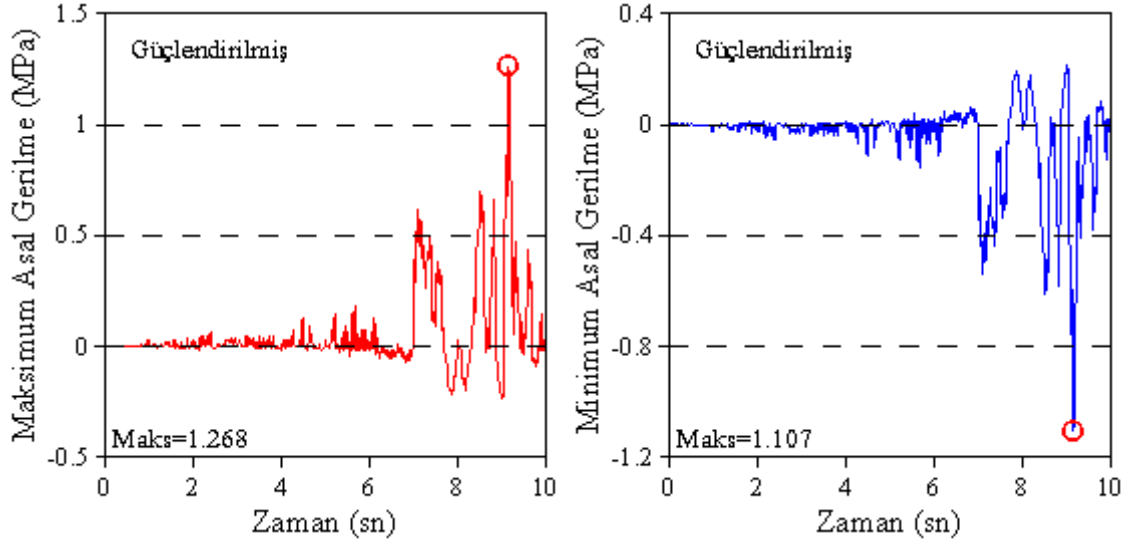
Betonarme düzlem çerçevenin güçlendirilmiş durumunun dinamik davranışından elde edilen maksimum asal gerilme kontur diyagramı Şekil 2.103'te, minimum asal gerilme kontur diyagramı ise Şekil 2.104'te verilmektedir. Model çerçeve üzerinde maksimum veya minimum asal gerilme meydana geldiği andaki gerilme dağılımı kontur diyagramlarında gösterilmektedir. Betonarme düzlem çerçevenin güçlendirilmiş durumunun dinamik davranışından elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi Şekil 2.105'te verilmektedir. Şekil 2.105'te görüldüğü üzere maksimum asal gerilme 1.268 MPa, minimum asal gerilme ise 1.107 MPa'dır. Onarılmış duruma göre maksimum asal gerilme değerinde %18.9, minimum asal gerilme değerinde ise %35 oranında bir azalış elde edilmiştir.



Şekil 2.103. Betonarme düzlem çerçevenin güçlendirilmiş durumunun dinamik davranışından elde edilen maksimum asal gerilme kontur diyagramı



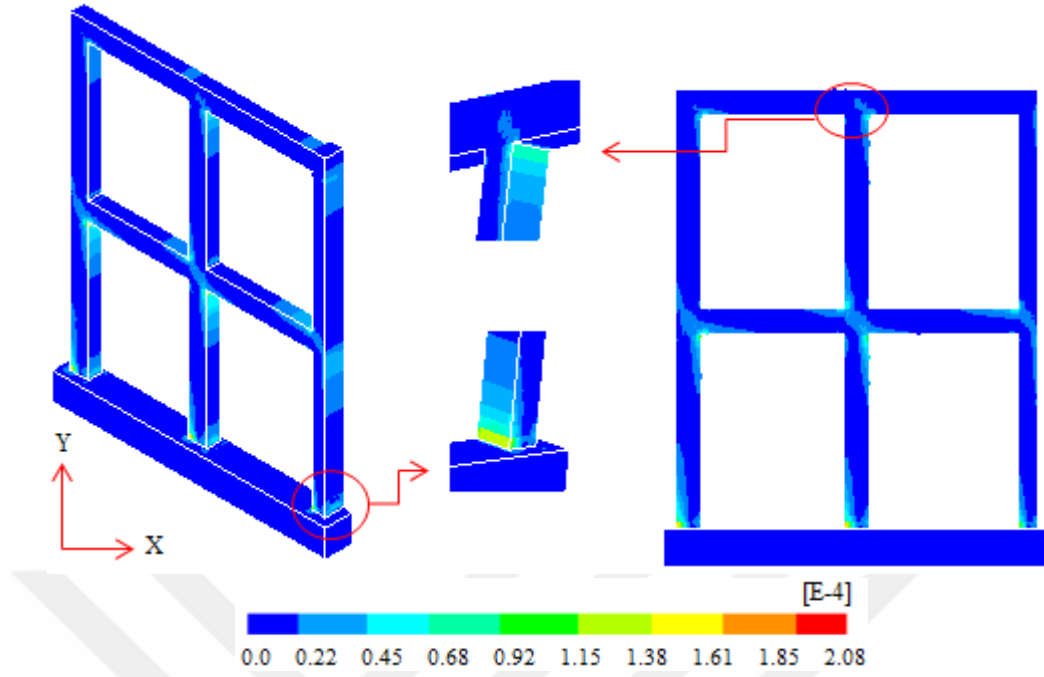
Şekil 2.104. Betonarme düzlem çerçevenin güçlendirilmiş durumunun dinamik davranışından elde edilen minimum asal gerilme kontur diyagramı



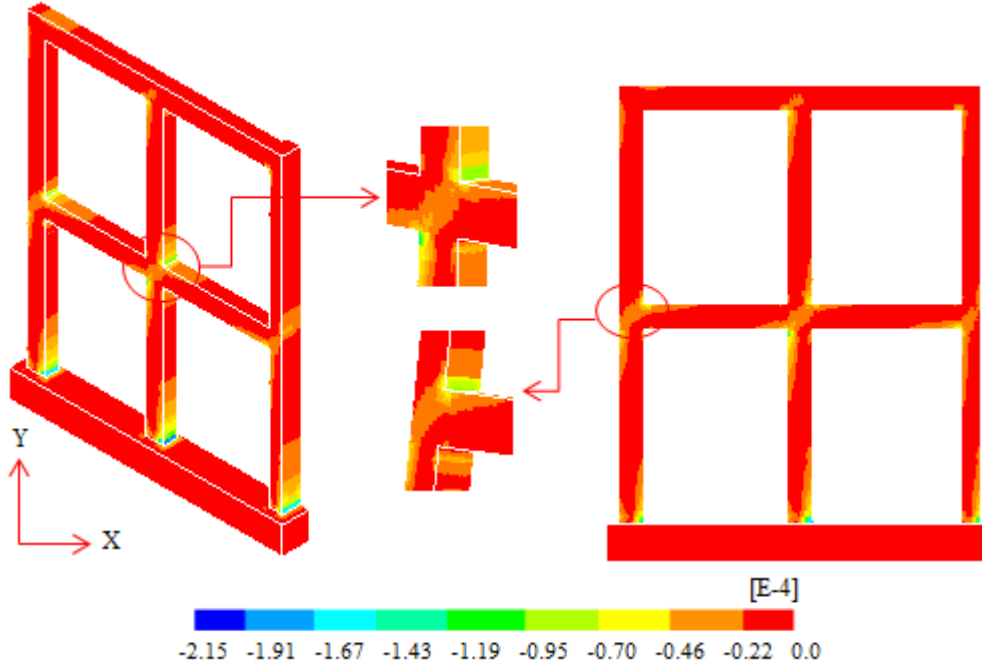
Şekil 2.105. Betonarme düzlem çerçevenin güçlendirilmiş durumunun dinamik davranışından elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi

2.4.5.6.3. Asal Şekildeğiştirmeler

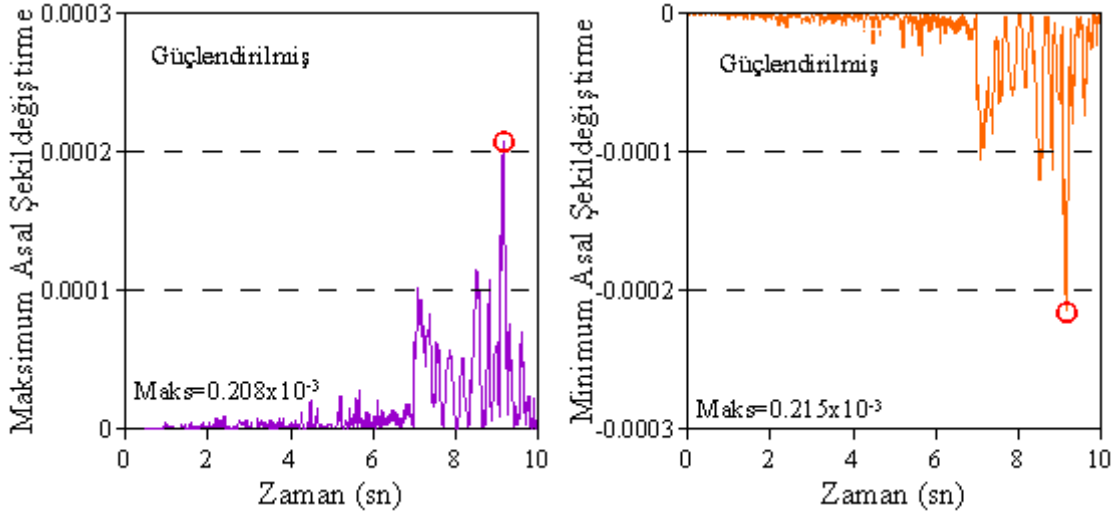
Betonarme düzlem çerçevenin güçlendirilmiş durumunun dinamik davranışından elde edilen maksimum asal şekildeğiştirme kontur diyagramı Şekil 2.106'da, minimum asal şekildeğiştirme kontur diyagramı Şekil 2.107'de verilmektedir. Model çerçevenin maksimum veya minimum asal şekildeğiştirme meydana geldiği andaki şekildeğiştirme dağılımı kontur diyagramlarında gösterilmektedir. Betonarme düzlem çerçevenin güçlendirilmiş durumunun dinamik davranışından elde edilen maksimum ve minimum asal şekildeğiştirmelerin zamanla değişimi Şekil 2.108'de verilmektedir. Şekil 2.108'de görüldüğü üzere maksimum ve minimum asal şekildeğiştirme değerleri sırasıyla 0.208×10^{-3} ve 0.215×10^{-3} olarak elde edilmiştir. Onarılmış duruma göre maksimum asal şekildeğiştirme değerinde %71.7 oranında, minimum asal şekildeğiştirme değerinde ise %62.7 oranında bir azalış elde edilmiştir.



Şekil 2.106. Betonarme düzlem çerçevenin güçlendirilmiş durumunun dinamik davranışından elde edilen maksimum asal şekildeğiştirme kontur diyagramı



Şekil 2.107. Betonarme düzlem çerçevenin güçlendirilmiş durumunun dinamik davranışından elde edilen minimum asal şekildeğiştirme kontur diyagramı



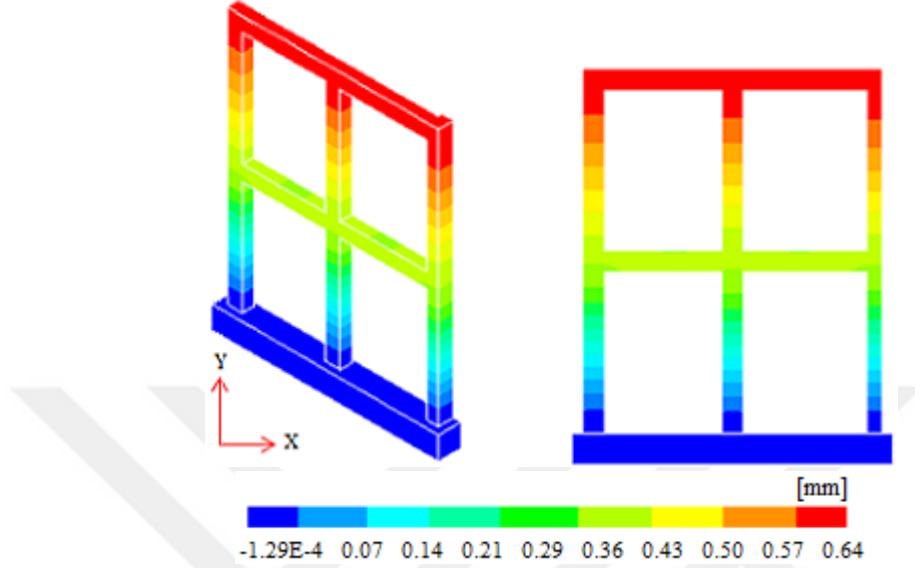
Şekil 2.108. Betonarme düzlem çerçevenin güçlendirilmiş durumunun dinamik davranışından elde edilen maksimum ve minimum asal şekildeğişirmelerin zamanla değişimi

2.4.5.7. Betonarme Düzlem Çerçevenin Güçlendirilmiş Durumunun Yüzde Beş Sönüm Oranı Dikkate Alınarak Yapılan Doğrusal Olmayan Dinamik Analizi

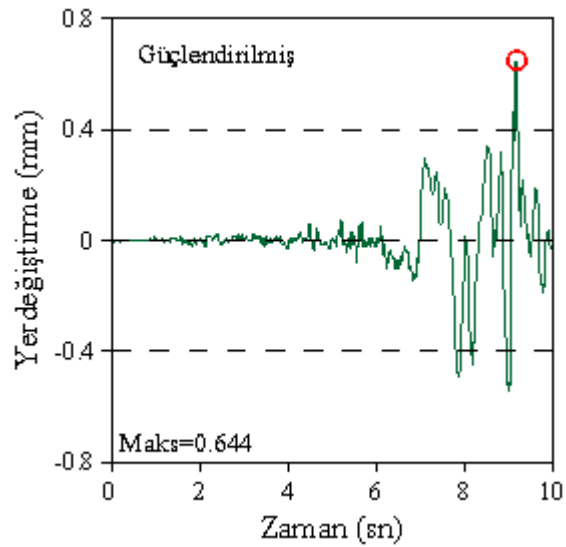
2.4.5.7.1. Yerdeğişirmeler

Yapılan dinamik analizler sonucunda güçlendirilen modeldeki maksimum yerdeğiştirme değerinin hasarsız durumdaki maksimum yerdeğiştirme değerinden daha büyük olduğu görülmüştür. Bu durumun sönüm oranlarının farklılığından ya da elastisite modülünün farklılığından kaynaklanmış olacağı düşünülerek, analizler elastisite modülü sabit tutularak %5 sönüm oranı için tekrarlanmıştır. Betonarme düzlem çerçevenin güçlendirilmiş durumunun dinamik davranışından elde edilen yerdeğiştirme kontur diyagramı Şekil 2.109'da verilmektedir. Betonarme düzlem çerçevenin güçlendirilmiş durumunun dinamik davranışından elde edilen maksimum yerdeğiştirmenin zamanla değişimi Şekil 2.110'da verilmektedir. Şekil 2.110'da görüldüğü üzere maksimum yerdeğiştirme 0.644 mm'dir. Betonarme düzlem çerçevenin onarılmış durumuna göre yerdeğiştirme değerinde %37.7 oranında bir azalış elde edilmiştir. Ayrıca hasarsız duruma göre yerdeğiştirme değeri %1 oranında azalarak hasarsız durumdan daha rijit bir yapı elde edilmiştir. Deneysel sönüm dikkate alınarak elde edilen maksimum yerdeğiştirme değeri ile yüzde beş sönüm için elde edilen maksimum yerdeğiştirme değeri arasındaki fark %2.9

olarak elde edilmiştir. Buradan analizler sonucunda elde edilen değerler üzerinde model güncellenmenin sönüm oranına göre daha etkili olduğu anlaşılmaktadır.



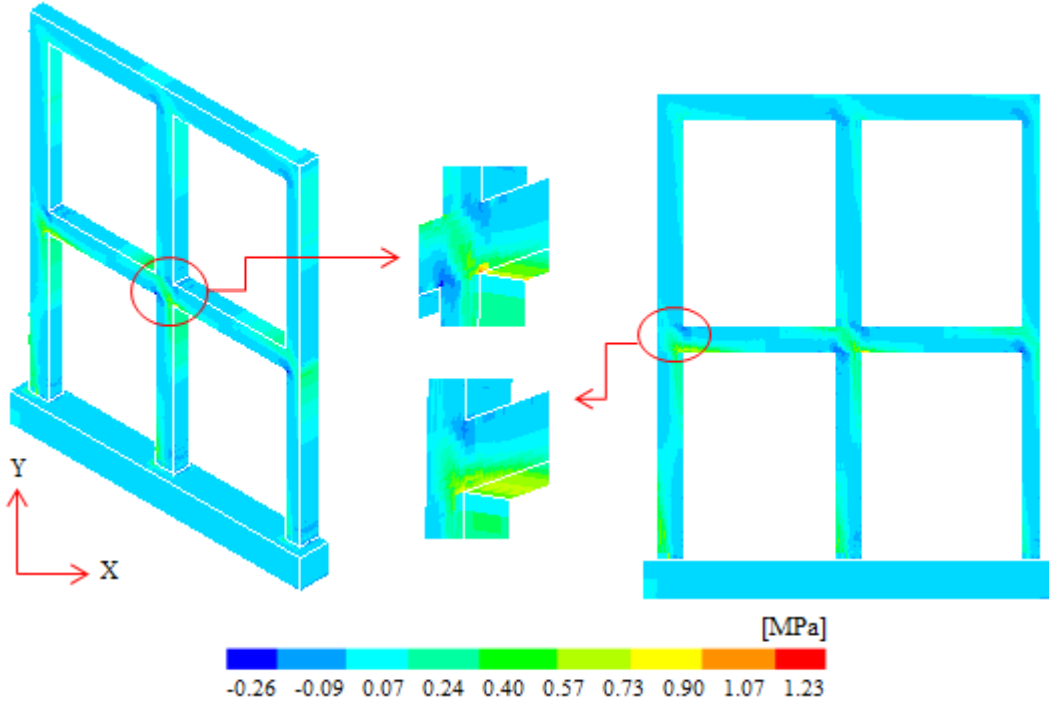
Şekil 2.109. Betonarme düzlem çerçevenin güçlendirilmiş durumunun yüzde beş sönüm oranı için dinamik davranışından elde edilen yerdeğiştirme kontur diyagramları



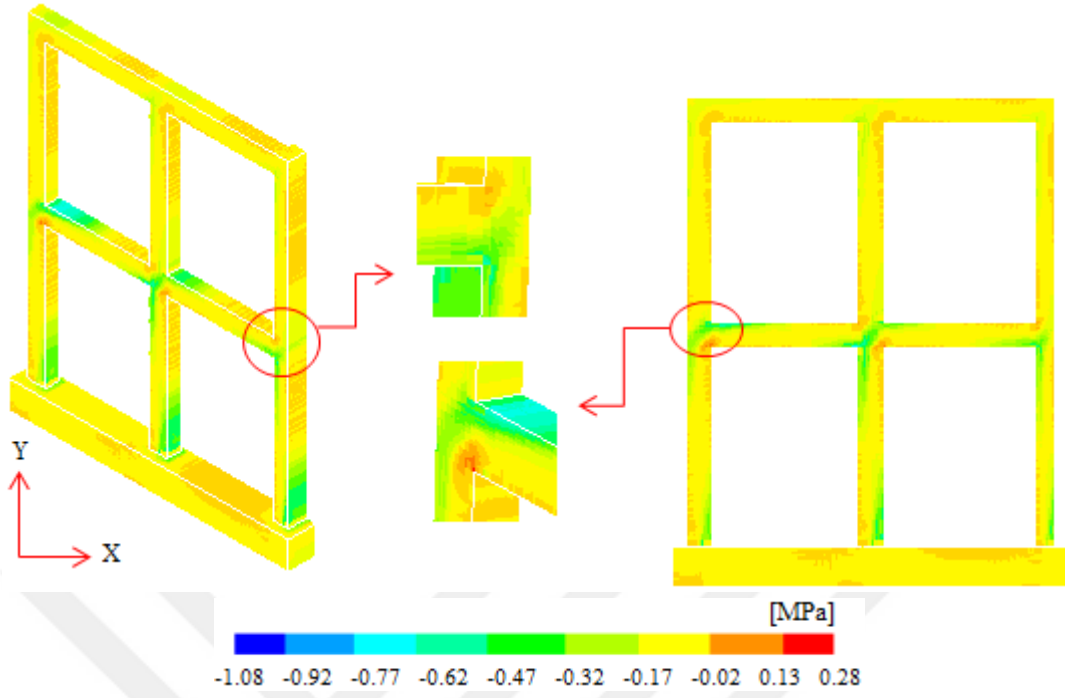
Şekil 2.110. Betonarme düzlem çerçevenin güçlendirilmiş durumunun yüzde beş sönüm oranı için dinamik davranışından elde edilen maksimum yerdeğiştirmenin zamanla değişimi

2.4.5.7.2. Asal Gerilmeler

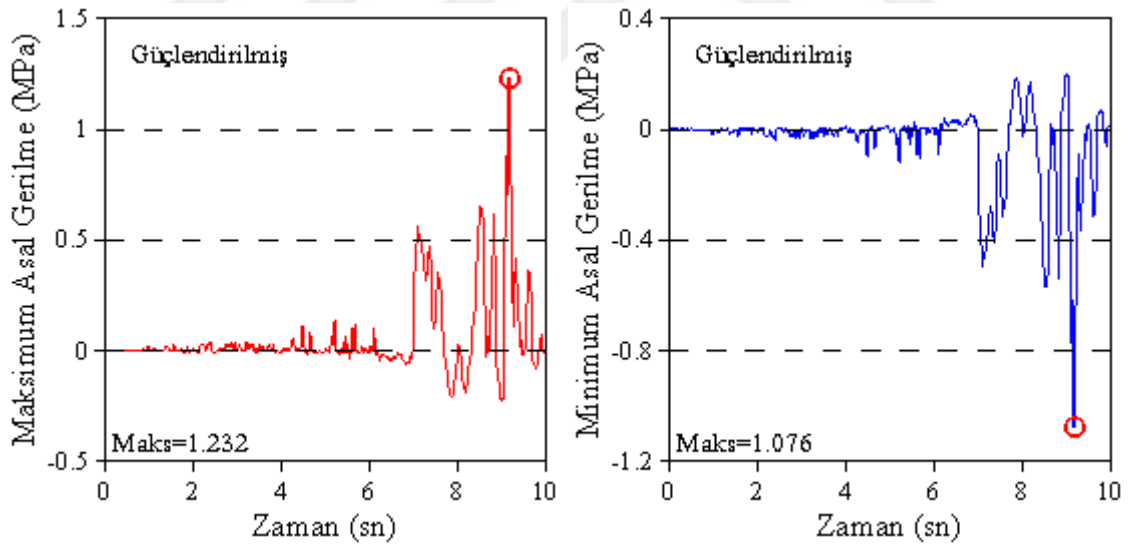
Betonarme düzlem çerçevenin güçlendirilmiş durumunun dinamik davranışından elde edilen maksimum asal gerilme kontur diyagramı Şekil 2.111'de, minimum asal gerilme kontur diyagramı ise Şekil 2.112'de verilmektedir. Diyagramlar maksimum veya minimum asal gerilme meydana geldiği andaki gerilme dağılımını göstermektedir. Betonarme düzlem çerçevenin güçlendirilmiş durumunun dinamik davranışından elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi Şekil 2.113'te verilmektedir. Şekil 2.113'te görüldüğü üzere maksimum asal gerilme değeri 1.232 MPa, minimum asal gerilme değeri ise 1.076 MPa olarak elde edilmiştir. Betonarme düzlem çerçevenin onarılmış durumuna göre maksimum asal gerilme değerinde %21.2, minimum asal gerilme değerinde ise %36.8 oranında bir azalış elde edilmiştir.



Şekil 2.111. Betonarme düzlem çerçevenin güçlendirilmiş durumunun yüzde beş sönüm oranı için dinamik davranışından elde edilen maksimum asal gerilme kontur diyagramı



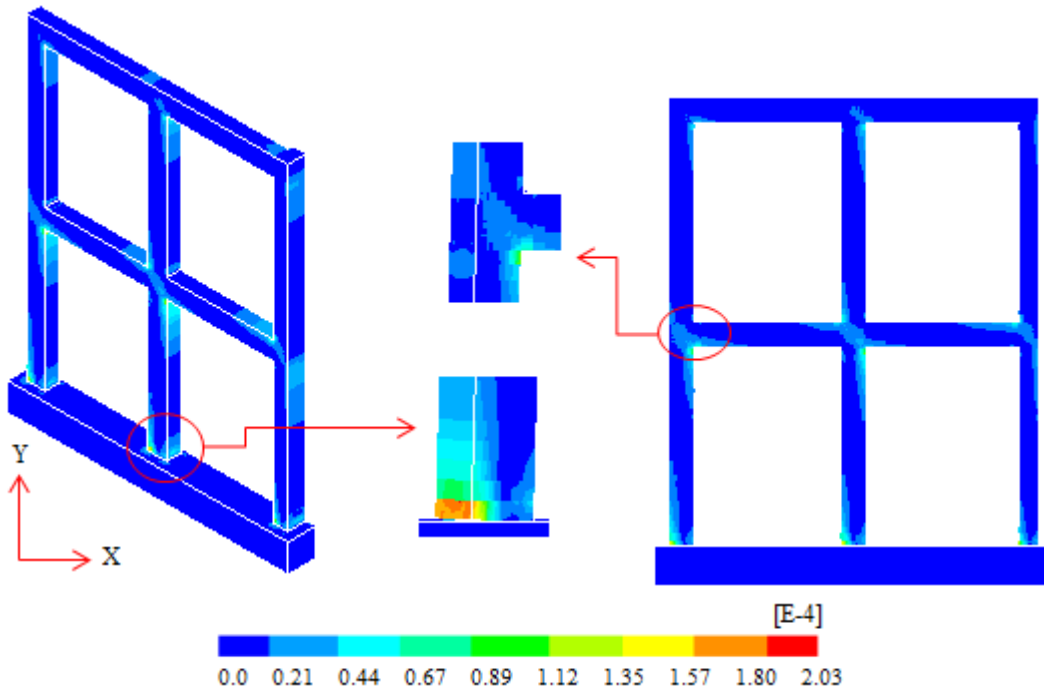
Şekil 2.112. Betonarme düzlem çerçevenin güçlendirilmiş durumunun dinamik davranışından elde edilen minimum asal gerilme kontur diyagramı



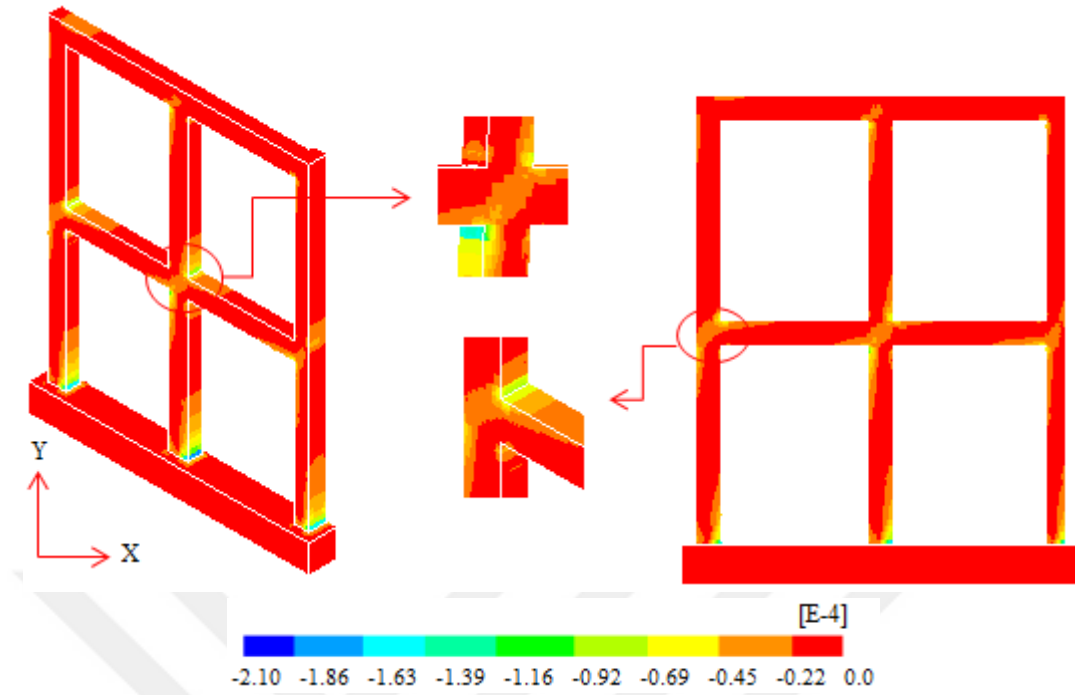
Şekil 2.113. Betonarme düzlem çerçevenin güçlendirilmiş durumunun yüzde beş sönüm oranı için dinamik davranışından elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi

2.4.5.7.3. Asal Şekildeğiştirmeler

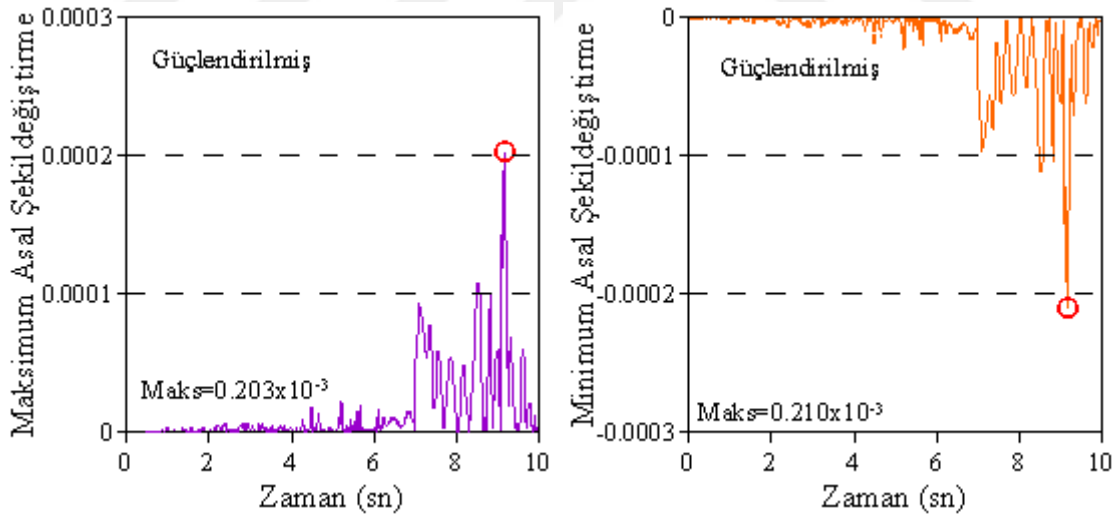
Betonarme düzlem çerçevenin güçlendirilmiş durumunun dinamik davranışından elde edilen maksimum asal şekildeğiştirme kontur diyagramı Şekil 2.114'te, minimum asal şekildeğiştirme kontur diyagramı ise Şekil 2.115'te verilmektedir. Kontur diyagramları model çerçeve üzerinde maksimum veya minimum asal şekildeğiştirme değerlerinin elde edildiği andaki şekildeğiştirme dağılımını göstermektedir. Betonarme düzlem çerçevenin güçlendirilmiş durumunun dinamik davranışından elde edilen maksimum ve minimum asal şekildeğiştirmelerin zamanla değişimi Şekil 2.116'da verilmektedir. Şekil 2.116'da görüldüğü üzere maksimum asal şekildeğiştirme değeri 0.203×10^{-3} , minimum asal şekildeğiştirme değeri ise 0.210×10^{-3} 'tür. Onarılmış durum ile karşılaştırıldığında maksimum asal şekildeğiştirme değerinde %72.4 oranında, minimum asal şekildeğiştirme değerinde ise %63.6 oranında bir azalış elde edilmiştir.



Şekil 2.114. Betonarme düzlem çerçevenin güçlendirilmiş durumunun yüzde beş sönüm oranı için dinamik davranışından elde edilen maksimum asal şekildeğiştirme kontur diyagramı



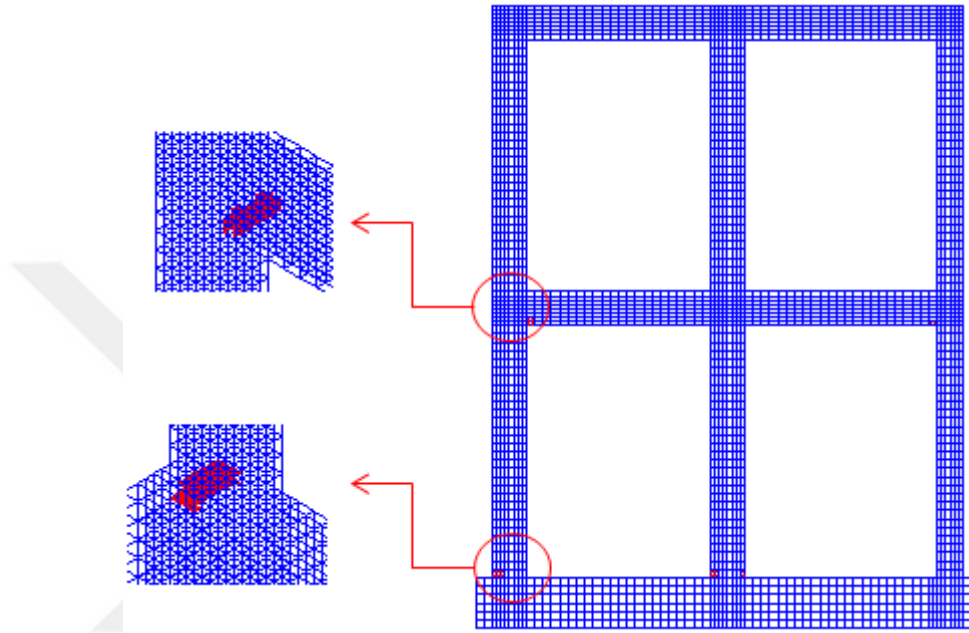
Şekil 2.115. Betonarme düzlem çerçevenin güçlendirilmiş durumunun yüzde beş sönüm oranı için dinamik davranışından elde edilen minimum asal şekildeğiştirme kontur diyagramı



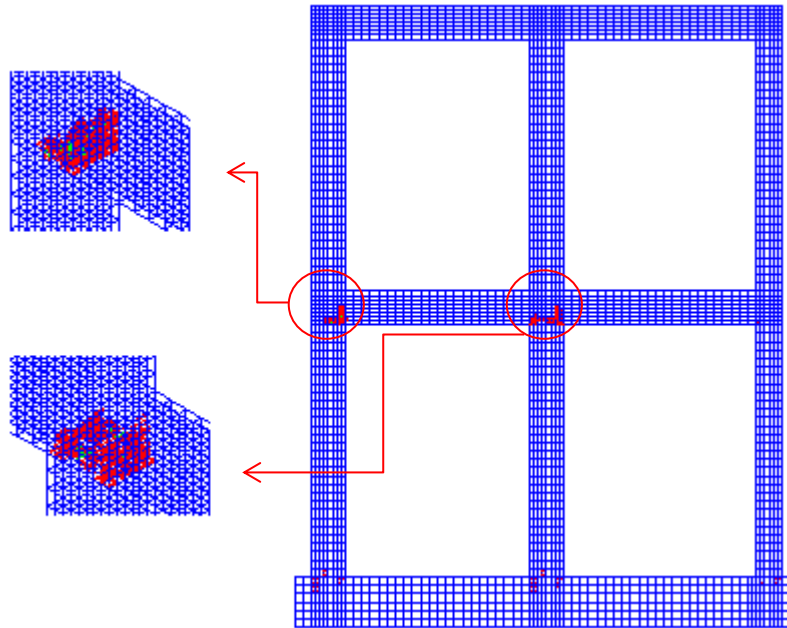
Şekil 2.116. Betonarme düzlem çerçevenin güçlendirilmiş durumunun yüzde beş sönüm oranı için dinamik davranışından elde edilen maksimum ve minimum asal şekildeğiştirmelerin zamanla değişimi

2.4.6. Doğrusal Olmayan Dinamik Analiz ile Betonarme Düzlem Çerçeve Hasar Neticesinde Oluşan Çatlakların Değerlendirilmesi

Betonarme düzlem çerçevenin dinamik analizleri sonucunda kolon-kiriş ve kolon-temel birleşim bölgelerinde çatlaklar elde edilmiştir (Şekil 2.117).



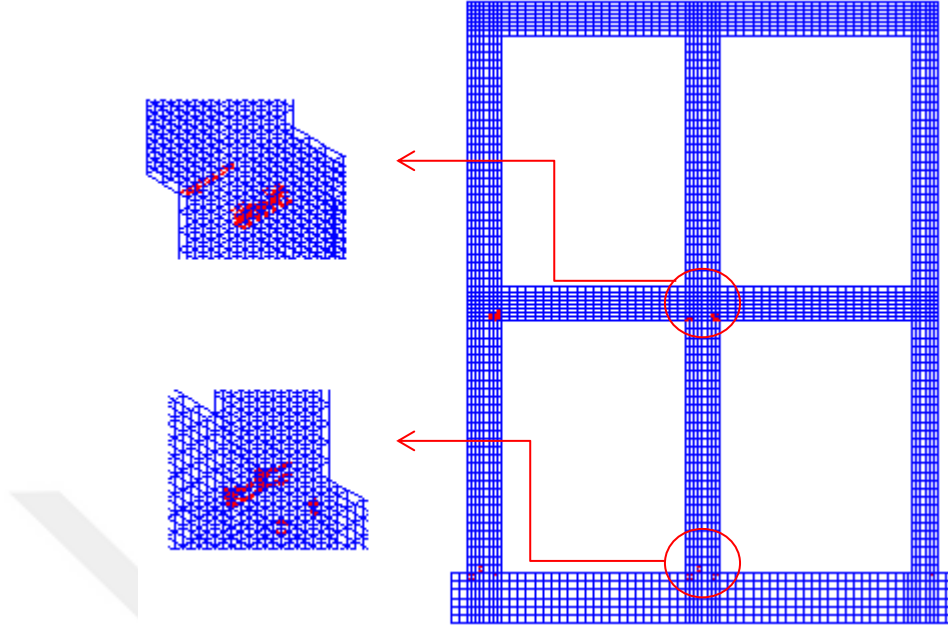
a) Hasarsız modelin doğrusal olmayan dinamik analizi sonucu oluşan çatlaklar



b) Hasarlı modelin doğrusal olmayan dinamik analizi sonucu oluşan çatlaklar

Şekil 2.117. Dinamik analizler sonucu oluşan çatlakların karşılaştırılması

Şekil 2.117'nin devamı



c) Onarılmış modelin doğrusal olmayan dinamik analizi sonucu oluşan çatlaklar

Hasarsız durumdaki yapıda gözlenen çatlakların hasarla birlikte arttığı, onarım ile azaldığı, güçlendirme uygulamasıyla birlikte ise kaybolduğu gözlenmiştir (Şekil 2.117).

3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, betonarme binaların dinamik davranışına lifli polimer kompozit malzeme etkisi, deneysel ve analitik yöntemlerle araştırılmıştır. Tez kapsamında yapılan çalışmalar deneysel ve analitik olarak iki kısımda incelenmiştir. Deneysel kısımda öncelikle model çerçevenin çevresel titreşim testleri; hasarsız, hasarlı, onarılmış ve güçlendirilmiş durumlar için gerçekleştirilmiştir. Her bir durum için elde edilen dinamik karakteristikler birbirleriyle karşılaştırılmış ve elde edilen farklılıklar irdelenmiştir. Analitik kısımda ise betonarme düzlem çerçevenin sonlu eleman modeli deneysel özellikler dikkate alınarak ANSYS (2016) programında oluşturulmuştur ve dinamik karakteristikler elde edilmiştir. Analitik ve deneysel olarak elde edilen dinamik karakteristikler birbirleriyle karşılaştırılmış, sonuçlar arasındaki farklılıklar malzeme özellikleri dikkate alınarak FEMtools (2017) programı kullanılarak minimum düzeye indirilmiştir. Son olarak betonarme düzlem çerçevenin hasarsız, hasarlı, onarılmış ve güçlendirilmiş durumlarının doğrusal olmayan dinamik davranışları elde edilmiştir. Bu tez kapsamında yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar maddeler halinde aşağıda sunulmaktadır.

- Betonarme düzlem çerçeve modelinin hasarsız durumu için GFOA yönteminden elde edilen ilk üç doğal frekans değerleri sırasıyla 13.898 Hz, 39.907 Hz, 123.840 Hz'dir. SAB yönteminden elde edilen ilk üç doğal frekans değerleri ise 13.69 Hz, 39.93 Hz, 124.7 Hz'dir.

- Betonarme düzlem çerçeve modelinin hasarsız durumu için GFOA yönteminden elde edilen ilk üç sönüm oranı sırasıyla %1.022, %0.613, %0.451; SAB yönteminden elde edilen ilk üç sönüm oranı ise %0.859, %0.432, %0.680'dir.

- Betonarme düzlem çerçeve modelinin hasarsız durumu için GFOA ve SAB yöntemlerinden elde edilen deneysel mod şekilleri birbiriyle uyumludur.

- Betonarme binaların yapısal elemanlarında oluşabilecek hasar durumu darbe etkisiyle kademeli olarak oluşturulmuştur. Deneysel dinamik karakteristikler elde edilerek hasarın dinamik karakteristiklerde meydana getirdiği değişimler incelenmiştir.

- Hasar durumunda betonarme düzlem çerçeve modelinin GFOA yönteminden elde edilen ilk üç doğal frekans değerleri sırasıyla 7.269 Hz, 23.263 Hz, 69.293 Hz'dir. SAB yönteminden elde edilen ilk üç doğal frekans değerleri ise 4.441 Hz, 23.6 Hz, 62.65 Hz'dir.

Her bir moda karşılık gelen sönüm oranları GFOA yönteminde sırasıyla %2.28, %0.985, %0.686; SAB yönteminde ise %15.32, %9.463, %6.887'dir. GFOA ve SAB yönteminden elde edilen sönüm oranlarında farklılıklar gözlenmiştir.

- Betonarme düzlem çerçeveye verilen hasarla birlikte çevresel titreşim yöntemlerinden GFOA'ya göre doğal frekanlar maksimum %47.70, SAB yöntemine göre ise %65.56 azalmıştır.

- Hasarlı durumdaki betonarme düzlem çerçeve modeli üzerinde onarım işlemi gerçekleştirilmiştir. Onarım işleminin dinamik karakteristikler üzerine olan etkisi incelenmiştir.

- Onarım işlemi sonrası GFOA yönteminden elde edilen ilk üç doğal frekans değerleri sırasıyla 9.895 Hz, 30.27 Hz, 115.6 Hz'dir. SAB yönteminden elde edilen ilk üç doğal frekans değerleri ise 9.573 Hz, 30.09 Hz, 114.8 Hz'dir. Her bir moda karşılık gelen sönüm oranları GFOA yönteminde sırasıyla %2.178, %1.783, %1.375'tir. SAB yönteminde ilk moda ait sönüm oranı belirlenememiştir. Diğer iki moda ait sönüm oranları ise sırasıyla %6.627, %2.159'dur.

- Betonarme düzlem çerçeve modeli onarıldıktan sonra LP kompozit kumaş ile 3 kat sargılanarak güçlendirilmiş ve dinamik karakteristikler elde edilmiştir.

- Güçlendirme sonrası betonarme düzlem çerçeve modelinin doğal frekansları GFOA yönteminden sırasıyla 13.14 Hz, 43.12 Hz, 113.9 Hz; SAB yönteminden ise 15.53 Hz, 39.65 Hz, 113.7 Hz olarak elde edilmiştir. İlk üç moda karşılık gelen sönüm oranları GFOA yöntemine göre sırasıyla %1.5, %1.085, %0.910'dur. SAB yöntemine göre ise ilk moda ait sönüm elde edilememiştir. Diğer iki moda ait sönüm oranları ise %0.964 ve %0.816'dır.

- Betonarme düzlem çerçeve modeline uygulanan çevresel titreşim testlerinden toplanan sinyallerin GFOA ve SAB yöntemlerine göre ayrıştırılması sonucunda elde edilen dinamik karakteristikler birbirine çok yakındır. Bu durum her iki yöntem için elde edilen sonuçların uyum içerisinde olduğunu göstermektedir.

- Betonarme düzlem çerçevenin modal analizinden elde edilen ilk üç analitik doğal frekans 18.012 Hz, 55.225 Hz, 149.470 Hz'dir.

- Betonarme düzlem çerçeve modelinin analitik ve deneysel mod şekilleri birbiriyle benzerdir. Betonarme düzlem çerçevenin analitik ve deneysel mod şekilleri arasında modal güvence kriterine göre %72.3-96.4 benzerlik vardır.

- Betonarme düzlem çerçeve modelinden elde edilen analitik ve deneysel doğal frekanslar arasında maksimum %38.38 fark bulunmaktadır. Bu farkların sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme özelliklerinden kaynaklı olduğu belirlenmiş ve malzeme özelliklerinin değiştirilmesiyle ilgili farklar kabul edilebilir düzeye indirilmiştir. Bu amaçla deneysel veriler referans kabul edilmiş ve betonarme düzlem çerçevenin sonlu eleman modeli deneysel verilere göre iyileştirilmiştir.

- Betonarme düzlem çerçevenin sonlu eleman modelinin iyileştirilmesinden (bütünsel) sonra elde edilen ilk üç doğal frekans; 13.629 Hz, 41.631 Hz, 118.380 Hz'dir. Deneysel ve analitik ilk üç doğal frekanslar arasındaki farklar sırasıyla %1.94, %4.14 ve %4.40'a düşürülmüştür.

- Model iyileştirme (bütünsel güncelleme) sonrası deneysel ve analitik olarak elde edilen mod şekilleri arasında modal güvence kriterine göre %64.7-95.6 benzerlik vardır.

- Betonarme düzlem çerçevenin sonlu eleman modelinin iyileştirilmesinden (bütünsel) sonra frekanslar arasındaki farkları daha da düşürmek amacıyla tekrar model (yerel) iyileştirilmiştir. Model (yerel) iyileştirmeden sonra deneysel ve analitik yöntem ile elde edilen doğal frekanslar arasındaki farklar maksimum %0.21'e indirilmiştir. Modal güvence kriterine göre ise deneysel mod şekilleriyle analitik yöntem ile elde edilen mod şekilleri arasındaki farklar %64.2-96.2 arasındadır.

- Hasar durumunda betonarme düzlem çerçevenin ilk üç analitik doğal frekansı 7.283 Hz, 23.277 Hz, 69.304 Hz'dir. Analitik ve deneysel doğal frekanslar arasındaki farklar maksimum %0.19'dur.

- Hasar durumunda betonarme düzlem çerçeve modelinin analitik ve deneysel mod şekilleri arasında modal güvence kriterine göre %80.1-97.6 benzerlik vardır.

- Onarılmış durumda betonarme düzlem çerçeve modelinin deneysel ve analitik mod şekilleri arasında modal güvence kriterine göre %56.3-98.8 oranında benzerlik vardır. Deneysel ve analitik olarak elde edilen üçüncü mod şeklinin birbirine uzak olduğu görülmüştür.

- Onarılmış durumdaki betonarme düzlem çerçeve modelinin sonlu eleman analizinden elde edilen ilk doğal frekans 9.967 Hz, ikinci doğal frekans 30.568 Hz, üçüncü doğal frekans 116.38 Hz'dir.

- Güçlendirilmiş durumdaki betonarme düzlem çerçeve modelinin ilk üç analitik doğal frekansı sırasıyla 14.287 Hz, 42.010 Hz, 106.930 Hz'dir. İlk analitik doğal frekans,

deneysel doğal frekansın üzerine çıkmıştır ve yapı hasar öncesi durumundan daha iyi bir hale gelmiştir.

- Güçlendirilmiş durumdaki betonarme düzlem çerçeve modelinin analitik ve deneysel mod şekilleri arasında modal güvence kriterine göre %85.8-97.2 uyum vardır.

- LP kompozit güçlendirmenin dinamik karakteristiklerin iyileştirilmesinde olumlu etkilere sahip olduğu görülmüştür.

- Betonarme düzlem çerçevenin doğrusal olmayan dinamik davranışları belirlenmiştir. Hasarsız durum için gerçekleştirilen dinamik analizden elde edilen maksimum yerdeğiştirme 0.341 mm'dir. İyileştirmeyle (bütünsel) elde edilen maksimum yerdeğiştirme, başlangıç modele ait değere göre %148.7 artmıştır ve değeri 0.848 mm'dir. Sonlu elemanların herbirine farklı eleman özelliği verilerek yapılan yerel iyileştirme ile maksimum yerdeğiştirme değeri, bütünsel olarak gerçekleştirilen iyileştirme ile elde edilen maksimum yerdeğiştirme değerine göre %23.3 oranında azalmıştır.

- Hasarsız durumdaki betonarme düzlem çerçevenin doğrusal olmayan dinamik analizinden elde edilen maksimum asal gerilme değeri 1.616 MPa, minimum asal gerilme değeri ise 1.706 MPa'dır.

- Hasarsız durumdaki betonarme düzlem çerçevenin doğrusal olmayan dinamik analizinden elde edilen maksimum asal şekildeğiştirme değeri 0.124×10^{-3} , minimum asal şekildeğiştirme ise 0.598×10^{-4} 'tür.

- Hasarsız iyileştirilmiş (bütünsel) betonarme düzlem çerçevenin doğrusal olmayan dinamik analizinden elde edilen maksimum asal gerilme değeri 1.659 MPa, minimum asal gerilme değeri ise 2.089 MPa'dır. Başlangıç sonlu eleman modeline göre maksimum asal gerilme değerinde %2.7, minimum asal gerilme değerinde ise %22.5 oranında artış elde edilmiştir. Hasarsız durumdaki başlangıç çerçeve modeline göre maksimum asal şekildeğiştirme değeri %180.6, minimum asal şekildeğiştirme değeri %144.1 oranında artmıştır.

- Betonarme düzlem çerçevenin iyileştirilmiş (yerel) sonlu eleman modelinin doğrusal olmayan dinamik analizinden elde edilen maksimum asal gerilme değeri 1.527 MPa, minimum asal gerilme değeri ise 1.775 MPa'dır. İyileştirilmiş (bütünsel) sonlu eleman modeline göre maksimum asal gerilme değeri %8, minimum asal gerilme değeri ise %15 oranında azalmıştır; maksimum asal şekildeğiştirme değeri %51.1 oranında artmıştır, minimum asal şekildeğiştirme değeri ise %15.8 oranında azalmıştır.

▪ Hasarlı durumdaki betonarme düzlem çerçevenin, sonlu eleman modelinin doğrusal olmayan dinamik analizinden elde edilen maksimum yerdeğiştirme değeri 1.517 mm'dir. Hasarsız durumdaki iyileştirilmiş (yerel) sonlu eleman modeline göre yerdeğiştirme değerinde %133.4 oranında bir artış elde edilmiştir.

▪ Betonarme düzlem çerçevenin hasar durumunda maksimum ve minimum asal gerilme değerleri sırasıyla 1.161 MPa ve 1.305 MPa'dır. Hasarsız yerel güncelleştirilmiş sonlu eleman modeline göre maksimum asal gerilme değeri %24, minimum asal gerilme değeri ise %26.5 oranında azalmıştır.

▪ Betonarme düzlem çerçevenin hasar durumunda maksimum ve minimum asal şekildeğiştirme değerleri sırasıyla 0.130×10^{-2} , 0.816×10^{-3} 'tür. Hasarsız iyileştirilmiş (yerel) sonlu eleman modeline göre maksimum asal şekildeğiştirme değeri %147.1, minimum asal şekildeğiştirme değeri %563.4 oranında artmıştır.

▪ Onarılmış durumda maksimum yerdeğiştirme değeri hasarlı duruma göre %31.8 oranında azalmıştır. Maksimum ve minimum asal gerilme değerleri hasarlı duruma göre sırasıyla %34.7, %30.5 oranında artmıştır.

▪ Betonarme düzlem çerçevenin onarılmış durumunun sonlu eleman modelinin doğrusal olmayan dinamik analizinden elde edilen maksimum asal şekildeğiştirme %43.4, minimum asal şekildeğiştirme %29.3 oranında bir azalış göstermiştir.

▪ Betonarme düzlem çerçevenin güçlendirilmiş durumunun sonlu eleman modelinin doğrusal olmayan dinamik analizinden elde edilen maksimum yerdeğiştirme 0.663 mm'dir. Onarılmış duruma göre yerdeğiştirme değerinde %35.9 oranında bir azalış elde edilmiştir.

▪ Güçlendirilmiş durumda doğrusal olmayan dinamik analizden elde edilen maksimum asal gerilme değeri 1.268 MPa, minimum asal gerilme değeri ise 1.107 MPa'dır. Onarılmış duruma göre maksimum asal gerilmede %18.9, minimum asal gerilmede %35 oranında bir azalış elde edilmiştir.

▪ Güçlendirilmiş durumda doğrusal olmayan dinamik analizden elde edilen maksimum asal şekildeğiştirme değeri ve minimum asal şekildeğiştirme değeri sırasıyla 0.208×10^{-3} ve 0.215×10^{-3} 'tür. Onarılmış duruma göre maksimum asal şekildeğiştirmede %71.7, minimum asal şekildeğiştirmede %62.7 oranında bir azalış elde edilmiştir.

▪ Güçlendirme durumunda yapılan dinamik analizler sonucu maksimum yerdeğiştirmenin hasarsız durumdaki yerdeğiştirmeden daha büyük çıktığı gözlenmiştir. Bu durumun sönüm oranlarının ya da elastisite modüllerinin farklılığından kaynaklandığı

düşünülmüş olarak elastisite modülü sabit tutularak sönüm oranı yüzde beş alınıp analiz yapılmıştır.

- Betonarme düzlem çerçevenin, güçlendirilmiş durum sonlu eleman modelinin yüzde beş sönüm oranı dikkate alınarak yapılan doğrusal olmayan dinamik analizinden elde edilen maksimum yerdeğiştirme 0.644 mm'dir. Onarılmış duruma göre yerdeğiştirmede %37.7 oranında bir azalış elde edilmiştir.

- Güçlendirme durumunda sonlu eleman modelinin yüzde beş sönüm oranı dikkate alınarak yapılan doğrusal olmayan dinamik analizinden elde edilen maksimum asal gerilme 1.232 MPa, minimum asal gerilme 1.076 MPa'dır. Onarılmış duruma göre maksimum asal gerilmeye %21.2, minimum asal gerilmeye %36.8 oranında bir azalış elde edilmiştir.

- Güçlendirilmiş durumda yüzde beş sönüm oranı dikkate alınarak yapılan doğrusal olmayan dinamik analizden elde edilen maksimum asal şekildeğiştirme değeri 0.203×10^{-3} , minimum asal şekildeğiştirme değeri ise 0.210×10^{-3} 'tür. Onarılmış duruma göre maksimum asal şekildeğiştirme değeri %72.4, minimum asal şekildeğiştirme değeri ise %63.6 oranında bir azalmıştır.

- Doğrusal olmayan dinamik analiz sonucu betonarme düzlem çerçeve modelinin kolon-kiriş birleşim bölgelerinde çatlaklar tespit edilmiştir. Bu çatlaklar hasarlı modelde artış göstermiş, onarılmış modelde azalmış, güçlendirilmiş modelde ise kaybolmuştur.

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar ışığında yapılan bazı öneriler maddeler halinde aşağıda sunulmaktadır:

- Betonarme düzlem çerçeve modelinin dinamik karakteristikleri sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla ve çevresel titreşim testi yardımıyla elde edilmiştir. Bunlara ek olarak dinamik karakteristikler analitik çözüm yöntemiyle de elde edilerek kıyaslanabilir.

- Betonarme düzlem çerçeve modelinin dinamik davranışına lifli polimer kompozit malzemenin etkisi CFRP malzemesi kullanılarak bulunmuştur. Farklı tür lifli polimer çeşidi kullanılarak bunların da dinamik davranışa etkisi bulunabilir.

- Betonarme düzlem çerçeve modelinin deprem davranışı analitik olarak elde edilmiştir. Sarsma masası yardımıyla deprem davranışı deneysel olarak da elde edilerek sonuçlar karşılaştırmalı olarak incelenebilir.

- Betonarme düzlem çerçeve modeline 3 kat lifli polimer kompozit malzeme uygulanarak deneysel ve analitik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Farklı kumaş sarım sayıları veya kumaş kalınlıkları seçilerek uygulanan bu parametrelerin dinamik davranış üzerindeki etkileri belirlenebilir.

- Betonarme düzlem çerçeve modelinin çevresel titreşim yoluyla elde edilen dinamik karakteristikleri, zorlanmış titreşim yoluyla da elde edilerek karşılaştırılabilir.
- Farklı tür mühendislik yapılarına lifli polimer kompozit malzemesi uygulanarak bu alanlarda da uygulamanın etkinliği ortaya konulabilir.



4. KAYNAKLAR

- Akköse, M., 2004. Lagrange Yaklaşımı ile Kemer Baraj-Su-Zemin Sistemlerinin Malzeme Bakımından Lineer ve Lineer Olmayan Dinamik Analizi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Alcaino, P. ve Santa-Maria, H., 2008. Experimental Response of Externally Retrofitted Masonry Walls Subjected to Shear Loading, Journal of Composites for Construction, 12, 5, 489-498.
- Allemang, R.J., 2003. The Modal Assurance Criterion: Twenty Years of Use and Abuse, Sound and Vibration, 37, 8, 14-23.
- Altunışık, A.C., 2010. Karayolu Köprülerinin Yapısal Davranışlarının Analitik ve Deneysel Yöntemlerle Belirlenmesi, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye.
- Altunışık, A.C., Bayraktar, A. ve Sevim, B., 2011. Output-Only System Identification of Post Tensioned Segmental Concrete Highway Bridges, Journal of Bridge Engineering, 16, 2, 259-266.
- Altunışık, A.C., Bayraktar, A., Genç, A.F., 2016. A Study on Seismic Behaviour of Masonry Mosques After Restoration, Earthquakes and Structures, 10, 6, 1331-1346.
- Altunışık, A.C., Günaydın, M., Sevim, B., Bayraktar, A., Adanur, S., 2016. Dynamic Characteristics of an Arch Dam Model before/after Strengthening Considering Reservoir Water, Journal of Performance of Constructed Facilities, 30, 6, 1-7.
- Altunışık, A.C., Adanur, S., Genç, A.F., Günaydın, M., Okur, F., 2017. An Investigation of the Seismic Behaviour of an Ancient Masonry Bastion using Non-Destructive and Numerical Methods, Experimental Mechanics, 57, 2, 245-259.
- Anıl, Ö. ve Belgin, Ç., 2008. Review of Bond-Strength Models and Application on CFRP to Concrete Bonded Joints across Crack, Science and Engineering of Composite Materials Journal, 15, 2, 141-158.
- ANSYS, 2016. Swanson Analysis System, Pennsylvania, USA.
- Ashory, M.R., 1999. High Quality Modal Testing Methods, Doktora Tezi, Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of London, London, England.
- Bank, L.C., 2006. Composites for Construction Structural Design with FRP Materials, John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, New Jersey.

- Başığmez, İ.H., 2007. Kesme Açısından Yetersiz Betonarme Kısa Kolonların Lifli Polimerler ile Depreme Karşı Güçlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- Baştürk, M.H., 2013. Bursa Tarihi Yığıma Minarelerinin Dinamik Davranışlarının Modal Analiz Yöntemi ile İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Uludağ Üniversitesi, Bursa, Türkiye.
- Bathe, K.J., 1996. Finite Element Procedures in Engineering Analysis, Prentice-Hall, New Jersey, USA.
- Bayraktar, A. ve Türker, T., 2005-a. Deneysel Modal Analiz Yöntemi ile Düzlem Çerçevelerin Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi, Deprem Sempozyumu Kocaeli, Türkiye, Bildiriler Kitabı: 1035-1041.
- Bayraktar, A. ve Türker, T., 2005-b. Finite Element Modelling and Experimental Modal Testing of Steel Structures, The 1st International Operational Modal Analysis Conference (IOMAC2005), Copenhagen, Denmark, Bildiriler Kitabı: 374-380.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B. ve Türker, T., 2007a. Modal Testing and Finite Element Model Calibration of an Arch Type Steel Footbridge, Steel and Composite Structures, 7, 6, 487-502.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Türker, T. ve Sevim, B., 2007b. Tarihi Yığıma Köprülerin Sonlu Eleman Modellerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle İyileştirilmesi, Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu 1, Eylül, Ankara, Türkiye, Bildiriler Kitabı: 429-440.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B., Türker, T., Akköse, M. ve Coşkun, N., 2008a. Modal Analysis, Experimental Validation and Calibration of a Historical Masonry Minaret, Journal of Testing and Evaluation, 36, 6, 516-524.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B., Türker, T., Domaniç, A. ve Taş, Y., 2008b. Köprülerin Dinamik Karakteristiklerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi, Yapı Dünyası Dergisi, 150, 44-57.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B., Türker, T., Domaniç, A. ve Taş, Y., 2008c. Kömürhan Köprüsünün Dinamik Karakteristiklerinin Analitik ve Deneysel Modal Analiz Yöntemleriyle Belirlenmesi, İMO İstanbul Şubesi Bülteni, 98, 10-21.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B., Türker, T., Adanur, S. ve Ateş, Ş., 2008d. Ambient Vibration Testing of Steel Footbridges for Structural Identification, Proceedings of the Fifth International Engineering and Construction Conference (IECC'5), August, Irvine, USA, Bildiriler Kitabı: 87-94.
- Bayraktar, A., Sevim, B., Altunışık, A.C., Türker, T. ve Adanur, S., 2008e. Determination of Blast Vibration Effects on the Dynamic Behaviour of the Highway Bridges using Modal Testing, Eighth International Congress on Advances in Civil

Engineering, September 15-17, Eastern Mediterranean University, Famagusta, North Cyprus (ACE08-158), 3, Bildiriler Kitabı: 557-565.

- Bayraktar, A., Sevim, B., Altunışık, A.C. ve Türker, T., 2009a. Analytical and Operational Modal Analyses of Turkish Style Reinforced Concrete Minarets for Structural Identification, Experimental Techniques, 33, 2, 65-75.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B. ve Türker, T., 2009b. 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.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B., Türker, T., Domaniç, A. ve Taş, Y., 2009c. Vibration Characteristics of Kömürhan Highway Bridge Constructed with Balanced Cantilever Method, Journal of Performance of Constructed Facilities, 23, 2, 90-99.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B., Türker, T. ve Domaniç, A., 2009d. Kömürhan Köprüsünün Sonlu Eleman Model İyileştirilmesi, Teknik Dergi, 20, 2, 4675-4700.
- Bayraktar, A., Türker, T., Sevim, B., Altunışık, A.C. ve Yıldırım, F., 2009e. Modal Parameter Identification of Hagia Sophia Bell-Tower via Ambient Vibration Test, Journal of Nondestructive Evaluation, 28, 1, 37-47.
- Bayraktar, A., Birinci, F., Altunışık, A.C., Türker, T. ve Sevim, B., 2009f. 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.
- Bayraktar, A., Sevim, B., Altunışık, A.C., Adanur, S. ve Akköse, M. 2009g. Experimental and Analytical Modal Analyses of a Prototype Arch Dam-Reservoir-Foundation Model, International Earthquake Symposium, Ağustos, Kocaeli, Turkey, Bildiriler Kitabı: 256-269.
- Bayraktar, A., Sevim, B., Altunışık, A.C. ve Türker, T., 2010a. Effect of the Model Updating on Earthquake Behavior of Steel Storage Tanks, Journal of Constructional Steel Research, 66, 462-469.
- Bayraktar, A., Sevim, B., Altunışık, A.C. ve Türker, T., 2010b. Earthquake Analysis of Reinforced Concrete Minarets using Ambient Vibration Test Results, The Structural Design of Tall and Special Buildings, 19, 3, 257-273.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B. ve Türker, T., 2010c. Finite Element Model Updating of Kömürhan Highway Bridge based on Experimental Measurements, Journal of Smart Structures and Systems, 6, 4, 373-388.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B. ve Türker, T., 2010d. Earthquake Behaviour of Kömürhan Highway Bridge using Validated Finite Element Model, Journal of Testing and Evaluation, 38, 4, 1-15.

- Bayraktar, A., Türker, T., Altunışık, A.C., Sevim, B., Şahin, A. ve Özcan, M., 2010e. Binaların Dinamik Parametrelerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi, Teknik Dergi, 337, 5185-5205.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Birinci, F., Sevim, B. ve Türker, T., 2010f. Finite Element Analysis and Vibration Testing of a Two-Span Masonry Arch Bridge, Journal of Performance of Constructed Facilities, 24, 1, 46-52.
- Bayraktar, A., Türker, T., Altunışık, A.C. ve Sevim, B., 2010g. Evaluation of Blast Effects on Reinforced Concrete Buildings Considering Operational Modal Analysis Results, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 30, 5, 310-319.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B. ve Türker, T., 2010h. Ambient Vibration Tests of a Steel Footbridge, Journal of Nondestructive Evaluation, 29, 1, 14-24.
- 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.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Temel, T., 2016. Structural Health Assessment and Restoration Procedure of an Old Riveted Steel Arch Bridge, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 83, 148-161.
- Bendat, J. ve Piersol, A., 1986. Random Data: Analysis and Measurement Procedures, 2nd Edition, John Wiley and Sons, USA.
- Bendat, J.S. ve Piersol, A.G., 2004. Random Data: Analysis and Measurement Procedures, 3th Edition, John Wiley and Sons, USA.
- Biçer, E., 2011. Development of Design Guideline for Seismic Retrofitting of RC Beam-Column Joints Using CFRP Materials, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- 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, Bildiriler Kitabı: 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, Proceedings of 21st International Modal Analysis Conference on Structural Dynamics, Kissimme, Orlando, USA, Bildiriler Kitabı: 265-272.
- Brughmans, M., Lembregts, F. ve Furini, F., 1995. Modal Test on the Pininfarina Concept Car Body "ETHOS 1", MSC 1995 World User's Conference Proc, 5.
- Bulut, E., 2006. FRP Sargılı Dikdörtgen Kesitli Betonarme Kolonların Yük Taşıma Kapasitelerinin Farklı Davranış Modellerine Göre İrdelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.

- Bulut, N., 2009. CFRP ile Kesmeye Karşı Güçlendirilmiş Betonarme Kirişlerin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Doğrusal Olmayan Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
- Caetano, E., 2000. Dynamic of Cable-stayed Bridges: Experimental Assessment of Cable-Structure Interaction, Doktora Tezi, Engineering Faculty of University of Porto, Portugal.
- Camata, G., Spacone, E. ve Zarnic, R., 2007. Experimental and Nonlinear Finite Element Studies of RC Beams Strengthened with FRP Plates, Elsevier, Composites Part B: Engineering, 38, 277-288.
- Capozucca, R., 2011. Experimental Analysis of Historic Masonry Walls Reinforced by CFRP Under in Plane Cyclic Loading, Composite Structures, 94, 277-289.
- Cardoso, M., Sampaio, R.A.C., Souza, R.M. ve Silva, E., 2015. Operational Modal Analysis of Road-Rail Bridge, MATEC Web of Conference, 24.
- Catbas, F.N., 1997. Investigation of Global Condition Assessment and Structural Damage Identification of Bridges with Dynamic Testing and Modal Analysis, Doktora Tezi, University of Cincinnati, Cincinnati, USA.
- CEB-FIB (International Federation for Structural Concrete), 2001. Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures, Lausanne, Switzerland.
- Ceballos, M.A., Car, E.J., Prato, C.A. ve Alvarez, L.M., 1998. Experimental and Numerical Determination of the Dynamic Properties of the Reactor Building of Atucha II NPP, Nuclear Engineering and Design, 182, 93-106.
- Chansawat, K., 2003. Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures Strengthened with FRP Laminates, Doktora Tezi, Oregon State University, Corvallis, Oregon.
- Chen, W.F. ve Mizuno, E., 1990. Nonlinear Analysis in Soil Mechanics, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, Netherlands.
- Chopra, A.K., 2006. Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering, Third Edition, Prentice Hall, USA.
- Çelik, K.V. ve Karşın, H., 2014. Karbon Elyaf ile Betonun Güçlendirilmesi, Mühendislik Dergisi, 5, 1, 1-11.
- Çolakoğlu, A. ve Köksal, Ö., 2000. Savunma Sistemlerinde Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Doğal Frekans Analizi, Aselsan Dergileri, 55.
- Doğan, A.B., 2008. Karbon Polimer Elyaf ile Güçlendirilmiş Beton Kirişlerin Sonlu Elemanlar Metodu ile Lineer Olmayan Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye.

- Doran, B., Köksal, H.A., Polat, Z. ve Karakoç, C., 1998. The Use of Drucker-Prager Criterion in the Analysis of Reinforced Concrete Members by Finite Elements, Digest, 98, 489-493.
- Ersoy, H.Y., 2001. Kompozit Malzeme, Birinci Basım, Literatür Yayıncılık, İstanbul, Türkiye.
- Ersoy, U., 2012. Betonarme, 1. Cilt, 3. Basım, Evrim Yayınevi ve Bilgisayar San. Tic. Ltd, Şti., İstanbul.
- Ewins, D.J., 2000. Modal Testing: Theory and Practice, Research Studies Press Ltd. England.
- 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, Bildiriler Kitabı: 351-370.
- FEMtools, 2017. CAE Software and Services, Leuven, Belgium.
- Gedik, O., 2008. LP Sargılı Beton İçin Önerilmiş Olan Dayanım ve Şekildeğiştirme Modellerinin Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- Goldston, M., Remennikov, A. ve Sheikh, M.N., 2016. Experimental Investigation of the Behaviour of Concrete Beams Reinforced with GFRP Bars under Static and Impact Loading, Engineering Structures, 113, 220-232.
- Göge, D., Sinagius, M., Füllekrug, U. ve Link, M., 2005. Detection and Description of Non-Linear Phenomena in Experimental Modal Analysis via Linearity Plots, International Journal of Non-Linear Mechanics, 40, 27-48.
- Günaydın, M., Adanur, S., Altunışık, A.C. ve Sevim, B., 2015. Static and Dynamic Responses of Halvagar Footbridge Using Steel and FRP Materials, Steel and Composite Structures, 18, 51-69.
- Günaydın, M., 2016. Onarılmış ve Lifli Polimer Kompozit Malzemelerle Güçlendirilmiş Betonarme Binaların Dinamik Davranışlarının Deneysel ve Analitik Yöntemlerle İncelenmesi, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye.
- Haapaniemi, H., Luukkanen, P., Nurkkala, P., Rostedt, J ve Saarenheimo, A., 2003. Correlation Analysis from Modal Analysis of a Pipeline, Proceeding of the 21th International Modal Analysis Conference (IMAC), Orlando, Florida.
- Hermans, L. ve Auweraer, H.V.D., 1999. Modal Testing and Analysis of Structures under Operational Conditions: Industrial Applications, Mechanical Systems and Signal Processing, 13, 2, 193-216.

- Heylen, W., Lammens, S. ve Sas, P., 2007. Modal Analysis Theory and Testing, Leuven Katholieke Universtiy, Department of Mechanical Engineering, Leuven, Belgium.
- Hwang, H., Jernigan, J.B. ve Lin, Y.W., 2000. Evaluation of Seismic Dynamic to Memphis Bridges and Highway Systems, Journal of Bridge Engineering, ASCE, 5, 4, 322-330.
- Inaudi, D., Casanova, N., Vurpillot, S., Glisic, B., Kronenberg, P. ve Lloret, S., 2000. Bridge Deformation Monitoring during Enlargement and Refurbishment Works under Traffic Conditions, International Association for Bridge and Structural Engineering, IABSE, 16th Congress, Luzern, Switzerland.
- 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, Bildiriler Kitabı: 3129-3141.
- Jafarov, O., 2012. Lifli Polimerle Güçlendirilmiş Yığma Duvarların Modellenmesi, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- Kammer, D.C., 2005. Sensor Set Expansion for Modal Vibration Testing, Mechanical Systems and Signal Processing, 19, 4, 700-713.
- Kantar, E., 2009. CFRP ile Güçlendirilmiş Beton Kirişlerin Çarpma Davranışının Deneysel Olarak İncelenmesi, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
- Karakan, E., 2008. Estimation of Frequency Response Function for Experimental Modal Analysis, Yüksek Lisans Tezi, İzmir Institute of Technology, İzmir, Türkiye.
- Karaşin, H., Öncü, M. ve Yılmaz, S., 2010. CFRP ile Güçlendirilmiş Kesitlerin Tekrarlanan Yükler Altındaki Davranışı, E-Journal of New World Sciences Academy, 5, 3, 515-525.
- Karaşin, H. ve Çelik, K.V., 2014. Karbon Elyaf ile Betonun Güçlendirilmesi, Mühendislik Dergisi, 5, 1, 1-11.
- Kolcu, K., 2008. Yükleme Hızının Lifli Polimer Sargılı Betonun Eksenel Yükler Altındaki Davranışına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- Kudu, F.N., Uçak, Ş., Osmancıklı, G., Türker, T. ve Bayraktar, A., 2015. Estimation of Damping Ratios of Steel Structures by Operational Modal Analysis Method, Journal of Constructional Steel Research, 112, 61-68.
- Lubliner, J., Oliver, J., Ollers, S., ve Onate, E., 1989. A Plastic-Damage Model for Concrete, International Journal of Solid and Structures, 25, 299-326.

- Maeck, J. ve Roeck, G.D., 2000. Experimental and Numerical Modal Analysis of a Concrete High Speed Train Railway Bridge, Proceedings of International Symposium on Modern Concrete Composites and Infrastructure (MCCI2000), Beijing, China, Bildiriler Kitabı: 61-68.
- Mahrebel, H.A., 2006. Tarihi Yapılarda Taşıyıcı Sistem Özellikleri, Hasarlar, Onarım ve Güçlendirme Teknikleri, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- OMA, 2006. Operational Modal Analysis, Release 4.0. Structural Vibration Solution A/S, Denmark.
- Overschee, P.V. ve Moor, B.D., 1996. Subspace Identification for Linear Systems: Theory, Implementation and Applications, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands.
- Özcan, O., Binici, B. ve Özcebe, G., 2010. Yetersiz Betonarme Kolonlar için Lifli Polimer Güçlendirme Tasarım Kurallarının İrdelenmesi, İMO Teknik Dergi, 339, 5219-5239.
- Özgen, K., 2001. Betonarme Sistemlerde İyileştirme ve Güçlendirme Esasları, Yapı Malzemesi ve Deprem Semineri, İTÜ, İstanbul, Mart, 102-111.
- Özkaynak, H., 2010. Dolgu Duvarları Lifli Polimerler ile Sargılanmış Betonarme Çerçeve Sistemlerin Deprem Davranışı ve Yapısal Sönüm Özellikleri, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- Pavic, A., Pimentel, R.L. ve Waldron, P., 1998. Instrumented Sledge Hammer Impact Excitation: Worked Examples, 16th International Modal Analysis Conference (IMAC XVI), Sandra Barbara, CA, USA, Bildiriler Kitabı: 929-935.
- Pavic, A. ve Reynolds, P., 2002. Modal Testing of a 34 m Catenary Footbridge, 20th International Modal Analysis Conference (IMAC XX), Los Angeles, California, USA.
- Peeters, B., 2000. System Identification and Damage Detection in Civil Engineering, Doktora Tezi, K.U, Leuven, Belgium.
- Peeters, B. ve Roeck, G.D., 2000. Reference Based Stochastic Subspace Identification in Civil Engineering, Inverse Problems in Civil Engineering, 8, 47-74.
- Polat, A., 2009. Düşük Dayanımlı Düz Donatılı Betonarme Elemanların Lifli Polimer Malzemeler Kullanılarak Eğilme Kapasitesinin Arttırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- PULSE, 2006. Analyzers ve Solutions, Release 11.2. Bruel and Kjaer, Sound and Vibration Measurement A/S, Denmark.

- Ramos, J.L.F.S., 2007. Damage Identification on Masonry Structures Based on Vibration Signatures, Doktora Tezi, University of Minho, Braga, Portugal.
- Reynolds, P., Pavic, A. ve Prichard, S., 2002. Dynamic Analysis and Testing of a High Performance Floor Structure, International Conference on Structural Dynamic Modelling-Test, Analysis, Correlation and Validation, Maderia Island, Portugal, Bildiriler Kitabı: 339-346.
- Reynolds, P., A. ve Ibrahim, Z., 2004. A Remote Monitoring System for Stadia Dynamics, Proceedings of the ICE: Structural and Buildings, Bildiriler Kitabı: 385-393.
- Rodrigues, J., 2004. Identificação Modal Estocástica, Metodos de Análise e Aplicações em Estruturas de Engenharia Civil, Doktora Tezi, Engineering Faculty of University of Porto, Portugal.
- Santhakumar, R., Chandrasekaran, E. ve Dhanaraj, R. 2004. Analysis of Retrofitted Reinforced Concrete Shear Beams Using Carbon Fiber Composites, EJSE International, Electronic Journal of Structural Engineering, 4, 66-74.
- Schwarz, B.J. ve Richardson, M.H., 1999. Experimental Modal Analysis, Vibrant Technology, Inc., Jamestown, California.
- Sevim, B., 2010. Kemer Barajların Dinamik Davranışlarının Sonlu Eleman ve Deneysel Modal Analiz Yöntemleriyle Belirlenmesi, Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Sevim, B., Atamturktur, S., Altunışık, A.C., Bayraktar, A., 2016. Ambient Vibration Testing and Seismic Behavior of Historical Arch Bridges under Near and Far Fault Ground Motions, Bulletin of Earthquake Engineering, 14, 241-259.
- Shahawy, M., Mirmiran, A. ve Beitelman, T., 2000. Tests and Modelling of Carbon-Wrapped Concrete Columns, Composites: Part B, 31, 471-480.
- Sokkary, H. ve Galal, K., 2013. Seismic Behavior of RC Shear Walls Strengthened with Fiber Reinforced Polymer, Journal of Composites for Construction, 17, 5, 603-613.
- Stoian, V., Nagy-György, D.D. ve Gergely, J., 2003. Retrofitting the Shear Capacity of the Masonry Walls Using CFRP Composite Overlays, The SE 40EE International Conference in Earthquake Engineering, Spokje, Macedonia.
- Stratford, T., Pascale, G., Manfrodi, O. ve Bonfiglioli, B., 2004. Shear Strengthening Masonry Panels with Sheet Glass-Fiber Reinforced Polymer, Journal of Composites for Construction, 8, 5, 434-443.
- Şahin, A., 2009. Yapıların Deneysel ve Operasyonel Modal Analizleri İçin Sayısal Sinyal İşleme, Dinamik Karakteristik Belirleme ve Sonlu Eleman Model İyileştirme Yazılımları, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye.

- Şanlıtürk, K.Y. ve Çakar, O., 2004. Noise Elimination from Measured Frequency Response Functions, Mechanical Systems and Signal Processing, 19, 615-631.
- Tarinejad, R., Ahmadi, M.T. ve Harichandran, R.S., 2014. Full Scale Experimental Modal Analysis of an Arch Dam: The First Experince in Iran, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 61, 188-196.
- Teleghani, B.K. ve Pappa, R.S., 1996. Finite-Element Vibration Analysis and Modal Testing of Graphite Epoxy Tubes and Correlation between the Data, National Aeronautics and Space Administration Langley Research Center, Hampton, Virginia.
- Tokgöz, H. ve Dündar, B., 2014. Kesme Yönünden Yetersiz Dikdörtgen Kesitli Betonarme Kirişlerin CFRP ile Güçlendirilerek Kesme Kapasitelerinin Arttırılması, Journal of Advanced Technology Sciences, 3, 2, 87-97.
- Torres, W., Almazan, J.L., Sandoval, C. ve Boroschek, R., 2017. Operational Modal Analysis and FE Model Updating of the Metropolitan Cathedral of Santiago, Chile, Engineering Structures, 143, 169-188.
- TS 500, 2000. Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- Turkowski, P., Lukomski, Marek., Sulik, P. ve Roszkowski, P., 2017. Fire Resistance of CFRP Strengthened Reinforced Concrete Beams under Various Load Levels, Procedia Engineering, 172, 1176-1183.
- Türker, T., 2011. Çevresel Titreşim Verileri Kullanılarak Yapıların Hasar Durumlarının Tespiti ve Değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye.
- URL-1. <https://www.bksv.com/en/products/transducers/vibration/Vibration-transducers/impact-hammers/8210>, 15.12.2016.
- URL-2. <http://mechatronics.colostate.edu/figures/9-50.jpg>, 15.12.2016.
- URL-3. <https://www.bksv.com/en/products/transducers/vibration/Vibration-transducers/accelerometers/4507>, 15.12.2016.
- URL-4. <https://www.bksv.com/en/products/transducers/vibration/Vibration-transducers/accelerometers/8340>, 15.12.2016.
- William, K.J. ve Warnke, E.P., 1974. Constitutive Model for the Triaxial Behaviour of Concrete, IABSE, Report No. 19, Bergamo, Italy, 1-30.
- Wojcicki, Z., Kostecki, S. ve Grosel, J., 2016. Operational Modal Analysis of Weir on Odra River in Poland, Procedia Engineering, 153, 874-881.

- Wu, J.J., 2004. Finite Element Modelling and Experimental Modal Testing of a Three Dimensional Framework, International Journal of Mechanical Sciences, 46, 1245-1266.
- Yang, Q.S., Peng, X.R. ve Kwan, A.K.H., 2004. Finite Element Analysis of Interfacial Stresses in FRP-RC Hybrid Beams, Elsevier, Mechanics Research Communications, 31, 54-63.
- Yang, Z.J., Chen, J.F. ve Proverbs, D., 2003. Finite Element Modelling of Concrete Cover Separation Failure in FRP Plated RC Beams, Elsevier, Construction and Building Materials, 17, 3-13.
- Yao, J. ve Teng, J.G., 2006. Plate End Debonding in FRP-Plated RC Beams-I: Experiments, Elsevier, Engineering Structure, 29, 2457-2471.
- Yao, S., Wright, J.R., Pavic, A. ve Reynolds, P., 2002. Forces Generated When Bouncing or Jumping on a Flexible Structure, International Conference on Noise and Vibration (ISMA2002), Leuven, Belgium, Bildiriler Kitabı: 563-572.
- Yu, DJ. ve Ren, WX, 2005. EMD-Based Stochastic Subspace Identification of Structures from Operational Vibration Measurements, Engineering Structures, 27, 1741-1751.
- Zhang, L., Brincker, R. ve Andersen, P., 2002. An Overview of Operational Modal Analysis: Major Development and Issues, B&K Technical Paper, 152-161.

ÖZGEÇMİŞ

Olguhan Şevket KARAHASAN, 1991 yılında Trabzon'da doğdu. İlkokulu ve ortaokulu Trabzon İskenderpaşa Ortaokulu'nda tamamladıktan sonra lise öğrenimini Trabzon Lisesi'nde (Anadolu) gördü. 2010 yılında girdiği Öğrenci Seçme Sınavı'nda gösterdiği başarı sonucu Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde "Lisans" eğitimi almaya hak kazandı. Bir yıl İngilizce Hazırlık eğitimi de alarak 2015 yılında İnşaat Mühendisi olarak mezun oldu ve lisans eğitimi tamamladı. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda "Yüksek Lisans" eğitimine başladı.