

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YAPI TANI TEKNİKLERİ İLE SONLU ELEMAN
MODELLERİ GÜNCELLENMİŞ BİNALARIN
DEPREM PERFORMANS ANALİZİ**

DOKTORA TEZİ

Elif BORU

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : YAPI
Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Mustafa KUTANİS

Ocak 2015

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YAPI TANI TEKNİKLERİ İLE SONLU ELEMAN
MODELLERİ GÜNCELLENMİŞ BİNALARIN
DEPREM PERFORMANS ANALİZİ

DOKTORA TEZİ

Elif BORU

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 13 / 01 /2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr.
Murat UTKUCU
Jüri Başkanı

Doç. Dr.
Muharrem AKTAŞ
Üye

Doç. Dr.
Barış SEVİM
Üye

Doç. Dr.
Abdurrahman ŞAHİN
Üye

Yrd. Doç. Dr.
Mustafa KUTANİS
Üye

TEŞEKKÜR

Doktora tez çalışmam sũresince bilgi ve yardımlarını esirgemeyen, çalışmalarımı her aşamada izleyip değerlendirerek yœn veren, Yapı Tanılama ve Performansa Dayalı Tasarım kavramları ile tanışmamı ve bu alanda çalışmamı sağlayan Sn. Yrd. Doç. Dr. Mustafa Kutanis'e minnet ve Őukranlarımı sunarım.

Tez alışmamda Yapı Tanılama aşamasında bilgi ve tecrũbeleri ile beni yœnlendiren, doğru yœnde ilerlememi sağlayan Sn. Doç. Dr. Kemal Beyen'e teŐekkũr ederim. Tezimin başından sonuna mesleki tecrũbelerini ve manevi desteğini esirgemeyen hocam Sn. Doç. Dr. Muharrem Aktaş'a teŐekkũrũ bir borç bilirim.

Çalışmamı maddi olarak destekleyen Sakarya Őniversitesi BAPK'a (Proje No: 2012. 50. 02.053) ve Tũbitak'a (Proje No:108M303) teŐekkũr ederim. Tez çalışmasında kullandığım test modelimin inşa edilmesini sağlayan Sakarya Őniversitesi Yapı İşleri ve Teknik Dairesi Başkanlığı'na Őukranlarımı sunarım.

Hayatım boyunca daha iyi bir seviyeye gelmem için maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen anneme, babama ve ablama, başından sonuna kadar çalışmalarımı destekleyen eşime ve en œnemli neşe kaynağım kızım Zeynep Boru'ya sonsuz teŐekkũr ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
TABLOLAR LİSTESİ.....	xiv
ÖZET.....	xx
SUMMARY	xxi

BÖLÜM 1.

GİRİŞ	1
1.1. Deneysel Modal Analiz ve Yapı Tanılama Üzerine Yapılmış Çalışmalar	3
1.2. Sonlu Eleman Modeli Güncelleme Tekniği Üzerine Yapılmış Çalışmalar	5
1.3. Deprem Performansı Değerlendirmesi Üzerine Yapılmış Çalışmalar..	8
1.4. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	11

BÖLÜM 2.

YAPI DİNAMİK KARAKTERİSTİKLERİNİN HESABI	13
2.1. Giriş	13
2.2. Teorik Yöntemler ile Modal Analiz	14
2.3. Deneysel Yöntemler ile Modal Analiz	15
2.3.1. Deneysel modal analiz yöntemi	16
2.3.2. Operasyonel modal analiz yöntemi.....	18

BÖLÜM 3.

MODAL VERİ TOPLAMA VE ANALİZİ.....	21
3.1. Giriş	21

3.2. Çevrel Titreşim	22
3.3. Optimum Sensör Yeri ve Sayısı Tayini	22
3.4. Yapı Titreşim Kayıtlarının Analizi	24
3.5. Yapı Dinamik Karakteristiklerinin Elde Edilmesi.....	25
3.5.1. Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma Yöntemi.....	26
3.6. Test Binası Üzerinde Yapılan Örnek Çalışma.....	28
3.6.1. Test binası nümerik (sonlu eleman) modeli	30
3.6.2. Test binası modal veri toplama çalışması	31
3.6.3. Test binası modal veri analizi çalışması.....	32
BÖLÜM 4.	
SONLU ELEMAN MODELİ GÜNCELLEME	36
4.1. Giriş	36
4.2. Simülasyon ve Test Çalışmalarındaki Belirsizlikler.....	37
4.3. Sonlu Eleman Modeli Güncelleme Aşamaları	39
4.4. Yapı Dinamik Karakteristiklerinin Karşılaştırılması.....	41
4.4.1. Doğal frekansların karşılaştırılması	41
4.4.2. Mod şekillerinin karşılaştırılması.....	41
4.4.3. Mod gerçekleşme kriteri (MAC).....	42
4.5. Güncelleme Parametresi Seçimi	43
4.6. Güncelleme Cevabı Seçimi.....	44
4.7. Duyarlılık Tabanlı Model Güncelleme	44
4.8. Test Binası Üzerinde Yapılan Örnek Çalışma.....	46
4.8.1. Test binası frekans ve mod şekillerinin karşılaştırılması	46
4.8.2. Test binası model güncelleme çalışmaları	48
4.8.3. Test binasından elde edilen sonuçlar.....	50
BÖLÜM 5.	
SAYISAL ÇALIŞMALAR.....	51
5.1. Giriş	51
5.2. Ahmet Levent Sitesi A Blok Genel Bilgi	55
5.2.1. Ahmet Levent Sitesi A Blok nümerik modeli.....	57
5.2.2. Ahmet Levent Sitesi A Blok yapı tanılama çalışmaları	58

5.2.3. Ahmet Levent Sitesi A Blok model güncelleme çalışması	61
5.3. Aydın Bak Sitesi 2. Blok Genel Bilgi	64
5.3.1. Aydın Bak Sitesi 2. Blok nümerik modeli	66
5.3.2. Aydın Bak Sitesi 2. Blok yapı tanılama çalışmaları	67
5.3.3. Aydın Bak Sitesi 2.blok model güncelleme çalışması	70
5.4. Dayal İnşaat A Blok Genel Bilgi	73
5.4.1. Dayal İnşaat A Blok nümerik modeli.....	75
5.4.2. Dayal inşaat A Blok yapı tanılama çalışmaları	76
5.4.3. Dayal inşaat A Blok model güncelleme çalışması	79
5.5. Durusoy Apartmanı Genel Bilgi	82
5.5.1. Durusoy Apartmanı nümerik modeli	84
5.5.2. Durusoy Apartmanı yapı tanılama çalışmaları.....	85
5.5.3. Durusoy Apartmanı model güncelleme çalışması.....	88
5.6. Hikmet Şahin Apartmanı Genel Bilgi.....	91
5.6.1. Hikmet Şahin Apartmanı nümerik modeli	93
5.6.2. Hikmet Şahin Apartmanı yapı tanılama çalışmaları	93
5.6.3. Hikmet Şahin Apartmanı model güncelleme çalışması	96
5.7. Hisar Apartmanı A Blok Genel Bilgi	99
5.7.1. Hisar Apartmanı nümerik modeli.....	101
5.7.2. Hisar Apartmanı yapı tanılama çalışmaları	102
5.7.3. Hisar Apartmanı model güncelleme çalışması.....	105
5.8. SSK Hizmet Binası Genel Bilgi	108
5.7.1. SSK Hizmet Binası nümerik modeli	110
5.8.1. SSK Hizmet Binası yapı tanılama çalışmaları	111
5.8.2. SSK Hizmet Binası model güncelleme çalışması	113
5.9. Yan Sokak Apartmanı Genel Bilgi	116
5.9.1. Yan Sokak Apartmanı nümerik modeli.....	118
5.9.2. Yan Sokak Apartmanı yapı tanılama çalışmaları.....	119
5.9.3. Yan Sokak Apartmanı model güncelleme çalışması.....	122
5.10. Model Güncelleme Çalışmalarından Elde Edilen Sonuçlar	125

BÖLÜM 6.

TARTIŞMA	126
----------------	-----

6.1. Giriş	126
6.2. Performansa Dayalı Tasarım ve Değerlendirme.....	126
6.3. Ahmet Levent Sitesi A Blok Deprem Performans Analizi.....	128
6.3.1. Ahmet Levent Sitesi A Blok güncellenmemiş sonlu eleman modelinin performans analizi.....	128
6.3.2. Ahmet Levent Sitesi A Blok güncellenmiş sonlu eleman modelinin performans analizi	129
6.4. Aydın Bak Sitesi 2. Blok Deprem Performans Analizi	131
6.4.1. Aydın Bak Sitesi 2. Blok güncellenmemiş sonlu eleman modelinin performans analizi	131
6.4.2. Aydın Bak Sitesi 2. Blok güncellenmiş sonlu eleman modelinin performans analizi	132
6.5. Dayal İnşaat A Blok Deprem Performans Analizi	134
6.5.1. Dayal İnşaat A Blok güncellenmemiş sonlu eleman modelinin performans analizi	134
6.5.2. Dayal İnşaat A Blok güncellenmiş sonlu eleman modelinin performans analizi	135
6.6. Durusoy Apartmanı Deprem Performans Analizi	137
6.6.1. Durusoy Apartmanı güncellenmemiş sonlu eleman modelinin performans analizi	137
6.6.2. Durusoy Apartmanı güncellenmiş sonlu eleman modelinin performans analizi	138
6.7. Hikmet Şahin Apartmanı Deprem Performans Analizi	140
6.7.1. Hikmet Şahin Apartmanı güncellenmemiş sonlu eleman modelinin performans analizi	140
6.7.2. Hikmet Şahin Apartmanı güncellenmiş sonlu eleman modelinin performans analizi	141
6.8. Hisar Apartmanı Deprem Performans Analizi	143
6.8.1. Hisar Apartmanı güncellenmemiş sonlu eleman modelinin performans analizi	143
6.8.2. Hisar Apartmanı güncellenmiş sonlu eleman modelinin performans analizi	144
6.9. SSK Hizmet Binası Deprem Performans Analizi.....	146

6.9.1. SSK Hizmet Binası güncellenmemiş sonlu eleman modelinin performans analizi	146
6.9.2. SSK Hizmet Binası güncellenmiş sonlu eleman modelinin performans analizi	147
6.10. Yan Sokak Apartmanı Deprem Performans Analizi	149
6.10.1. Yan Sokak Apartmanı güncellenmemiş sonlu eleman modelinin performans analizi	149
6.10.2. Yan Sokak Apartmanı güncellenmiş sonlu eleman modelinin performans analizi	150
6.11. Performans Değerlendirme Çalışmalarından Elde Edilen Sonuçlar...	152
BÖLÜM 7.	
SONUÇ VE ÖNERİLER	156
KAYNAKLAR	159
ÖZGEÇMİŞ	168

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

AFT	: Ara Frekans Transformatörü
AEDYY	: Artımsal Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi
AMBY	: Artımsal Mod Birleştirme Yöntemi
ÇGÇÇ	: Çok Giriş Çok Çıkış
ÇGS	: Çapraz Güç Spektrumu
ÇSD	: Çok Serbestlik Dereceli
DE	: Doğrusal Elastik
EDYY	: Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi
MBY	: Mod Birleştirme Yöntemi
DEO	: Doğrusal Elastik Olmayan
DMA	: Deneysel Modal Analiz
FDF	: Frekans Davranış Fonksiyonu
FTAA	: Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma
GFTAA	: Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma
GSYF	: Güç Spektral Yoğunluk Fonksiyonu
HFD	: Hızlı Fourier Dönüşümü
MAC	: Mod Gerçekleşme Kriteri
MGK	: Modal Gerçekleşme Kriterine
r	: Etki/Kapasite Oranı
R	: Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı
R _a	: Deprem Yüğü Azaltma Katsayısı
SE	: Sonlu Eleman
SYMTD	: Spektral Yoğunluk Fonksiyonu Tekil Değeri
TAFD	: Ters Ayrık Fourier Dönüşümü
TDA	: Tekil Değer Ayrışımı
TDY	: Türkiye Deprem Yönetmeliği 2007

TSD	: Tek Serbestlik Dereceli
ZTAH	: Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemi
$x_{(i)}$: Mod Şekilleri
ζ_i	: Sönüm Oranları
ω_i	: Doğal Frekanslar
$H(\omega)$: Frekans Davranış Fonksiyonu
$G_{xx}(\omega)$: Etki (Giriş) Sinyali
$G_{yy}(\omega)$: Tepki (Çıkış) Sinyali
U_i	: u_{ij} Tekil Vektörlerinden Oluşan Birim Matris
S_i	: s_{ij} Tekil Değerlerden Oluşan Diyagonal Matris
δ	: Yüzde Olarak Frekanslar Arasındaki Fark
f_d	: Deneysel Olarak Elde Edilen Frekans Değeri
f_a	: Nümerik Olarak Elde Edilen Frekans Değeri

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1	Teorik ve deneysel modal analiz yöntemi işlem aşamaları.....	14
Şekil 2.2.	Deneysel modal analiz darbe çekici ile ölçüm düzeneği.....	17
Şekil 2.3.	Deneysel modal analizde giriş kuvvetinden sistemin cevabının elde edilmesi [57].....	18
Şekil 2.4.	Operasyonel modal analiz yöntemi tipik bir veri toplama ve analiz düzeneği	19
Şekil 3.1.	Deneysel yöntemle modal analiz aşamaları	21
Şekil 3.2.	AREL DAC-3HDG serisi ivmeölçer ve kullanılan ölçüm ağı.....	23
Şekil 3.3.	Test binası kolon ve giriş detayları	29
Şekil 3.4.	Test binasının inşa aşamaları.....	29
Şekil 3.5.	Test binası kalıp planı ve ilk üç mod için mod şekilleri.....	31
Şekil 3.6.	İvmeölçerlerin her konfigürasyonda test binası üzerindeki yerleşimleri	32
Şekil 3.7.	Tüm konfigürasyonlardan elde edilen Spektral Yoğunluk Fonksiyonu Tekil Değerleri	33
Şekil 3.7.	Tüm konfigürasyonlardan elde edilen Spektral Yoğunluk Fonksiyonu Tekil Değerleri (Devam)	34
Şekil 4.1.	Model güncelleme aşamaları.....	40
Şekil 4.2.	Test binası yapı elamanlarının duyarlılık analizi	49
Şekil 4.3.	Test binası model güncelleme öncesinde (a) ve sonrasında (b) elde edilen MAC matrisleri.....	50
Şekil 5.1.	İncelenen binaların harita üzerindeki konumu [96]. a) Gölcük'teki binalar b) Sakarya'daki binalar	51
Şekil 5.2.	Ahmet Levent Sitesi A Blok harita üzerindeki konumu [96].....	55
Şekil 5.3.	Ahmet Levent Sitesi A Blok fotoğrafı (solda) [98].....	56
Şekil 5.4.	Ahmet Levent Sitesi A Blok kalıp planı	57
Şekil 5.5.	Ahmet Levent Sitesi A Blok ivme ölçüm cihazlarının konum ve yönelimlerinin üç boyutlu görünüşü	59

Şekil 5.6. Ahmet Levent Sitesi A Blok'a ait Spektral Yoğunluk Fonksiyonu Tekil Değerleri.....	60
Şekil 5.7. Ahmet Levent Sitesi A Blok yapı elamanlarının duyarlılık analizi ...	62
Şekil 5.8. Ahmet Levent sitesi model güncelleme öncesinde (a) ve sonrasında (b) elde edilen MAC matrisleri	63
Şekil 5.9. Aydın Bak Sitesi 2. Blok harita üzerindeki konumu [96]	64
Şekil 5.10. Aydın Bak Sitesi 2. Blok'un fotoğrafı [98].....	65
Şekil 5.11. Aydın Bak Sitesi 2. Blok'un kalıp planı	66
Şekil 5.12. Aydın Bak Sitesi 2.blok ivme ölçüm cihazlarının konum ve yönelimlerinin üç boyutlu görünüşü	68
Şekil 5.13. Aydın Bak Sitesi 2.Blok'a ait Spektral Yoğunluk Fonksiyonu Tekil Değerleri.....	69
Şekil 5.14. Aydın Bak sitesi 2.blok yapı elamanlarının duyarlılık analizi	71
Şekil 5.15. Aydın Bak Sitesi model güncelleme öncesinde (a) ve sonrasında (b) elde edilen MAC matrisleri.....	72
Şekil 5.16. Dayal İnşaat A Blok harita üzerindeki konumu [96]	73
Şekil 5.17. Dayal İnşaat A blok fotoğrafı [98]	74
Şekil 5.18. Dayal İnşaat A blok kalıp planı.....	75
Şekil 5.19. Dayal İnşaat A Blok ivme ölçüm cihazlarının konum ve yönelimlerinin üç boyutlu görünüşü	77
Şekil 5.20. Dayal İnşaat A Blok'a ait Spektral Yoğunluk Fonksiyonu Tekil Değerleri	78
Şekil 5.21. Dayal İnşaat A blok yapı elamanlarının duyarlılık analizi.....	80
Şekil 5.22. Dayal İnşaat A Blok model güncelleme öncesinde (a) ve sonrasında (b) elde edilen MAC matrisleri	81
Şekil 5.23. Durusoy Apartmanı harita üzerindeki konumu [96]	82
Şekil 5.24. Durusoy Apartmanı fotoğrafı [98]	83
Şekil 5.25. Durusoy Apartmanı kalıp planı	84
Şekil 5.26. Durusoy Apartmanı ivme ölçüm cihazlarının konum ve yönelimlerinin üç boyutlu görünüşü.....	86
Şekil 5.27. Durusoy Apartmanına ait Spektral Yoğunluk Fonksiyonu Tekil Değerleri	87
Şekil 5.28. Durusoy Apartmanı yapı elamanlarının duyarlılık analizi	89

Şekil 5.29. Durusoy apartmanı model güncelleme öncesinde (a) ve sonrasında (b) elde edilen MAC matrisleri	90
Şekil 5.30. Hikmet Şahin Apartmanı harita üzerindeki konumu [96]	91
Şekil 5.31. Hikmet Şahin Apartmanı fotoğrafı [98]	92
Şekil 5.32. Hikmet Şahin Apartmanı kalıp planı.....	92
Şekil 5.33. Hikmet Şahin Apartmanı ivme ölçüm cihazlarının konum ve yönelimlerinin üç boyutlu görünüşü.....	94
Şekil 5.34. Hikmet Şahin apartmanına ait Spektral Yoğunluk Fonksiyonu Tekil Değerleri.....	95
Şekil 5.35. Hikmet Şahin Apartmanı yapı elamanlarının duyarlılık analizi.....	97
Şekil 5.36. Hikmet Şahin Apart. model güncelleme öncesinde (a) ve sonrasında (b) elde edilen MAC matrisleri	98
Şekil 5.37. Hisar Apartmanı harita üzerindeki konumu [96]	99
Şekil 5.38. Hisar Apartmanı A blok fotoğrafı [98].....	100
Şekil 5.39. Hisar Apartmanı A blok kalıp planı	101
Şekil 5.40. Hisar Apartmanı ivme ölçüm cihazlarının konum ve yönelimlerinin üç boyutlu görünüşü.....	103
Şekil 5.41. Hisar Apartmanına ait Spektral Yoğunluk Fonksiyonu Tekil Değerleri	104
Şekil 5.42. Hisar Apartmanı yapı elamanlarının duyarlılık analizi	106
Şekil 5.43. Hisar Apartmanı model güncelleme öncesinde (a) ve sonrasında (b) elde edilen MAC matrisleri.....	107
Şekil 5.44. SSK Hizmet Binası harita üzerindeki konumu [96].....	108
Şekil 5.45. SSK Hizmet Binası fotoğrafı [98].....	109
Şekil 5.46. SSK Hizmet Binası kalıp planı.....	109
Şekil 5.47. SSK hizmet binası ivme ölçüm cihazlarının konum ve yönelimlerinin üç boyutlu görünüşü.....	111
Şekil 5.48. SSK Hizmet Binası'na ait Spektral Yoğunluk Fonksiyonu Tekil Değerleri.....	112
Şekil 5.49. SSK Hizmet Binası yapı elamanlarının duyarlılık analizi.....	114
Şekil 5.50. SSK hizmet binası model güncelleme öncesinde (a) ve sonrasında (b) elde edilen MAC matrisleri	115
Şekil 5.51. Yan Sokak Apartmanı harita üzerindeki konumu [96]	116

Şekil 5.52. Yan Sokak Apartmanı fotoğrafı [98]	117
Şekil 5.53. Yan Sokak Apartmanı kalıp planı	118
Şekil 5.54. Yan Sokak Apartmanı ivme ölçüm cihazlarının konum ve yönelimlerinin üç boyutlu görünüşü	120
Şekil 5.55. Yan Sokak Apartmanına ait Spektral Yoğunluk Fonksiyonu Tekil Değerleri	121
Şekil 5.56. Yan Sokak Apartmanı yapı elemanlarının duyarlılık analizi	123
Şekil 5.57. Yan Sokak Apartmanı model güncelleme öncesinde (a) ve sonrasında (b) elde edilen MAC matrisleri	124
Şekil 6.1. Sonlu eleman modeli güncellenmemiş binaların performans değerlendirme sonuçları	152
Şekil 6.2. Sonlu eleman modeli güncellenmiş binaların performans değerlendirme sonuçları	155

TABLolar LİSTESİ

Tablo 3. 1. DAC-3HDG serisi ivme duyarlı ölçüm cihazlarının özellikleri.....	24
Tablo 3. 2. İncelenen binaya ait genel bilgiler.....	28
Tablo 3. 3. Test binası Sap2000 modal analizi ile elde edilen frekans ve modal kütle katılımı oranı	30
Tablo 3. 4. İlk altı mod için tüm konfigürasyonlardan elde edilen frekans değerleri	35
Tablo 4. 1. Deneysel ve nümerik modal analiz frekans değerleri karşılaştırması	46
Tablo 4. 2. Deneysel ve nümerik modal analiz mod şekillerinin karşılaştırması.	47
Tablo 4.3. Dokuzuncu konfigürasyon kullanılarak elde edilen model güncelleme sonuçları	49
Tablo 5.1. Ahmet Levent Sitesi Sap2000 modal analizi ile elde edilen frekans ve modal kütle katılımı oranı	58
Tablo 5.2. Ahmet Levent Sitesi A Blok deneysel yolla elde edilen frekans ve sönüm oranı değerleri	61
Tablo 5.3. Ahmet Levent Sitesi A Blok deneysel ve nümerik sonuçların karşılaştırılması	61
Tablo 5.4. Ahmet Levent Sitesi A Blok güncelleme sonrası elde edilen frekanslar	63
Tablo 5.5. Aydın Bak Sitesi 2. Blok Sap2000 modal analizi ile elde edilen frekans ve modal kütle katılımı oranı	67
Tablo 5.6. Aydın Bak Sitesi 2. Blok deneysel yolla elde edilen frekans ve sönüm oranı değerleri	69
Tablo 5.7. Aydın Bak Sitesi 2. Blok deneysel ve SE modelinden elde edilen frekanslar.....	70
Tablo 5.8. Aydın Bak Sitesi 2. Blok güncelleme sonrası elde edilen frekanslar.	72
Tablo 5.9. Dayal İnşaat Sap2000 modal analizi ile elde edilen frekans ve modal kütle katılımı oranı	76
Tablo 5.10. Dayal İnşaat deneysel yolla elde edilen frekans ve sönüm oranı değerleri	78

Tablo 5.11. Dayal İnşaat deneysel ve SE modelinden elde edilen frekanslar	79
Tablo 5.12. Dayal İnşaat A Blok güncelleme sonrası elde edilen frekanslar	81
Tablo 5.13. Durusoy Apartmanı Sap2000 modal analizi ile elde edilen frekans ve modal kütle katılımı oranı	84
Tablo 5.14. Durusoy Apartmanı deneysel yolla elde edilen frekans ve sönüm oranı değerleri	87
Tablo 5.15. Durusoy Apartmanı deneysel ve SE modelinden elde edilen frekanslar	88
Tablo 5.16. Durusoy Apartmanı güncelleme sonrası elde edilen frekanslar	90
Tablo 5.17. Hikmet Şahin Apt. Sap2000 modal analizi ile elde edilen frekans ve modal kütle katılımı oranı	93
Tablo 5.18. Hikmet Şahin Apartmanı deneysel yolla elde edilen frekans ve sönüm oranı değerleri	95
Tablo 5.19. Hikmet Şahin Apartmanı deneysel ve SE modelinden elde edilen frekanslar	96
Tablo 5.20. Hikmet Şahin Apartmanı güncelleme sonrası elde edilen frekanslar	98
Tablo 5.21. Hisar Apt. Sap2000 modal analizi ile elde edilen frekans ve modal kütle katılımı oranı	102
Tablo 5.22. Hisar Apartmanı deneysel yolla elde edilen frekans ve sönüm oranı değerleri	105
Tablo 5.23. Hisar Apartmanı deneysel ve SE modelinden elde edilen frekanslar	105
Tablo 5.24. Hisar Apartmanı güncelleme sonrası elde edilen frekanslar	107
Tablo 5.25. SSK Hizmet Binası Sap2000 modal analizi ile elde edilen frekans ve modal kütle katılımı oranı	110
Tablo 5.26. SSK Hizmet Binası deneysel yolla elde edilen frekans ve sönüm oranı değerleri	113
Tablo 5.27. SSK Hizmet Binası deneysel ve SE modelinden elde edilen frekanslar	113
Tablo 5.28. SSK Hizmet Binası güncelleme sonrası elde edilen frekanslar	115
Tablo 5.29. Yan Sokak Apartmanı Sap2000 modal analizi ile elde edilen frekans ve modal kütle katılımı oranı	119
Tablo 5.30. Yan Sokak Apartmanı deneysel yolla elde edilen frekans ve sönüm oranı değerleri	122

Tablo 5.31. Yan Sokak Apartmanı deneysel ve SE modelinden elde edilen frekanslar	122
Tablo 5.32. Yan Sokak Apartmanı güncelleme sonrası elde edilen frekanslar	124
Tablo 6.1. Ahmet Levent Sitesi A Blok güncellenmemiş SE modelinin DE yöntemle performans analizi	128
Tablo 6.2. Ahmet Levent Sitesi A Blok güncellenmemiş SE modelinin AEDYY ile performans analizi	129
Tablo 6.3. Ahmet Levent Sitesi A Blok güncellenmemiş SE modelinin AMBY ile performans analizi	129
Tablo 6.4. Ahmet Levent Sitesi A Blok güncellenmiş SE modelinin DE yöntemle performans analizi	130
Tablo 6.5. Ahmet Levent Sitesi A Blok güncellenmiş SE modelinin AEDYY ile performans analizi	130
Tablo 6.6. Ahmet Levent Sitesi A Blok güncellenmiş SE modelinin AMBY ile performans analizi	130
Tablo 6.7. Aydın Bak Sitesi 2. Blok güncellenmemiş SE modelinin DE yöntemle performans analizi	131
Tablo 6.8. Aydın Bak Sitesi 2. Blok güncellenmemiş SE modelinin AEDYY ile performans analizi	132
Tablo 6.9. Aydın Bak Sitesi 2. Blok güncellenmemiş SE modelinin AMBY ile performans analizi	132
Tablo 6.10. Aydın Bak Sitesi 2. Blok güncellenmiş SE modelinin DE yöntemle performans analizi	132
Tablo 6.11. Aydın Bak Sitesi 2. Blok güncellenmiş SE modelinin AEDYY ile performans analizi	133
Tablo 6.12. Aydın Bak Sitesi 2. Blok güncellenmiş SE modelinin AMBY ile performans analizi	133
Tablo 6.13. Dayal İnşaat A Blok güncellenmemiş SE modelinin DE yöntemle performans analizi	134
Tablo 6.14. Dayal İnşaat A Blok güncellenmemiş SE modelinin AEDYY ile performans analizi	135
Tablo 6.15. Dayal İnşaat A Blok güncellenmemiş SE modelinin AMBY ile performans analizi	135

Tablo 6.16. Dayal İnşaat A Blok güncellenmiş SE modelinin DE yöntemle performans analizi	135
Tablo 6.17. Dayal İnşaat A Blok güncellenmiş SE modelinin AEDYY ile performans analizi	136
Tablo 6.18. Dayal İnşaat A Blok güncellenmiş SE modelinin AMBY ile performans analizi	136
Tablo 6.19. Durusoy Apartmanı güncellenmemiş SE modelinin DE yöntemle performans analizi	137
Tablo 6.20. Durusoy Apartmanı güncellenmemiş SE modelinin AEDYY ile performans analizi	138
Tablo 6.21. Durusoy Apartmanı güncellenmemiş SE modelinin AMBY ile performans analizi	138
Tablo 6.22. Durusoy Apartmanı güncellenmiş SE modelinin DE yöntemle performans analizi	138
Tablo 6.23. Durusoy Apartmanı güncellenmiş SE modelinin AEDYY ile performans analizi	139
Tablo 6.24. Durusoy Apartmanı güncellenmiş SE modelinin AMBY ile performans analizi	139
Tablo 6.25. Hikmet Şahin Apartmanı güncellenmemiş SE modelinin DE yöntemle performans analizi	140
Tablo 6.26. Hikmet Şahin Apartmanı güncellenmemiş SE modelinin AEDYY ile performans analizi	141
Tablo 6.27. Hikmet Şahin Apartmanı güncellenmemiş SE modelinin AMBY ile performans analizi	141
Tablo 6.28. Hikmet Şahin Apartmanı güncellenmiş SE modelinin DE yöntemle performans analizi	141
Tablo 6.29. Hikmet Şahin Apartmanı güncellenmiş SE modelinin AEDYY ile performans analizi	142
Tablo 6.30. Hikmet Şahin Apartmanı güncellenmiş SE modelinin AMBY ile performans analizi	142
Tablo 6.31. Hisar Apartmanı güncellenmemiş SE modelinin DE yöntemle performans analizi	143

Tablo 6.32. Hisar Apartmanı güncellenmemiş SE modelinin AEDYY ile performans analizi	144
Tablo 6.33. Hisar Apartmanı güncellenmemiş SE modelinin AMBY ile performans analizi	144
Tablo 6.34. Hisar Apartmanı güncellenmiş SE modelinin DE yöntemle performans analizi	144
Tablo 6.35. Hisar Apartmanı güncellenmiş SE modelinin AEDYY ile performans analizi	145
Tablo 6.36. Hisar Apartmanı güncellenmiş SE modelinin AMBY ile performans analizi	145
Tablo 6.37. SSK Hizmet Binası güncellenmemiş SE modelinin DE yöntemle performans analizi	146
Tablo 6.38. SSK Hizmet Binası güncellenmemiş SE modelinin AEDYY ile performans analizi	147
Tablo 6.39. SSK Hizmet Binası güncellenmemiş SE modelinin AMBY ile performans analizi	147
Tablo 6.40. SSK Hizmet Binası güncellenmiş SE modelinin DE yöntemle performans analizi	147
Tablo 6.41. SSK Hizmet Binası güncellenmiş SE modelinin AEDYY ile performans analizi	148
Tablo 6.42. SSK Hizmet Binası güncellenmiş SE modelinin AMBY ile performans analizi	148
Tablo 6.43. Yan Sokak Apartmanı güncellenmemiş SE modelinin DE yöntemle performans analizi	149
Tablo 6.44. Yan Sokak Apartmanı güncellenmemiş SE modelinin AEDYY ile performans analizi	150
Tablo 6.45. Yan Sokak Apartmanı güncellenmemiş SE modelinin AMBY ile performans analizi	150
Tablo 6.46. Yan Sokak Apartmanı güncellenmiş SE modelinin DE yöntemle performans analizi	150
Tablo 6.47. Yan Sokak Apartmanı güncellenmiş SE modelinin AEDYY ile performans analizi	151

Tablo 6.48 .Yan Sokak Apartmanı güncellenmiş SE modelinin AMBY ile performans analizi	151
Tablo 6.49. Binaların atalet momentlerinin TDY'ye göre azaltılması ile elde edilen performans değerlendirme sonuçları	153
Tablo 6.50. Sonlu eleman modeli güncellenmiş binaların performans değerlendirme sonuçları	154

ÖZET

Anahtar kelimeler: Operasyonel Modal Analiz, Çevrel Titreşim, Sonlu Eleman Modeli Güncelleme, Deprem Performans Değerlendirmesi

Bu tez çalışmasında, Türkiye Deprem Yönetmeliği 2007 Yedinci Bölüm' de yer alan Doğrusal Elastik ve Doğrusal Elastik Olmayan performans değerlendirme yöntemlerinin incelenmesi ve geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla 17 Ağustos 1999 Marmara depremini geçirmiş, hasarsız ve az hasarlı sekiz adet bina üzerinde incelemeler yapılmıştır.

İnceleme kapsamına alınan binaların bilgisayar simülasyonu Sap2000 ve ProBina Orion programları kullanılarak yapılmıştır. Modellenen binaların mevcut bina davranışı ile uyumunu arttırmak amacı ile çevrel titreşim kayıtları kullanılarak, yapı tanılama çalışmaları yapılmıştır. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile yapı dinamik karakteristiklerinin elde edilmesinin ardından binaların bilgisayar modellerinin mevcut davranış ile uyumunu arttırmak amacı ile Sonlu Eleman Modeli Güncelleme çalışmaları yapılmıştır.

Sonlu eleman modeli güncellenmiş ve güncellenmemiş bina modellerinin Türkiye Deprem Yönetmeliği 2007 Yedinci Bölümü'nde verilen Doğrusal Elastik ve Doğrusal Elastik Olmayan performans değerlendirme yöntemleri ile performans değerlendirme çalışmaları yapılmıştır. Belirlenen performans sonuçları 17 Ağustos 1999 Marmara Depremi sonrası binada gözlenen performans seviyeleri ile karşılaştırılmıştır. Doğrusal Elastik Olmayan Yöntemlerde, güncellenmiş Sonlu eleman modelleri ile binaların performans değerlendirmesinde gerçek sonuçlarla daha uyumlu performanslar elde edilmiştir. Türkiye Deprem Yönetmeliği 7. Bölüm'de binalardan bilgi toplanması ile ilgili verilen koşullara binaların sonlu eleman modellerinin kalibre edilmesi şartının getirilmesi önerilmektedir.

SEISMIC PERFORMANCE ANALYSIS OF THE FINITE ELEMENT MODEL UPDATED STRUCTURES BY SYSTEM IDENTIFICATION TECHNIQUES

SUMMARY

Keywords: Operational Modal Analysis, Ambient Vibration, Finite Element Model Updating, Seismic Performance Assessment

In this study, it is aimed to investigate and develop Linear Elastic and Nonlinear Elastic seismic performance assessment methods in Turkish Earthquake Code 2007 Section 7. For this purpose eight buildings which were undamaged or slightly damaged in 17 August 1999 Marmara Earthquake have been investigated.

Computer simulations of the eight buildings have been created with Sap2000 and Probing Orion programs. In order to increase compatibility of modeled buildings behavior with existing buildings, structural system identification has been performed with ambient vibrations. After structural dynamic characteristics identification with Operational Modal Analysis Finite Element Model Updating studies have been conducted in order to increase the compatibility of modeled buildings behavior with existing buildings.

Performance evaluation of updated and not updated finite element models of buildings has been performed with Linear Elastic and Nonlinear Seismic Performance Assessment Methods in Turkish Earthquake Code 2007 Section 7. Identified performance evaluation results have been compared with the performance levels observed in the buildings after 17 August 1999 Marmara Earthquake. The more consistent performance levels with the existing results are obtained in performance assessment of updated finite element models with Nonlinear Performance Assessment Methods. It is recommended to add finite element model updating condition for collection of information from the building in Turkish Earthquake Code 2007 Section 7.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Hızla gelişen ve değişen dünya şartlarında bina, baraj, köprü, tünel, demiryolu gibi mühendislik yapılarının sayısı hızla artmakta ve insan hayatını kolaylaştırması açısından her geçen gün daha önemli hale gelmektedir. Mühendislik yapıları yaşamsal konfor, zamandan tasarruf ve güvenlik alanlarında insan hayatında vazgeçilmez bir yere sahiptir. İnsan hayatı için önem arz eden bu yapıların optimum şekilde tasarlanması ve yerinde tatbik edilmesi gelişen dünya için önem arz etmektedir. Bu yapıların tasarımı uygun bir şekilde yapılmaz ise deprem, sel, patlama gibi afetlerle hasar görmesi hatta kullanım dışı kalması söz konusu olmaktadır. Sonuçta ise maddi ve manevi birçok kayıp meydana gelmektedir. Bu kayıpların en aza indirilmesi için doğru tasarımın yapılması İnşaat Mühendisliği alanında dikkat edilmesi gereken önemli unsurlardan biridir.

Yapıların tasarım ve projelendirilme aşamasında, çeşitli yazılımlar ile tasarım modelini temsil edecek nümerik modeller oluşturulmaktadır. Nümerik modeller yardımı ile yapı henüz inşa edilmeden statik ve dinamik davranışı hakkında bilgi sahibi olmak mümkündür. Nümerik modeller sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak çözümlenmektedir. 20. yüzyılın son çeyreğinde yazılım ve bilgi işlem alanında hesaplama teknolojileri hızlı bir gelişim sürecine girmiştir. İnşaat Mühendisliği alanında kullanılan yazılımlar da bu gelişim sürecini takip etmiş ve sonlu elemanlar yönteminin çözüm algoritmaları bu gelişim sürecinden faydalanmıştır. Ancak, sonlu elemanlar yönteminde yapılan kabuller, modelleme hataları, yapının malzeme özelliklerindeki belirsizlikler, yapıda servis yükleri altındaki aşınmaların yıllar içinde birikmesi veya deprem, patlama gibi ani etkilerle gelişebilen hasarlar veya mesnet koşullarının değişmesi, sonlu eleman (SE) modelinin güvenilirliğini azaltmaktadır.

Bu belirsizlikler altında, yeni tasarlanan bir yapının öngörülen tasarım değerleri ile oluşturulan nümerik modelinden statik ve dinamik parametrelerinin elde edilmesi ve benzer şekilde mevcut bir yapının nümerik modelinin, davranış açısından aslı ile özdeş hale getirilmesi yapının doğru modellenmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Yapı ve Deprem Mühendisliği diğer bilim dallarında da olduğu gibi, bilgi kaynaklarında belirsizlikler ihtiva etmektedir. Son yıllarda gelişen teknoloji ve yazılımlarla, yukarıda sayılan belirsizliklerin aydınlatılması için yapısal ölçümler sıklıkla kullanılmaktadır. Bu amaçla geliştirilen, düşük genlikli titreşimleri ölçen sismometreler yardımı ile yapısal ölçümler alınmakta ve Deneysel Modal Analiz Yöntemleri kullanılarak yapıların gerçek davranışı belirlenebilmektedir. Nümerik ve gerçek model davranışındaki farkların belirlenmesinde yapı dinamik karakteristiklerinin karşılaştırılması pratik bir çözüm olarak kullanılmaktadır. Yapısal ölçüm sonuçlarından elde edilen dinamik karakteristikler, nümerik model sonuçları ile karşılaştırılarak iki model arasındaki fark belirlenebilmektedir. Nümerik modelin, deneysel model sonuçları ile benzeşecek şekilde kalibre edilmesi sonucu gerçek davranışı elde edilebilmektedir. Literatürde Sonlu Eleman Modeli Güncelleme Tekniği olarak adlandırılan bu yöntem ile nümerik modelin tam yapısal benzeşimi sağlanması mümkün hale gelmiştir. Böylece mevcut ile uyumlu davranış sergileyen nümerik modeller oluşturulabilmektedir.

Yaşanan her afet insanlığa bir şeyler öğretir. Son yirmi yıl içerisinde can ve mal kaybı büyük depremlerin meydana gelmesinin ardından, tüm dünyada depremi maddi ve manevi en hafif şekilde atlatabilmek için Performansa Dayalı Tasarım ve Değerlendirmenin önemi anlaşılmıştır. Performansa Dayalı Tasarım, yapının deprem esnasında ve sonrasında göstereceği davranışın, yapıdan beklenen ölçütlerde olmasını sağlayan tasarımıdır. Bu tasarım şekli, yapının seçilen performans kriterlerini sağlayacak şekilde tasarlanması esasına dayanmaktadır.

Ülkemizde yaşanan depremlerin büyük yıkımlar ve can kayıplarıyla sonuçlandığına birçok kez şahit olunmuştur. Yaşadığımız depremler tüm dünyada olduğu gibi bizlere de birçok şey öğretmiş ve deprem tedbiri açısından yeni yaklaşımların getirilmesini sağlamıştır. Ülkemizde 17 Ağustos 1999 tarihinde yaşanan Marmara Depremi'nin

ardından, mevcut yapıların değerlendirilmesi gayesiyle 2007 yılında yürürlüğe giren Türkiye Deprem Yönetmeliği'nde yer değiştirmeye dayalı hesap yöntemlerine yer verilmiştir. Yönetmelikte sunulan yöntemler, pratik mühendislik uygulamaları açısından kolaylık sağlamıştır. Fakat, tecrübe edilmeden, hiçbir kalibrasyon çalışması yapılmadan, bu yöntemlerin deprem yönetmeliğinde yer alması tartışmaya açık durumdadır. Yaşanan depremlerde mevcut yapılarda gözlenen performans seviyelerinin, nümerik analizlerle belirlenen yapı performanslarıyla, dolayısıyla yönetmelikteki hesap yöntemleriyle karşılaştırılması, Türkiye Deprem Yönetmeliği Yedinci Bölüm 'ün geliştirilmesi açısından önem taşımaktadır.

Aktif bir deprem kuşağı üzerinde yer alan ülkemizde yapı tasarımlarının doğru bir şekilde yapılması ve uygulanması yaşanan kayıpların azaltılması açısından önem taşımaktadır. Bu açıdan bakıldığında deprem etkisi altında yapı davranışının önceden tahmin edilmesinin yani Performansa Dayalı Tasarım ve Değerlendirme kavramının maddi ve manevi olarak ülkemiz için önemi açıkça anlaşılmaktadır.

1.1. Deneysel Modal Analiz ve Yapı Tanılama Üzerine Yapılmış Çalışmalar

Nümerik modeller birçok mühendislik dalında gerçek davranışı tahmin etmek amacıyla tercih edilmektedir. Fakat oluşturulan nümerik modeller her zaman gerçek davranışı yansıtmamaktadır. Deneysel Modal Analiz yöntemlerini kullanarak yapıların gerçek davranışını belirlemek mümkündür. Deneysel Modal Analiz yöntemleri ile yapıların dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinin temeli 1970'li yıllara kadar dayanmaktadır. Eykhoff [1], yapı tanılama için temel oluşturan eserlerdendir. Yazar matematik modelleri, gerçek sistemlerin mevcut özelliklerinin kullanılabilir halde sunumu olarak tanımlamıştır. Sistemlerin dinamik karakteristiklerini belirlemek amacıyla uygun sinyal işleme teknikleri geliştirmiştir.

Yapı tanılama için geliştirilen tekniklerin endüstriyel süreçler için uygulanması Ljung'un The System Identification adlı MATLAB Toolbox'ı ile başlamıştır [2]. Ljung [3], yapı tanılama teorisi, yöntemleri ve uygulamaları hakkında kapsamlı bilgiler vermektedir. Kitabın revize edilen baskılarında farklı yöntemler hakkında detaylı bilgiler, MATLAB için Yapı Tanılama araç çubuğu (toolbox) ve bilgisayar tabanlı örnekler yer almaktadır. Kitap bu konuya temel teşkil eden eserlerden biridir.

Aynı şekilde Soderstrom and Stoica [4], yapı tanılama alanında pek çok yöntem geliştirmiştir. Ljung and Glad [5], fizik, kimya, biyoloji vb. alanlarda sistemlerin matematik modelini oluşturmak için teknikler geliştirmiştir. Kitapta, ölçümler ile elde edilen değişken giriş-çıkış sinyallerinin gözlemine dayanan, sistemlerin dinamik davranışı hakkında bilgi sahibi olmak amacıyla kullanılan yapı tanılama teknikleri ve hangi tekniğin kullanılan model için daha uygun olduğunu açıklanmaktadır.

Overschee ve De Moor [6], deterministik-stokastik lineer sistemlerin giriş-çıkış sinyallerini kullanarak dinamik modellerini elde etmeyi amaçlamaktadır ve Subspace başlığı altında yeni yöntemler geliştirmiştir. Kitabın son bölümde Matlab tabanlı ISID isimli bir bilgisayar yazılımını geliştirmiştir.

Ewins [7], kitabında modal analiz hakkında temel bilgiler vermektedir. Aynı alanda Maia ve Silva [8] ile He ve Fu [9], modal analiz hazırlık aşaması ve yapı tanılama hakkında detaylı bilgiler sunmaktadır. Titreşim teorisi temelleri, sinyal işleme, yapı tanılama teknikleri, yapısal modifikasyon, sonlu eleman modeli güncelleme tekniği ve nonlinear modal analiz başlıkları eserlerde yer almaktadır.

Doebbling vd. [10], hazırlamış oldukları raporda yapı sağlığı izleme üzerine 1996 yılı ve öncesinde yapılmış çalışmaları özetlemiştir. Benzer şekilde Sohn vd. [11] hazırlamış oldukları raporlarda 1996-2001 yılları arasında yapı sağlığı izleme ve alt başlıkları üzerine yapılmış çalışmaları özetlemiştir. İki raporda bir nevi literatür özeti niteliğindedir.

Brincker ve Anderson [12], çalışmalarında sadece çıkış sinyallerinin kullanıldığı Operasyonel Modal Analiz hakkında temel bilgilere değinmiş, farklı çözüm yöntemleri hakkında bilgiler vermiştir. Berlin ve Zürih arasındaki Z24 Köprüsü üzerinden alınan çevrel titreşim kayıtları dört farklı yöntem ile (Peak Picking, Polyreference LSCE, Stochastic Subspace Identification ve ARMAV) yapı tanılması gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre yöntemlerin avantaj ve dezavantajları belirtilmiştir.

Brincker vd. [13], sadece çıkış sinyalleri ile modal parametre tahmini için frekans alanında yeni bir yöntem geliştirmiştir. Geliştirilen yöntem klasik Peak Picking yönteminin uzantısı niteliğini taşımaktadır. Yöntemde davranış spektrumunun tek serbestlik dereceli sistemlere ayrıştırılabilmesi ile sinyallerin içinde güçlü gürültüler dahi olsa birbirine yakın modlar belirlenebilmektedir. Benzer şekilde Brincker vd. [14], çalışmalarında bir araba gövdesinin sadece çıkış sinyallerini kullanılarak yapı tanılmasını gerçekleştirmiştir. Frekans Alanında Ayrışım ve Stokastik Alt Alan Belirleme yöntemleri kullanılarak yapı tanılama yapılmış ve yöntemlerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Parloo [15], tez çalışmasında Operasyonel Modal Analiz yöntemlerini incelemiş ve yöntemler hakkında detaylı bilgiler vermiştir. Farklı yapılar üzerinde zorlanmış ve çevrel titreşim kayıtlarını kullanarak modal karakteristik tahminleri yapmış ve sonuçları karşılaştırmıştır.

Şafak [16], çalışmasında yapı titreşimlerinin neden ve nasıl izlenmesi gerektiği, yapı titreşimlerinin izlenmesinde ve analizinde hangi aşamaların yer aldığı, her aşamada yapılması gerekenleri ve sonuçta yapı hakkında hangi bilgilerin elde edildiğini detaylı bir şekilde sunmuştur.

Sevim vd. [17], laboratuvar şartlarında oluşturulmuş bir kemer baraj prototipi üzerinde farklı su seviyeleri için çevrel titreşim kayıtlarını kullanarak yapı tanılama gerçekleştirmiştir. Su seviyesindeki değişimlerin modal parametreler üzerindeki etkisini araştırmış ve sonuçları ayrıntılı bir şekilde sunmuştur.

1.2. Sonlu Eleman Modeli Güncelleme Tekniği Üzerine Yapılmış Çalışmalar

Nümerik modeller birçok mühendislik dalında tasarımların gerçek davranışını tahmin etmek amacıyla tercih edilmektedir. Tasarım istenileni karşılıyor mu sorusunun cevabı nümerik modeller kullanılarak bulunmaktadır. Modellerin doğruluğu mühendislik eserlerini doğrudan etkilemektedir. Gerçek model ile nümerik modelin uyumunu Sonlu Eleman Modeli Güncelleme Tekniği ile sağlamak mümkündür. Sonlu Eleman Modeli Güncelleme tekniği 1990'lı yıllarda tasarım aşamasında ve yapı devamlılığının sağlanmasında önemli bir konu olarak ortaya çıkmıştır.

Friswell and Mottershead'ın Finite Element Model Updating in Structural Dynamics adlı kitabı SE modeli güncelleme esasları alanında yazılmış ilk eserdir. Model güncelleme tekniğinde parametre seçimi, duyarlılık analizi ve parametre tahminini başlıkları örneklerle detaylı olarak açıklanmıştır [18]. Maia vd. [19] tarafından 1997 yılında yazılan eser Deneysel Modal Analiz'in tüm aşamalarını anlatmakla beraber bir bölümünde Sonlu Eleman Modeli Güncellemesi Tekniği'ne de değinilmiştir.

Dascotte [20], bir yağ karterinin ANSYS programı ile oluşturduğu nümerik modelini, Deneysel Modal Analiz Yöntemi ile elde ettiği modlara göre güncellemiştir. Güncelleme aşamasında korelasyon analizi, duyarlılık analizi ve Bayes parametre tahmini algoritmasını kullanmış ve SE modelinin dinamik analizlerde gerçekte uyum gösterecek şekilde kullanılması gerektiğini vurgulamıştır.

Pavic vd. [21], iki farklı yaya geçidinin Deneysel Modal Analiz Yöntemi ile modal parametrelerini elde etmiş ve bu parametrelere göre model güncelleme çalışmalarını yapmıştır. Dascotte [22], deneysel modal veriyi kullanarak SE modeli güncelleme üzerine yapmış olduğu bir rapor niteliğindedir. SE modeli güncelleme aşamalarını ve detaylarını anlatmaktadır. Femtools model güncelleme programını kullanarak iki farklı örnek üzerinde model güncelleme aşamalarını özetlemiştir.

Doebing vd. [23], deneysel bir model üzerinde SE modeli güncellemeye dayalı hasar yeri tespiti algoritmasının hangi ölçüde başarılı olduğunun araştırmasını yapmıştır. İncelenen yapı tipi, sınır şartları, deneysel ve tanılama parametrelerinin hasar tespiti algoritmalarının başarısına etkisi göz önüne alınmıştır. Dascotte ve Strobbe [24], SE modeli güncelleme çalışmalarında deneysel modal parametreleri kullanmak yerine deneysel frekans davranış fonksiyonlarını kullanmayı amaçlayan bir yaklaşım geliştirmiştir. Geliştirdikleri yaklaşımı ince bir levha örneğiyle desteklemiştir.

Weber ve Paultre [25], laboratuvarında oluşturdukları 4 katlı dikdörtgen çelik çaprazlı binanın çevrel titreşim kayıtlarından elde ettikleri modal parametreleri kullanarak Sonlu Eleman Modeli Güncelleme çalışmaları yapmıştır. Ayrıca binadaki çelik bir çapraza hasar verilmiş ve model güncelleme tekniğini kullanarak hasar yeri tespiti çalışması yapmıştır.

Ventura vd. [26] ve Ventura vd. [27], 15 ve 48 katlı betonarme binaların çevrel titreşim kayıtlarını kullanarak yapı dinamik parametrelerini belirlemiş ve Sonlu Eleman Modeli Güncelleme çalışması yapmıştır. Sevim vd. [28], Berke Barajının çevrel titreşim kayıtlarını kullanarak modal parametreleri belirlemiş, model kalibrasyonunu yapmış ve 1998 Adana-Ceyhan deprem kaydını kullanarak kalibrasyon öncesi ve sonrasında barajın deprem davranışını incelemiştir.

Rad [29], tez çalışmasında yapı dinamik parametrelerinin güncellenmesi aşamasında kullanılan farklı yöntemleri incelemiş ve güncelleme için en uygun yöntemi bulmayı amaçlamıştır. Bu amaçla güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş ince bir plak üzerinde Deneysel Modal Analiz ve Sonlu Eleman Modeli Güncelleme çalışmaları yapmıştır.

Lord vd. [30], Kanada, Vancouver 'da bulunan 48 katlı betonarme bina üzerinde Sonlu Eleman Modeli Güncelleme çalışması yapmıştır. Çevrel titreşimler kullanılarak elde edilen modal parametreler yapının nümerik modelini geliştirmek amacıyla kullanılmıştır. Başlangıç sonlu eleman modelinde farklı güncelleme parametreleri deneysel ve nümerik sonuçların korelasyonunu arttırmak amacıyla kullanılmıştır. Çalışmada, sonlu eleman modelinin gerçek modelden daha esnek olması ve elastisite modülünün azaltılması gerektiği vurgulanmıştır.

Bakır vd. [31], 107M573 numaralı Tübitak projesinde Deneysel Modal Analiz için uygun sensör yeri seçimi, yapı tanılama ve verilerin işlenmesi için kullanılan farklı yöntemler hakkında bilgiler vermiştir. Bu yöntemler içinden en uygun olanları çeşitli sayısal örnekler ile gösterilmiştir. Bir ilköğretim okulunun yapı sağlığı üç yıl süre ile izlenmiş ve sonlu eleman modeli güncellemesi tekniği kullanılarak hasar tespiti yapılmıştır.

Jaishi ve Ren [32], çevrel titreşim kayıtları ile elde ettiği modal parametreleri kullanarak pratik bir Sonlu Eleman Modeli Güncelleme Tekniği geliştirmiştir. Bu amaçla, seçilen basit bir kirişin değişen frekans ve mod şekilleri göz önünde bulundurularak değerlendirme yapılmış ve kirişin SE modeli güncellemesi için bir amaç fonksiyonu belirlemiştir. Bu amaç fonksiyonu kullanılarak, beton ve çelik kompozit bir köprünün deneysel yolla elde edilen modal parametrelerini kullanarak nümerik köprü modelini güncellemiştir.

Bayraktar vd. [33] yapmış oldukları 106M038 numaralı Tübitak projesinde çubuk elemanlar, bir, iki, üç katlı betonarme karkas ve dolgu duvarlı yapıların çevrel titreşim kayıtlarını kullanarak dinamik karakteristiklerini belirlemiş ve model güncelleme tekniği ile hasar yeri tespitini gerçekleştirmiştir.

Ramos vd. [34], laboratuvar ortamında yığma yapıları temsilen bir kemer model oluşturmuş ve aşamalı olarak oluşturulan hasar durumları için hasar değerlendirmesi yapmıştır. Hedeflenen hasar seviyelerine bağlı olarak literatürde önerilen yöntemler kullanılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Literatürdeki birçok yöntemle, model üzerindeki hasar düzeyi birinci, ikinci ve üçüncü seviyeye kadar belirlenebilmiş, dördüncü seviye hasar değerlendirmesi yapabilmek için model güncelleme tekniği kullanılmıştır.

Bayraktar vd. [35], Trabzon, Türkiye’de bulunan kemerli çelik bir üst geçidin, çevrel titreşim kayıtlarını kullanılarak modal karakteristiklerini belirlemiş, elde edilen sonuçlar göz önünde bulundurularak SE modeli güncelleme çalışması gerçekleştirilmiştir. Güncelleme aşamasında malzeme özelliklerindeki belirsizlikleri en aza indirmek amaçlanmıştır.

1.3. Deprem Performansı Değerlendirmesi Üzerine Yapılmış Çalışmalar

Performansa Dayalı Tasarım kavramı 1960’lı yıllara kadar uzanmaktadır. Yaşanan afetlerdeki maddi ve manevi büyük kayıplar, yapı tasarımında performans kavramının dikkate alınması gerektiğini ortaya koymuştur. Belirli bir performans düzeyini gerçekleştirmek için kaçınılmaz olarak uygulanması gereken elastik ötesi hesap yöntemleri arasında, basitleştirilmiş çözüm olarak sunulan Nonlinear Statik Yöntem geleneksel olarak lineer davranışa koşullandırılmış biçimde gelişen mühendislik pratiğince hemen kabul görmüştür [36]. Nonlinear statik yöntem algoritmalarının uygulanması, çok serbestlik dereceli (ÇSD) yapı modelinin eşdeğer tek serbestlik dereceli (TSD) yapı modeline dönüştürülmesini gerektirmektedir.

Gülkan ve Sözen [37], yapı sistemlerinin elastik ötesi davranışının azaltılmış direngenlik ve arttırılmış sönümlü TSD yapı sistemleri ile tanımlanabileceğini, betonarme TSD sistemlerin deprem simülatörü deneylerine dayanarak bulmuşlardır.

Gülkan ve Sözen'in bu çalışmasına, Shibata ve Sözen [38] tarafından ÇSD sistemler için Yerine Koyma Yöntemi (Substitute Structure Method) adı verilmiştir. Betonarme yapılar için, Yerine Koyma Yöntemi, tasarım spektrumu ile verilen deprem hareketine ait tasarım kuvvetlerinin belirlenmesinde kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem günümüzde, Priestley [39], Priestley ve Kowalsky [40] ve Priestley [41] tarafından Direkt Deplasmana Dayalı Tasarım yönteminin geliştirilmesinde kullanılmıştır.

1981 yılında, Saiidi ve Sözen [42] tarafından önerilen Q-Model'de ilk kez yapı elemanlarının moment eğrilik ilişkileri kullanılmıştır. Çalışmada, TSD sistemin kuvvet yerdeğiştirme karakteristiklerini elde etmek amacıyla moment-eğrilik eğrisinin iki doğrulu olarak idealleştirilmesi yapılmıştır. Daha sonra, Fajfar ve Fischinger [43], Q-Model'den esinlenerek geliştirdikleri N2 Metodu'nu önermişlerdir.

1994 yılında Lawson vd. [44] tarafından doğrusal olmayan statik artımsal itme analizi yöntemlerinin hangi durumlarda, neden ve nasıl kullanılması gerektiği konusunda bir çalışma yapılmıştır.

1995 yılında Moghadam ve Tso [45] çalışmalarında, simetrik olmayan yüksek katlı yapı sistemlerinde depremde büyük hasarlara neden olan burulma düzensizliğinin hasar seviyesine etkisini göstermek amacıyla, doğrusal olmayan statik artımsal itme analizi yöntemlerinin simetrik olmayan yapılarda kullanımı incelemiştir.

Tso ve Moghadam [46], 1996 yılında eksantrik çok katlı yapıların hasar kapasitelerinin belirlenmesi için basitleştirilmiş bir yöntem geliştirmiştir ve yapıların deprem davranışlarında birinci mod etkilerinin hakim olduğu kabul edilmiştir.

Kilar V. ve Fajfar P. [47] 1997'de yaptıkları çalışmada, aralarındaki oran sabit kalacak şekilde artmakta olan yatay yükler etkisindeki yapıların doğrusal olmayan statik artımsal itme analizi için bir yöntem geliştirmiştir. Yöntemde yapıların düzlemsel makro elemanlardan oluştukları kabul edilmiştir.

Sasaki vd. [48] 1998'de yapıların göçme mekanizmalarının yüksek mod etkilerine bağlı olarak belirlenmesine yardımcı olacak, yüksek mod esaslı doğrusal olmayan statik artımsal itme analizi yöntemi geliştirmiştir. Geliştirilen yöntem doğrusal olmayan statik artımsal itme analizi yöntemlerinin kolaylıklarını devam ettiren ve yüksek mod etkilerini de kapsayan bir şekilde genişletilmiştir. Kim vd. [49] 1999'da yaptıkları çalışmada, elastik ötesi bölgelerde elemanların değişen rijitliklerine bağlı değişen, mod şekilleri ile orantılı kuvvet dağılımlarını esas alan, bir dinamik elastik ötesi analiz yöntemi geliştirmiştir. Geliştirilen yöntemde yapının elastik ötesi davranışında yatay yüklerin dağılımı mod şekline bağlı olarak değişmektedir.

Antoniou vd. [50] 2002'de yaptıkları çalışmada, yeni bir doğrusal olmayan statik artımsal itme analizi yöntemi geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntemde, elemanların değişen rijitliklerine ve yapı sisteminin dinamik özelliklerine bağlı olarak yapının elastik ötesi davranışının çeşitli kademelerinde, yapı yüksekliği boyunca değişen yatay yük dağılımını ve yüksek mod etkileri dikkate alınmaktadır.

Antoniou ve Pinho [51] 2004'te yaptıkları çalışmada yatay kuvvetlerin yerine yatay yer değiştirmelerin uygulandığı yer değiştirmeye dayalı yeni bir adaptif pushover analiz yöntemi geliştirmiştir. Geliştirilen yöntemde, tüm şekil değiştirme aralığında yapının davranış tahmininin kuvvete dayalı yöntemlere oranla daha gerçekçi şekilde belirlenebildiği kanıtlanmıştır.

Pinho vd. [52] 2007 yılında yapmış oldukları çalışmada geleneksel pushover analizini, monoton olarak artan yatay kuvvetleri, sabit dağılım kullanarak hedef deplasmana ulaşana kadar, çok açıklıklı sürekli bir grup köprü modeline uygulamıştır. Çalışma geleneksel pushover yöntemleri ile farklı single-run pushover teknikleri ile sürekli köprülerin deprem kuvveti altındaki davranışlarının tahmin edilebileceği gösterilmiştir.

1.4. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Literatürde Deneysel Modal Analiz yöntemleri kullanılarak yapıların sonlu eleman modellerinin güncellenmesi üzerine yapılmış çalışmalar bulunmaktadır. Mevcut binaların performans değerlendirmesi üzerine yapılan çalışmalarda ise yöntem geliştirme, farklı yöntemlerin karşılaştırılması, deprem performansı ile nümerik yöntemler sonucunda elde edilen performansların karşılaştırılması üzerine çalışmaların yapıldığı görülmektedir. Fakat Sonlu Eleman Modeli Güncelleme tekniğinin betonarme binaların performans değerlendirilmesi alanında kullanıldığı bir çalışmaya dünya ve ülkemiz literatüründe rastlanmamıştır.

Yaşanan depremlerin ardından, yapılar hakkında laboratuvar deneyleri ile dahi elde edilemeyecek sonuçlara ulaşmak mümkündür. Bu tez çalışması, “Yapılar depremden önce deplasman esaslı yöntemlerle değerlendirmeye tabi tutulsa, deprem anındaki performansları belirlenebilir mi yada hangi ölçüde belirlenebilir?” sorusu dikkate alınarak yapılmıştır. Bu çalışmada deprem geçirmiş binaların nümerik modelleri Sonlu Eleman Modeli Güncelleme Tekniği ile güncellenmiş ve binaların deprem performansı Türkiye Deprem Yönetmeliği Yedinci Bölüm’deki Doğrusal Elastik ve Doğrusal Elastik Olmayan performans değerlendirme yöntemleri ile belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar deprem sonrasında gözlenen bina performansları ile karşılaştırılarak Türkiye Deprem Yönetmeliği 2007’de [53] kullanılan performans değerlendirme yöntemlerinin gerçek sonuçlarla uyumu irdelenmiş bu yöntemlerin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Belirtilen amaç doğrultusunda hazırlanan tez çalışması yedi ana başlıktan oluşmaktadır.

Birinci Bölüm’de, Deneysel Modal Analiz ve Yapı Tanılama Teknikleri, Sonlu Eleman Modeli Güncelleme Tekniği ve Deprem Performansı Değerlendirmesi üzerine yapılmış çalışmalar incelenmiştir. Tez çalışmasının amaç ve kapsamından bahsedilmektedir.

İkinci Bölüm’de çalışmanın ilk aşaması olan yapı dinamik karakteristiklerinin hesap yöntemleri açıklanmıştır. Nümerik ve Deneysel Modal Analiz Yöntemleri hakkında bilgi verilmiştir.

Üçüncü Bölüm'de çalışmanın ilk adımı olan yapı tanılması detayları verilmiştir. Deneysel Modal Analiz Yöntemleri'nde kullanılan modal verinin yapıdan alınması, optimum sensör yerinin belirlenmesi, alınan kayıtların analiz edilmesi ve yapı dinamik karakteristiklerinin Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma Yöntemi kullanılarak elde edilmesi hakkında bilgiler verilmiştir. Açıklanan tüm aşamaları kapsayan bir örnek çalışma yapılmıştır.

Dördüncü Bölüm'de sonlu eleman modeli güncelleme tekniği aşamaları detaylı olarak açıklanmıştır. Sonlu eleman modelindeki olası belirsizlikler, yapı dinamik karakteristiklerinin karşılaştırılması, güncelleme parametresi ve response seçimi ile duyarlılık tabanlı model güncelleme başlıkları açıklanmıştır. Örnek bir çalışma ile kullanılan yöntemlerin geçerliliği gösterilmiştir.

Çalışmanın Beşinci Bölümü'nde tez kapsamında incelenen sekiz adet binanın deneysel ve nümerik yöntemlerle yapı tanılama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar dikkate alınarak binaların nümerik modelleri Sonlu Eleman Modeli Güncelleme tekniği kullanılarak güncellenmiştir.

Altıncı Bölüm'de Performansa Dayalı Tasarım hakkında genel bilgiler verilmiş ve sonlu eleman modeli güncellenmiş binaların Türkiye Deprem Yönetmeliği 2007 Yedinci Bölüm'de yer alan Doğrusal Elastik Eşdeğer Deprem Yüğü (DEEDY), Doğrusal Elastik Mod Birleştirme (DEMB), Doğrusal Elastik Olmayan Artımsal Eşdeğer Deprem Yüğü (AEDY), Doğrusal Elastik Olmayan Artımsal Mod Birleştirme (AMB), yöntemlerine göre performans değerlendirmesi yapılmıştır. Diğer bir başlıkta ise model güncelleme yapmadan binaların gerçek davranışı tahmin edilebilir mi? sorusunun cevabı aranmıştır. Sonlu eleman modeli güncellenmiş ve güncellenmemiş binaların performans değerlendirme sonuçları deprem esnasındaki bina performansları ile karşılaştırılmıştır.

Çalışmanın Yedinci Bölümü'nde ise yapılan örnek çalışma sonucunda bulunan en uygun ivmeölçer konumlandırması, sonlu eleman modeli güncelleme tekniğinin nümerik model üzerindeki etkisi ve performans değerlendirme yöntemlerinin gerçekte uyumu üzerine elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

BÖLÜM 2. YAPI DİNAMİK KARAKTERİSTİKLERİN HESABI

2.1. Giriş

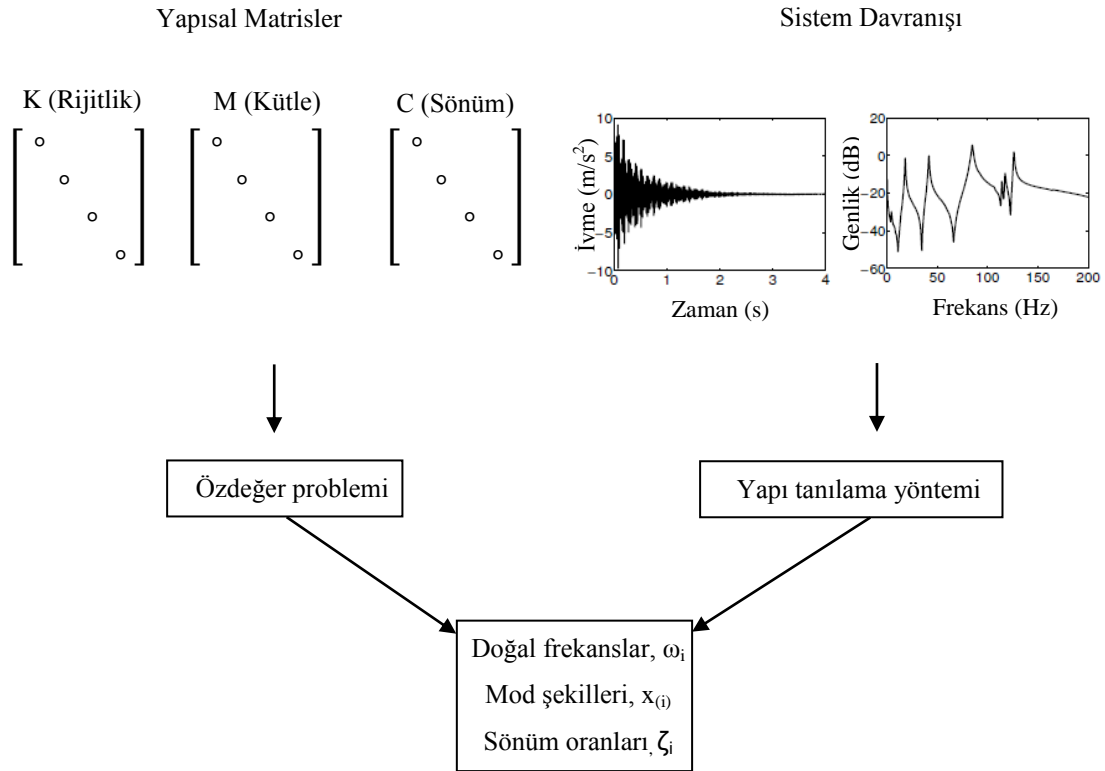
Titreşimler günlük hayatta her yerde karşımıza çıkmakta ve bazen ses bazen de yapı tahribatı gibi olumsuz etkilere neden olmaktadır. Titreşimler yapıda dinamik etkilerin meydana gelmesine neden olmaktadır. Yapıların dinamik yükler etkisindeki davranışları birçok belirsizlik içermektedir (iç kuvvetler, şekildeğişmeler, yerdeğişmeler). Bu belirsizlik etki eden dinamik yüklerin tam olarak bilinmemesinden kaynaklanmaktadır.

Dinamik yüklerdeki belirsizliklerin yanı sıra dinamik davranışı etkileyen parametrelerdeki (mevcut yapısal özellikler, malzeme özellikleri, sınır şartları ve hasar durumu) ve inşa aşamasındaki belirsizlikler, yapı dinamik davranışının gerçekçi olarak belirlenmesini zorlaştırmaktadır.

Yapıdaki tüm bu belirsizlikler her yapı için karakteristik özelliğe sahip yapı dinamik parametreleri kullanılarak belirlenebilmektedir. Son 30 yıl içinde yapı dinamik davranışı ve yapı dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi ilgi çekici bir konu haline gelmiştir. Bu çalışma alanı literatürde modal analiz olarak adlandırılmaktadır. Yapı dinamik karakteristikleri, oluşturulan nümerik modellerin doğruluğunun kontrolünde ve yapıya etkiyecek deprem kuvvetlerinin hesaplanmasında kullanılmaktadır.

Yapının modal davranışına bakılarak rijitlik dağılımı ve burulma düzensizliği olup olmadığı hakkında fikir sahibi olunabilmektedir. Bu nedenlerden dolayı dinamik karakteristiklerin yapılar üzerinde titreşim testleri yapılmak suretiyle gerçekçi olarak bulunması yapının gerçek davranışının belirlenmesinde oldukça önemlidir [54].

Yapı dinamik karakteristikleri olarak adlandırılan doğal frekans, mod şekli ve sönüm oranını Teorik ve Deneysel Modal Analiz Yöntemleri'ni kullanarak hesaplamak mümkündür. Şekil 2.1'de Teorik ve Deneysel Modal Analiz Yöntemlerinin işlem aşamaları özetlenmiştir.



Şekil 2.1. Teorik ve deneysel modal analiz yöntemi işlem aşamaları

2.2. Teorik Yöntemler ile Modal Analiz

Analitik modeller veya yaklaşık yöntemler kullanarak yapıların dinamik karakteristiklerini belirlemek mümkündür. İnşa edilen binaların boyutlarına bağlı olarak yapı standartlarına göre birinci doğal frekansı hesaplanabilmektedir. Birçok yapı standardında yaklaşık bağıntılar kullanarak yapının birinci frekans değerini belirlemek mümkündür. Türkiye Deprem Yönetmeliği 2007'de de birinci doğal titreşim periyodunun belirlenmesi için Bölüm 2.7.4'te gerekli bağıntılar verilmiştir. Doğal frekans değerini analitik modeller kullanarak belirlemek de mümkündür. Analitik modelleme sayesinde binanın doğal frekans ve mod şekillerini belirlemek ve

dinamik davranışını tahmin etmek de mümkündür [55]. Doğal frekans değerleri ve mod şekilleri, çok serbestlik dereceli sisteme ait hareket denkleminin çözümü ile elde edilmektedir. Çok serbestlik dereceli sönümsüz bir sisteme ait hareket denklemi,

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{f(t)\} \quad (2.1)$$

şeklinde tanımlanır. Burada $[M]$ ve $[K]$ kütle ve rijitlik matrislerini, $\{\ddot{x}(t)\}$, $\{x(t)\}$ ve $\{f(t)\}$ sırayla ivme, yer değiştirme ve kuvvet vektörlerini ifade etmektedir. Yapının serbest titreşim yaptığı düşünülürse sisteme ait hareket denklemi,

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{0\} \quad (2.2)$$

halini almaktadır. Bu denklem kullanılarak yapıya ait özdeğer denklemi ise,

$$\det[[K] - \omega^2[M]]=0 \quad (2.3)$$

şeklinde elde edilir. Denklem 2.3'ün çözülmesi ile sistemin serbestlik derecesi kadar sönümsüz doğal frekans değeri elde edilir. Mod şekli ise her bir doğal frekans değerinde yapının almış olduğu şekil olarak tanımlanır [55]. Yapı doğal frekanslarını, mod şekillerini ve dinamik davranışını belirlemede kullanılan diğer bir seçenek de nümerik modellemedir. Nümerik modelleri oluşturmak için kullanılan birçok bilgisayar programı mevcuttur. Programlar ile karmaşık yapıların nümerik modelleri çoğunlukla sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak modellenmektedir. Nümerik modellerle elde edilen kütle ve rijitlik matrisleri yaklaşık yöntemlerle çözümlenerek yapıya ait dinamik karakteristikleri elde etmek mümkündür [56].

2.3. Deneysel Yöntemler ile Modal Analiz

Yapılar üzerinde titreşimlerin etkisiyle oluşan tepkilerin ölçülmesi ve ölçüm verilerinden yapı dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi amacıyla kullanılan yöntemler Deneysel Modal Analiz Yöntemleri olarak bilinmektedir. Nümerik yöntemle dinamik karakteristiklerin hesabında malzeme özelliklerinden sınır şartlarına kadar yapılan kabuller ve yapının inşa aşamasında yapılan işçilik hataları nümerik modelin güvenilirliğini azaltmaktadır. Deneysel yöntemlerde ise ölçümler

yapı üzerinden hiçbir kabul yapılmadan direk alınmaktadır. Bu nedenle deneysel yolla elde edilen dinamik karakteristikler nümerik model ile elde edilenden daha güvenilir olarak kabul edilir. Mevcut yapıların matematik modeli her zaman oluşturulamadığı için Deneysel Modal Analiz Yöntemleri dinamik karakteristiklerin elde edilmesinde son yıllarda analitik yöntemle oranla daha fazla tercih edilme nedenlerinden diğer biridir. Deneysel yöntemlerle yapıların dinamik davranışının belirlenmesi, yapı üzerinden alınan ölçümlerden dinamik karakteristiklerin elde edilmesi esasına dayanmaktadır. Bu süreç üç aşamada gerçekleştirilebilir:

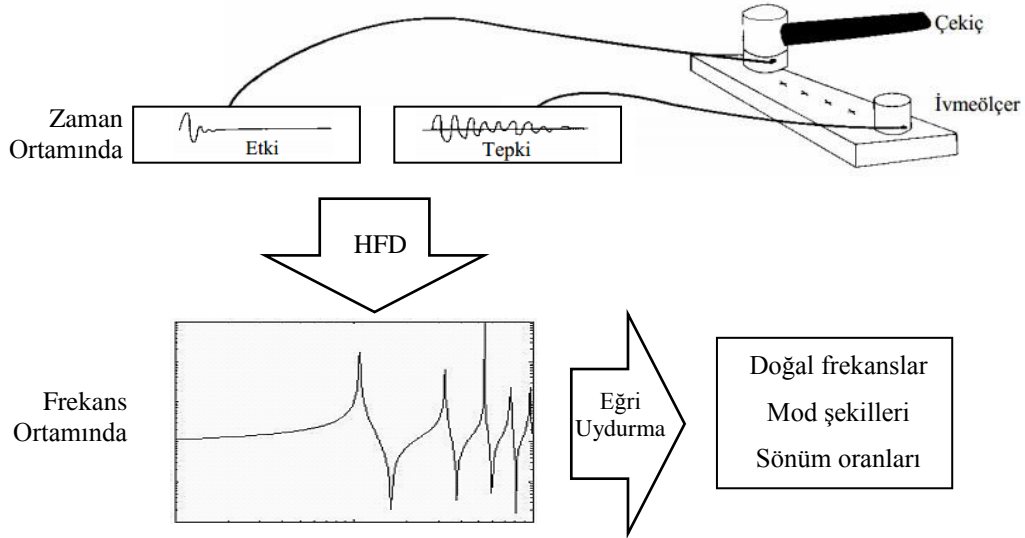
- a. Modal verinin ölçülmesi
- b. Ölçülen modal verinin analiz edilmesi
- c. Elde edilen modal karakteristikler kullanılarak dinamik davranışın oluşturulması.

Deneysel yöntemlerde yapılar ya bilinen bir kuvvetle titreştirilmekte ya da çevresel titreşimler dikkate alınarak ölçümler yapılabilmektedir. Deneysel yöntemler, ölçümlerde kullanılan titreşim kuvvetinin bilinip bilinmemesine bağlı olarak, Deneysel Modal Analiz ve Operasyonel Modal Analiz Yöntemi olmak üzere ikiye ayrılır [54,57].

2.3.1. Deneysel modal analiz yöntemi

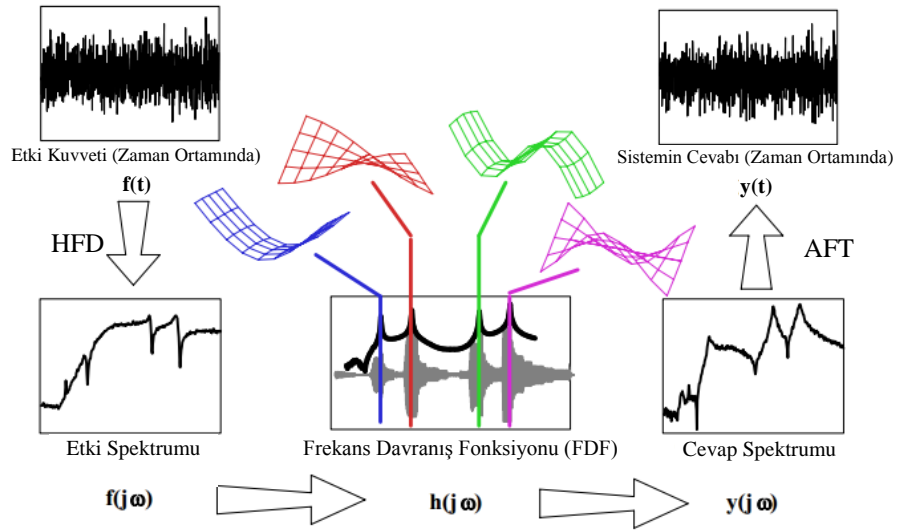
1970'li yılların başından itibaren elektronik ve bilgisayar alanındaki gelişmeleri takiben Deneysel Modal Analiz (DMA) yöntemi hızla gelişmiş ve tercih edilir hale gelmiştir [58]. DMA yönteminin İnşaat Mühendisliği alanındaki ilk çıkış noktası, test prototiplerinin üretilmesi ve test kuvvetlerinin uygulanması alanında olmuştur. Ancak deprem gibi dinamik kuvvetlerin doğal tesadüfîlik özelliklerini birebir üretme güçlüğünden dolayı yapı dinamik testleri farklı istikamette gelişmiştir. Bu süreç mevcut mühendislik yapılarının analizlerinde (yapı sağlığı izleme, hasar görülebilirlik çalışmaları, durum tespiti) özellikle saha testlerinde önemli uygulama alanı bulmuştur. DMA yönteminin, mekanik alanda ve uzay endüstrisinde uygulanmaya başlamasıyla önemi daha da artmıştır. Deneysel Modal Analiz yönteminde yapı bilinen bir etkiyle titreştirilip (sarsma tablası, darbe çekici ve shaker), yapının bu etkiye verdiği tepki ölçülmektedir.

Günümüzde titreşimlerin etkisi ile makinelerin ve yapıların mod şekillerinin bulunmasında, darbe çekici ile modal test ekonomik ve hızlı şekilde sonuç elde edilmesi açısından birçok alanda tercih edilmektedir. Şekil 2.2’de Deneysel Modal Analiz Yöntemi’ne örnek olarak darbe çekici ile yapıda etki kuvveti oluşturulması ve giriş-çıkış kuvvetlerinin ölçüm düzeneği verilmiştir.



Şekil 2.2. Deneysel modal analiz darbe çekici ile ölçüm düzeneği [59]

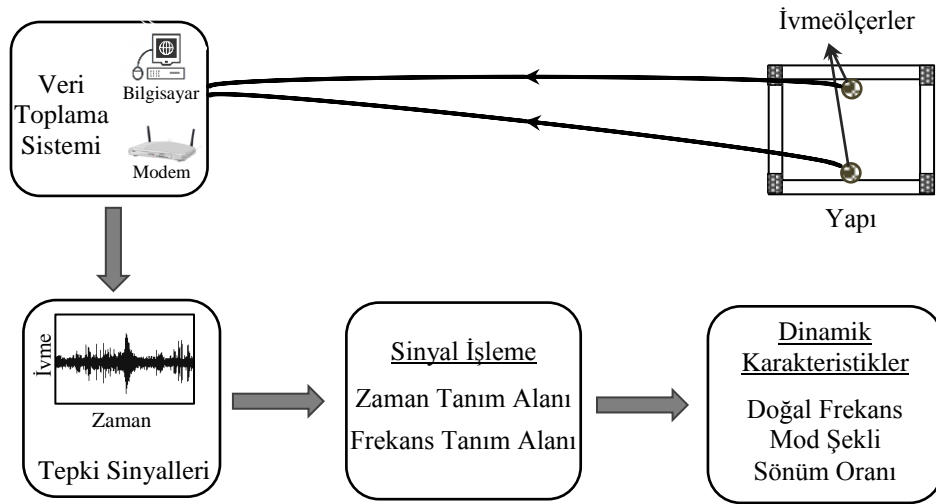
DMA yönteminde giriş, yani yapıları titreştirmek amacıyla uygulanan kuvvetin genliği ve zamanla değişimi ile çıkış yani kuvvete karşı yapının vermiş olduğu tepki bilinmektedir. Uygulanan kuvvet etkisindeki yapı, mevcut sınır şartları, malzeme özellikleri ve varsa hasar durumuna bağlı olarak titreşim hareketi sergilemektedir. Yapıya uygulanan kuvvet, çekicinin başlığına yerleştirilen kuvvetölçer yardımıyla, yapının titreşim tepkileri ise yapıya yerleştirilen ivmeölçerler yardımıyla kayıt edilir. Zaman ortamında kayıt edilen bu sinyallerden farklı yöntemler kullanılarak yapıya ait dinamik karakteristikler elde edilir [7, 58]. Şekil 2.3’te Deneysel Modal Analiz’de giriş-çıkış kuvveti (etki-tepki) arasındaki ilişki ile frekans ve mod şekillerinin elde edilme aşamaları özetlenmiştir.



Şekil 2.3. Deneysel modal analizde giriş kuvvetinden sistemin cevabının elde edilmesi [60]

2.3.2. Operasyonel modal analiz yöntemi

90'lı yılların başından itibaren Operasyonel Modal Analiz (OMA) yöntemi İnşaat Mühendisliği alanında, bina, gökdelen, köprü vb. yapılarda uygulanmaya başlanmıştır [61]. Büyük mühendislik yapıları deprem, rüzgar, taşıt ve insan hareketleri, makine titreşimleri gibi genliği ve zamanla değişimi tam olarak bilinmeyen titreştiriciler tarafından tetiklenmektedir. Gelişen bilgisayar teknolojisi ve elektronik imkanlar titreşimlere maruz mühendislik yapılarının ölçümlerinde bir titreştirici kullanmak yerine yapıdaki mevcut titreşimleri dikkate alarak ölçüm yapılabilmeyi mümkün kılmaktadır [54]. OMA, çevrel, yalnızca çıkış veya doğal çıkışlı modal analiz olarak da adlandırılmaktadır. OMA yöntemi ile modal karakteristiklerin hesabında sadece yapının çevrel titreşim kayıtları veya doğal çıkışlar kullanılmaktadır. Şekil 2.4'te tipik bir Operasyonel Modal Analiz Yöntemi veri toplama ve analiz düzeneği görülmektedir.



Şekil 2.4. Operasyonel modal analiz yöntemi tipik bir veri toplama ve analiz düzeneği

OMA'da veri alımı, kurulumu zor olmayan cihazlar kullanılarak düşük maliyet ile yapılabilir. Veri alımı esnasında yapıda herhangi bir tahribat meydana gelmez. OMA yöntemi sadece dinamik tasarım ve yapı kontrolü için değil titreşim esaslı yapı sağlığı izleme ve yapıların hasar tespiti gibi alanlarda da kullanılabilir. Yukarıda sıralanan avantajları OMA'nın uzay endüstrisi ve makine mühendisliği gibi alanlarda da tercih edilmesini sağlamaktadır [61].

Bu yöntemde bilinmeyen etki ve ölçülen tepki fonksiyonları arasındaki bağıntı,

$$[G_{yy}(\omega)] = [H(\omega)]^* + [G_{xx}(\omega)][H(\omega)]^T \quad (2.4)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Burada, $[G_{xx}(\omega)]$ ve $[G_{yy}(\omega)]$ etki (giriş) ve tepki (çıkış) sinyallerine ait güç spektral yoğunluk, GSY, fonksiyonlarını, $[H(\omega)]$ ise frekans davranış fonksiyonunu (FDF) göstermektedir. Bu ifadedeki * ve T fonksiyonların eşleniğini ve transpozisini göstermektedir. Bu bağıntıda etkinin beyaz gürültü olduğu varsayılarak etki sinyaline ait spektral yoğunluk fonksiyonu sabit alınmıştır.

Tepki sinyaline ait güç spektral yoğunluk fonksiyonu, tekil değer ayrışımı, TDA, yapılarak ayrık değerler olarak,

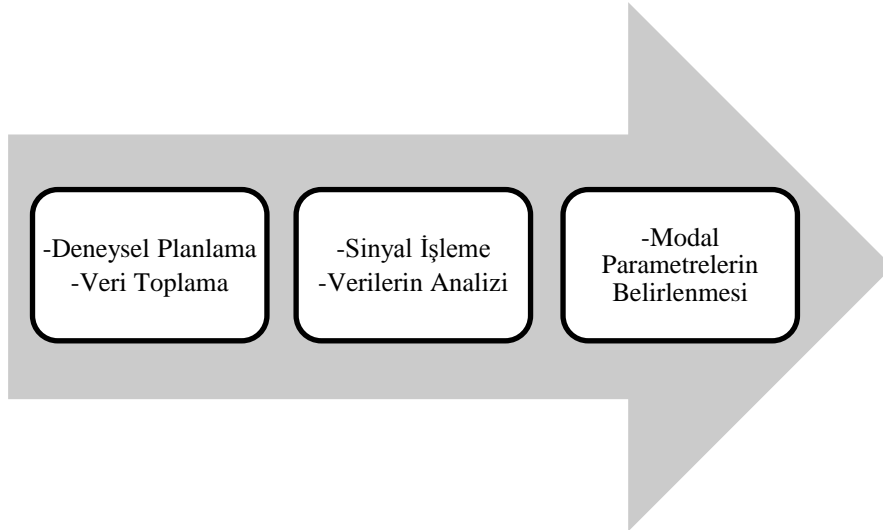
$$G_{yy}(j\omega_i) = U_i S_i U_i^H \quad (2.5)$$

şeklinde verilmektedir. Burada, U_i , u_{ij} tekil (mod) vektörlerinden oluşan birim matrisi, S_i , s_{ij} tekil değerlerden (özdeğerlerden) oluşan diyagonal matrisi göstermektedir [62]. Operasyonel Modal Analiz'de yapı dinamik parametrelerinin belirlenmesi için birçok yöntem kullanılmaktadır. Tez çalışmasında bu yöntemlerden biri olan Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma Yöntemi (Enhanced Frequency Domain Decomposition Method) kullanılmıştır. Yöntemin detayları Bölüm 3.4.1.'de verilmiştir.

BÖLÜM 3. MODAL VERİ TOPLAMA VE ANALİZİ

3.1. Giriş

Son 20 yıl içerisinde elektronik ve bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler Yapı Mühendisliği'ne önemli değişiklikler getirmiştir. Bu değişikliklere gösterilebilecek en önemli örneklerden biri yapı dinamik davranışının izlenebilmesi alanında olmuştur. Yapı üzerine kurulan izleme sistemleri yardımıyla günümüzde yapılar hakkında birçok gerçek veriyi elde etmek mümkün hale gelmiştir. Yapı üzerindeki izleme sistemlerinden alınan verileri kullanılarak yapı dinamik karakteristiklerini, elastik ve elastik ötesi yapı davranışını, yapı zemin etkileşiminin mertebesini, burulma ve salınım titreşimlerinin periyod ve genliklerini, yapıda çeşitli etkilerle oluşabilecek gözle görülemeyen hasarları tespit etmek mümkündür [16]. Bu sayede gerçek yapı davranışını belirlemek ve nümerik modelleri doğru bir şekilde oluşturmak mümkün hale gelmiştir. Şekil 3.1'de deneysel yöntemle modal analiz aşamaları özet olarak verilmiştir.



Şekil 3.1. Deneysel yöntemle modal analiz aşamaları

Aşağıdaki başlıklarda tez çalışmasında kullanılan Operasyonel Modal Analiz yönteminin ölçüm verileri (çıkış ölçümleri veya çevrel titreşimler), verilerin yapıdan toplanması ve analiz edilmesi, yapı dinamik parametrelerinin elde edilmesi hakkında bilgiler yer almaktadır.

3.2. Çevrel Titreşim

Tez çalışmasında deneysel yolla modal analiz aşamasında yapıdan tahribatsız bir şekilde, düşük maliyet ile veri toplamayı sağlayan Operasyonel Modal Analiz Yöntemi tercih edilmiştir. Yani yapı dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde yapıdan toplanan çevrel titreşim test ölçümleri kullanılmıştır. Çevrel titreşimler, atmosfer hareketleri (iklimler, rüzgar, ısı), malzeme değişimleri (ısısal genleşme ve büzülme), taşıyıcı elemanların davranışı (yüklenme ve boşalma durumları), trafik, endüstriyel gürültü, insan hareketleri, yer altı tektonik çökmeler, yer altı akarsu veya su seviyesi oynamaları, volkanik aktiviteler gibi etkenler sonucunda oluşmaktadır.

Çevrel titreşimler yapısal özelliklerle ilişkili olarak yapıda az veya çok hissedilir ve çok düşük mertebede (elastik davranış içinde ortaya çıkan düşük enerjili kuvvetler ile ataletleri oranında) tepki meydana getirir. Çevrel titreşim ölçümleri İnşaat Mühendisliği'nde yapı dinamik karakteristiklerini belirleme çalışmalarında kullanılan önemli verilerdir [64, 65].

Çevrel titreşim ölçümlerinin yapıdan alınması hız veya ivmeölçer cihazlarının önemli yapısal noktalara konumlandırılarak titreşimlerin belirli periyodlarla tekrarlı olarak kaydedilmesi ile gerçekleşir. Alınan yapısal titreşimlerin işlenmesi ve analizi aşamasında verinin gürültü seviyesi ve izlenen noktaların genel yapısal davranışı temsil etmesi yapı titreşim ölçümlerinin tutarlılığını göstermektedir [65].

3.3. Optimum Sensör Yeri ve Sayısı Tayini

Yapı izleme sistemlerinin uygulanmasında göz önüne alınması gereken en önemli konu, yapıdan kayıtların doğru bir şekilde alınıp analiz edilmesidir. Bu amaç göz önüne alınarak İnşaat mühendisliğinde, beklenen ana hareket bileşenlerini tayin etmeye yetecek sayıda ivmeölçerlerin yapıya yerleştirilmesi ve bunların eş zamanlı

olarak bir merkezi kayıt sistemine bağlanması doğru bir yapı izleme sistemi olarak nitelendirilebilir. Bu konu başlığında Kammer [66], Yao vd. [67], Laory vd. [68], Chang ve Pakzad [69] çeşitli çalışmalar gerçekleştirmiştir.

Gerekli sensörlerin sayısı ve konumu ölçülecek hareketin iki veya üç boyutlu olmasına bağlı olarak değişir. İki boyutlu hareket iki öteleme ve bir dönme ile tanımlanabilir. Dolayısıyla, böyle bir harekete sahip rijit bir yapıda (örneğin kayma duvarlı ve rijit kat döşemeli bir binanın katları) bu üç bilinmeyi tayin edebilmek için en az üç ölçüme ihtiyaç vardır. Ölçümler en az iki değişik noktada yapılmalıdır. Benzer şekilde, üç boyutlu hareket üç öteleme ve üç dönme ile tanımlanabilir. Böyle bir hareketi olan rijid bir yapıda (örneğin asma köprü tabliyelerini oluşturan parçalar) bu altı bilinmeyi tayin edebilmek için en az altı ölçmeye ihtiyaç vardır. Ölçümler en az üç değişik noktada yapılmalıdır [16].

Tez çalışmasında çevrel titreşim ölçümlerinin alınmasında kullanılan ivmeölçerler Tübitak 108M303 numaralı proje kapsamında kullanılan [70], AREL elektronik [71] tarafından geliştirilen DAC-3HDG serisi ivme duyarlı ölçüm cihazlarıdır. Bina üzerine yerleştirilen ivmeölçerler kablosuz ağ (GPS) kullanılarak birbirine bağlanmış ve bir bilgisayar yardımı ile kaydedilen veriler gerçek zamanlı olarak izlenmiştir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. AREL DAC-3HDG serisi ivmeölçer ve kullanılan ölçüm ağı

Çevrel titreşim kayıtlarının alınmasında kullanılan AREL DAC-3HDG serisi ivmeölçerlerin genel özellikleri ve ölçüm hassasiyetleri Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1. DAC-3HDG serisi ivme duyarlı ölçüm cihazlarının özellikleri

Donanımsal Özellikler	
Ölçüm eksenleri	3 eksenli
Güç kaynağı	12 VDC
Çalışma sıcaklığı	-20, +80
Haberleşme portu	1 Ethernet / TCP-IP
GPS	50 Kanal Hassasiyet Dahili
Teknik Özellikler	
İvmeölçer	a. Kapasitif Kuvvet Mikroışlenmiş Sensör b. 300ng/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ses c. $\pm 2\text{g}$ full kalibrasyon d. $\pm 5\text{ V}$ diferansiyel çıkış e. 200 Hz bant genişliği üzerinde çözünürlük
Çalışma frekansı	50/100/200 Hz. (5mS)
Hafıza	2 Gb Dahili, (140 saat kayıt alabilme)

3.4. Yapı Titreşim Kayıtlarının Analizi

İvmeölçerler kullanarak yapıdan alınan kayıtların analiz edilmeden önce bir veri temizleme işlemine tabi tutulması gerekir. Yapılan bu işlem veri analizini kolaylaştırdığı gibi analiz sonuçlarındaki hata oranını da azaltır. Deprem veya çevrel titreşim kayıtları için veri temizleme süreci aşağıdaki adımlardan oluşur:

- Verilerin ortalama değerlerinin ve lineer hataların ayıklanması (base-line correction),
- Kayıtlarda gürültünün fazla olduğu çok düşük ve çok yüksek frekanslı kısımların filtrelenmesi,
- Yapıda mevcut en yüksek frekans değerleri göz önüne alınarak gerekirse kayıtlardaki örnekleme aralığının yükseltilmesi (decimation),
- Sensörlerden alınan kayıtlar senkronize değilse nümerik yöntemler kullanarak kayıtların senkronize edilmesi [16].

3.5. Yapı Dinamik Karakteristiklerinin Elde Edilmesi

Deneysel yolla yapı dinamik karakteristiklerinin tayini, giriş-çıkış kuvvetleri veya sadece çıkış kuvvetleri kullanılarak yapılmaktadır. Giriş ve çıkış kuvvetlerinin kullanıldığı Deneysel Modal Analiz Yöntemi'nde giriş kuvvetinin oluşturulması pahalı ve uğraştırıcıdır. Yöntemde yapısal hasar oluşma ihtimali de vardır. Sadece çıkış kuvvetlerinin kullanıldığı Operasyonel Modal Analiz yönteminde ise çıkış verisi toplama ucuz ve tahribatsızdır. Tez çalışmasında tercih edilen Operasyonel Modal Analiz yönteminde yapıların dinamik karakteristikleri frekans ve zaman tanım alanında algoritmalara sahip modal parametre tayini yöntemleri kullanılarak belirlenmektedir [72, 73].

Zaman tanım alanındaki yöntemler her bir noktada sinyalin zaman geçmişine veya korelasyon fonksiyonlarıyla model uydurma çalışmalarına dayanmaktadır. Frekans tanım alanındaki yöntemler ise, her bir noktada ölçülen sinyallerin analizine ve sinyaller arasındaki korelasyona dayanmaktadır. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi'nde, modal karakteristiklerin tayini için temel olarak üç farklı frekans tanım alanında yöntem geliştirilmiştir. Bunlar; Temel Frekans Yöntemi (TFY-Basic Frequency Domain Method) veya Zirve Seçimi Yöntemi (ZSY-Peak Picking Method), Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma Yöntemi (FTAA-Frequency Domain Decomposition Method) ve Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma Yöntemi'dir (Enhanced Frequency Domain Decomposition Method).

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen deneysel modal analiz çalışmalarında, yapıların dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde ARTEMIS® paket programında uygulanabilen ve literatürde sıklıkla tercih edilen yöntemlerden biri olan Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma (GFTAA, Enhanced Frequency Domain Decomposition) yöntemi kullanılmıştır [74].

3.5.1. Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma Yöntemi

Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (GFTAA, Enhanced Frequency Domain Decomposition) yöntemi Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (FTAA, Frequency Domain Decomposition) yönteminin geliştirilmiş halidir. Bu yöntemde her spektral yoğunluk matrisinin, tekil değer ayrışımı (TDA, Singular Value Decomposition) grafiğinde pik noktaların seçilmesi ile modlar belirlenmektedir. Bu ayrışımında sistem, her bir tekil değer için tek serbestlik dereceli olarak dikkate alınır. Frekans tanım alanında ayırıştırma yöntemi Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD, Fast Fourier Transform) analizinde tekil frekans çizgisinin (single frequency line) kullanılması esasına dayanmaktadır. Tahmin edilen doğal frekansların kesinliği HFD çözümlemesine bağlıdır ve modal sönüm hesaplanamaz. GFTAA yönteminde ise doğal frekanslar, mod şekilleri ve modal sönüm de belirlenebilmektedir.

GFTAA yönteminde, tek serbestlik dereceli (TSD) Güç Spektral Yoğunluk Fonksiyonu (GSYF, Power Spectral Density Function), rezonansın en yüksek değeri civarlarında belirlenen, Ters Ayrık Fourier Dönüşümü (TAFD, Inverse Discrete Fourier Transform) kullanılarak zaman tanım alanına geri dönüştürülür. Doğal frekans zaman fonksiyonunun sıfırdan geçiş sayısı ile sönüm ise tek serbestlik dereceli normalize otokorelasyon fonksiyonunun logaritmik azalımı ile elde edilir. Her iki parametre ve mod şekillerinin geliştirilmiş halleri TSD Gauss fonksiyonlarından elde edilir. TSD Gauss fonksiyonu, FTAA zirve seçimi (peak picking) ile belirlenen şekil kullanılarak tahmin edilir. Diğerleri ise Mod Gerçekleşme Kriterine (MGK, Modal Assurance Criteria) bağlı korelasyon analizinde referans vektör olarak kullanılır. Bir MGK değeri, her bir tekil frekans çizgisinin (frequency line) referans FTAA vektörü ile tekil vektörü arasında hesaplanır. Eğer bu vektörün değeri, kullanıcı tarafından belirlenen kabul edilebilir MGK değerinin üstünde ise ilgili tekil değerler TSD Gauss fonksiyonunun içinde yer alıyor demektir. Vektörün değeri kullanıcı tarafından belirlenen kabul edilebilir MGK değerinin altında ise TSD Gauss fonksiyonunun belirlenmesinde daha fazla sayıda tekil değer olacaktır [75,76].

Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma yönteminde ölçülmeyen etki (giriş) kuvveti $x(t)$ ve ölçülen tepki (çıkış) kuvveti $y(t)$ arasındaki bağıntı Denklem 3.1'deki gibidir;

$$[G_{yy}(j\omega)] = [H(j\omega)]^*[G_{xx}(j\omega)][H(j\omega)]^T \quad (3.1)$$

burada $[G_{xx}(j\omega)]$ etki sinyalinin Güç Spektral Yoğunluk (GSY) matrisi, $[G_{yy}(j\omega)]$ tepki sinyalinin GSY matrisi ve $[H(j\omega)]$ Frekans Davranış Fonksiyonu (FDF) matrisidir. Üst simge * ve T sırasıyla ifadelerin kompleks eşleniğini ve transpozmesini ifade etmektedir. FDF matrisi tipik kısmi kesir (klasik modal analizde kullanılan) formunda Denklem 3.2'deki gibi ifade edilir;

$$[H(j\omega)] = \frac{[Y(j\omega)]}{[X(j\omega)]} = \sum_{k=1}^m \frac{[R_k]}{j\omega - \lambda_k} + \frac{[R_k]^*}{j\omega - \lambda_k^*} \quad (3.2)$$

$$\lambda_k = -\sigma_k + j\omega_{dk} \quad (3.3)$$

burada m gözöüne alınan mod sayısı, λ_k , k 'inci modun kutbu, σ_k modal sönüm ve ω_{dk} k 'inci modun sönümlü doğal frekansı, R_k ise k 'inci modun artık değer fonksiyonunu ifade etmektedir. $[G_{xx}(j\omega)]$ matrisi için Denklem 3.1 ve polinomsal açılımlar için Heaviside kısmi kesir teoremi kullanılarak, etki kuvvetinin zaman ve mekanda tesadüfi, beyaz gürültü dağılım ortalamasının sıfır olduğu kabulü yapılarak $[G_{yy}(j\omega)]$ GSY matrisi için Denklem 3.4 elde edilir;

$$[G_{yy}(j\omega)] = \sum_{k=1}^m \frac{[A_k]}{j\omega - \lambda_k} + \frac{[A_k]^*}{j\omega - \lambda_k^*} + \frac{[B_k]}{-j\omega - \lambda_k} + \frac{[B_k]^*}{-j\omega - \lambda_k^*} \quad (3.4)$$

burada, $[A_k]$ tepki sinyalinin GSY fonksiyonuna ait k 'inci artık değer matrisini ifade etmektedir. FTAA yönteminde ilk adım GSY matrisinin belirlenmesidir.

Çıkış GSY matrisi $[G_{yy}(\omega)]$ 'nin tahmini $\omega = \omega_i$ ayırık frekanslarında matrisin tekil değer ayrışımı ile ayrıştırılmaktadır. Bu ifade göz önüne alınarak Denklem 3.5 aşağıdaki şekilde elde edilir;

$$[G_{yy}(j\omega_i)] = [U_i][S_i][U_i^H] \quad (3.5)$$

burada , $U_i = [u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{im}]$ matrisi u_{ij} tekil vektörlerinden oluşan birim matris, $[S_i]$, sayısal tekil değerleri, s_{ij} , içeren köşegen matrisi göstermektedir. GSY fonksiyonunda (Denklem 3.5) pik yapan noktalar doğal frekansları, bu noktaları oluşturan vektörler ise (u_{ij}) doğal mod şekillerini göstermektedir. GSY fonksiyonunda pik değer etrafında elde edilen TSD yoğunluk fonksiyonunun bir parçasından doğal frekans ve sönüm elde edilmektedir. Tek serbestlik dereceli GSY fonksiyonunun bir parçasının, Ters Hızlı Fourier Dönüşümü kullanılarak zaman tanım alanına geri alınması ile frekans ve sönüm tahmin edilmektedir.

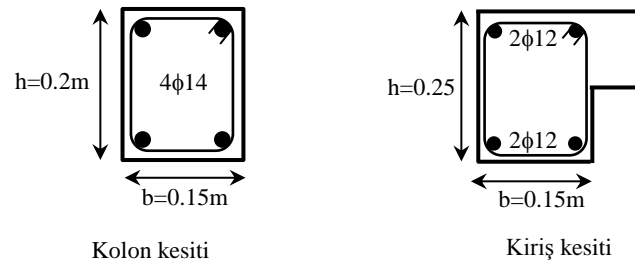
3.6. Test Binası Üzerinde Yapılan Örnek Çalışma

Bu başlıkta Üçüncü Bölüm'de açıklanan yöntemlerin sayısal uygulaması yapılmıştır. Bu amaçla Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü yanındaki boş arazide iki katlı kat yüksekliği 2m olan, X doğrultusunda 2m, Y doğrultusunda 1.5m çerçeve açıklığına sahip, döşeme kalınlığı 0.15m, beton sınıfı C30 ve çelik sınıfı S420 olan betonarme bir bina inşa edilmiştir. İncelenen binaya ait genel bilgiler Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2. Test binasına ait genel bilgiler

Özellik	Değer
Bina kat adedi	2
Kat yüksekliği	2.0 m
X yönündeki çerçeve	2.0 m
Y yönündeki çerçeve	1.5 m
Beton sınıfı	C30 Mpa
Çelik sınıfı	S420 Mpa
Kolonlar	0.15x0.20 m
Kirişler	0.15x0.25 m
Döşeme kalınlığı	0.15 m

Binanın kolonları $0.15 \times 0.20\text{m}$ ve kirişleri $0.15 \times 0.25\text{m}$ boyutlarına sahiptir. Kolon ve kiriş elemanların geometri ve donatı detayları ise Şekil 3. 3' te verilmiştir. Yapılan çalışmada binadan modal verinin toplanması, bu aşamada en uygun ivmeölçer konumlandırmasının belirlenmesi, çevrel titreşim kayıtlarının binadan alınması ve uygun şekilde analiz edilmesi inceleme adımlarıdır.



Şekil 3.3. Test binası kolon ve kiriş detayları

Kat yüksekliği 2m, X ve Y yönünde tek açıklığa sahip iki katlı betonarme karkas test binasının yapım aşamaları işçilik kaynaklı belirsizlikleri en aza indirmek amacıyla takip edilmiştir. Z2 zemin sınıfı üzerine, çift doğrultuda sürekli $0.50 \times 0.50\text{m}$ 'lik temel kirişi üzerine inşa edilen binanın inşa aşamaları Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Test binasının inşa aşamaları

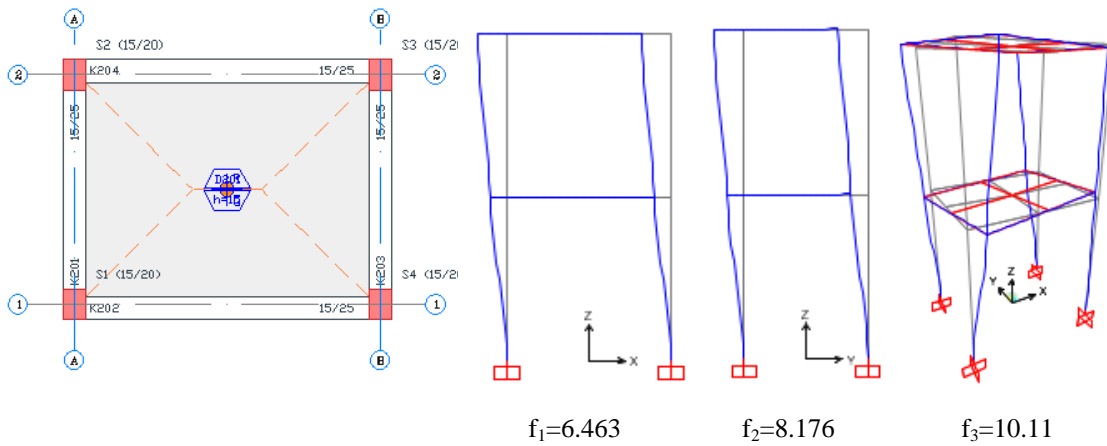
3.6.1. Test binası nümerik (sonlu eleman) modeli

Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü yanındaki boş arazide inşa edilen test binasının teorik yolla dinamik karakteristiklerini elde etmek amacıyla Sap2000 bilgisayar programı sürüm 15.1.0 kullanılarak binanın nümerik modeli oluşturulmuştur [77]. Modelleme aşamasında kolonların zemine ankastre bağlandığı ve döşemenin rijit diyafram şeklinde çalıştığı kabulü yapılmıştır. Oluşturulan SE modeli kullanılarak Sap 2000 programında yapılan modal analiz sonucunda ilk altı mod için elde edilen frekans değerleri ile X ve Y yönü ötelenme ve Z yönü dönme değerlerinin modal kütle katılım oranları değerleri Tablo 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3.3. Test binası Sap2000 modal analizi ile elde edilen frekans ve modal kütle katılım oranı

Mod	Sap2000 (Hz)	Modal Kütle Katılım Oranı (%)		
		UX	UY	RX
1	6.463	93.29	0.00	0.00
2	8.176	0.00	92.37	0.00
3	10.11	0.00	0.00	93.4
4	17.27	6.70	0.00	0.00
5	22.43	0.00	7.62	0.00
6	26.95	0.00	0.00	6.56

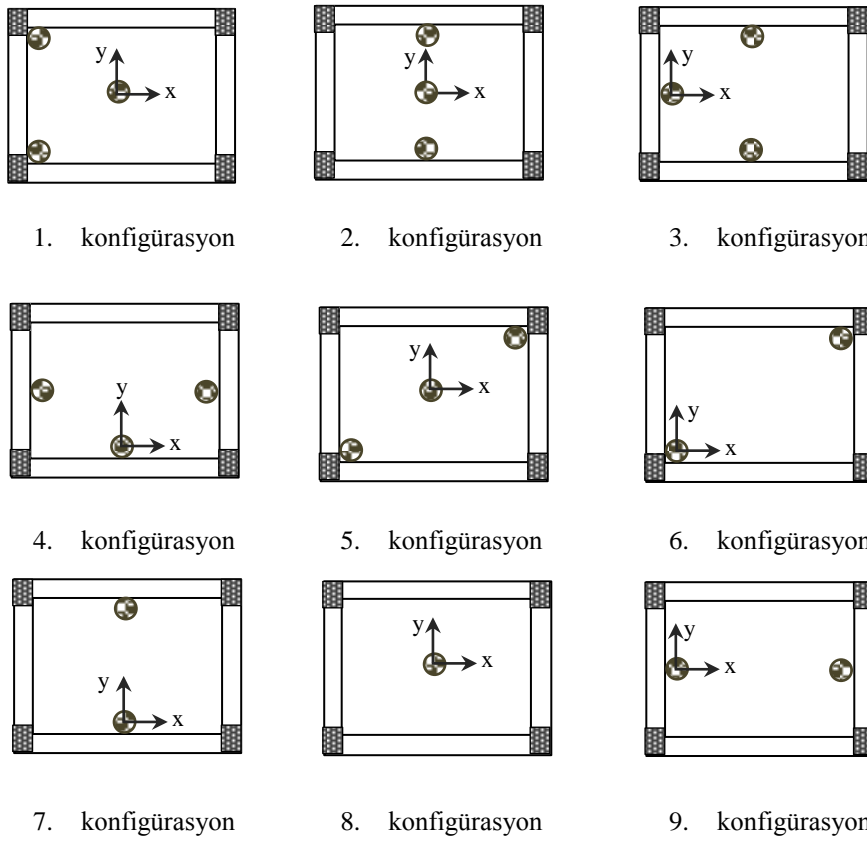
İnşa edilen binanın kalıp planı ve Sap2000 programından ilk üç mod için elde edilen frekans değerleri ve mod şekilleri Şekil 3.6'da verilmiştir. Binanın ilk modu X doğrultusunda ötelenme (6.463 Hz), ikinci modu Y doğrultusunda ötelenme (8.176 Hz), üçüncü modu ise burulma (10.11 Hz) olarak elde edilmiştir.



Şekil 3.5. Test binası kalıp planı ve ilk üç mod için mod şekilleri

3.6.2. Test binası modal veri toplama çalışması

Nümerik yolla dinamik karakteristiklerin belirlenmesinin ardından deneysel yolla dinamik karakteristikleri elde etme aşamasına geçilmiştir. Bu aşamada üç eksenli (x, y, z) ölçüm yapan DAC-3HDG serisi ivmeölçerler kullanılarak modal veri toplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Kullanılan ivmeölçerler ve veri toplama sistemi Tübitak 108M303 numaralı proje kapsamında kullanılmıştır. Binadan toplanan kayıtların binanın davranışını doğru şekilde yansıtması deneysel modal analizde önemli bir aşamayı teşkil etmektedir. Bu nedenle ivmeölçerlerin bina üzerindeki konumlandırılması doğru şekilde yapılmalıdır. Tez çalışması kapsamında ivmeölçerlerin bina üzerindeki en iyi konumlandırmasını belirlemek amacıyla altı adet ivmeölçer bina üzerine dokuz farklı konfigürasyonda yerleştirilmiştir. Konfigürasyonların oluşturulmasındaki temel amaç yapı dinamik karakteristiklerini en doğru şekilde elde edebilmektir. Her konfigürasyonda çevrel titreşim test ölçümlerini toplamak amacıyla bir ağ kurulmuş ve kayıtlar veri toplama sistemi kullanılarak alınmıştır. Veri toplama sisteminde yer alan sayısallaştırıcı (analog dijital çevirici) 32 bitlik çözünürlüğe sahip ve saniyede 50, 100, 200, 250, 400 örnek alabilme kapasitesine sahiptir. İvmeölçerlerin bina üzerindeki konfigürasyonları X ve Y yönündeki ötelenme modları ve burulma modlarını en iyi şekilde elde etmek amacıyla dokuz farklı konfigürasyonda bina üzerine yerleştirilmiş ve çevrel titreşim kayıtları alınmıştır. Oluşturulan tüm konfigürasyonlar için ivmeölçerlerin yerleşim ve yönelimleri Şekil 3.6'da gösterilmiştir. İvmeölçerler her iki katta da aynı noktalara yerleştirilmiştir.

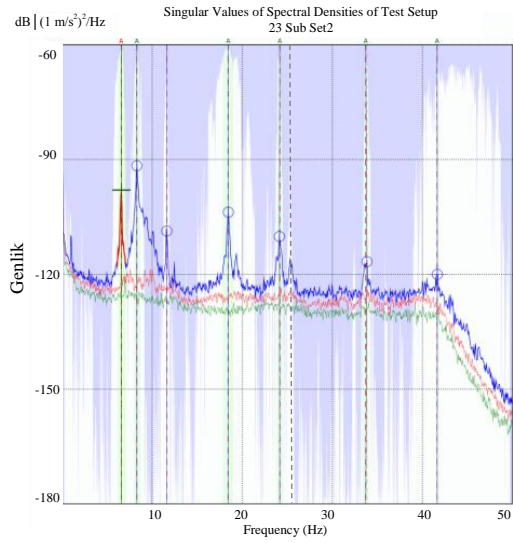


⊙: İvmeölçer gösterimi

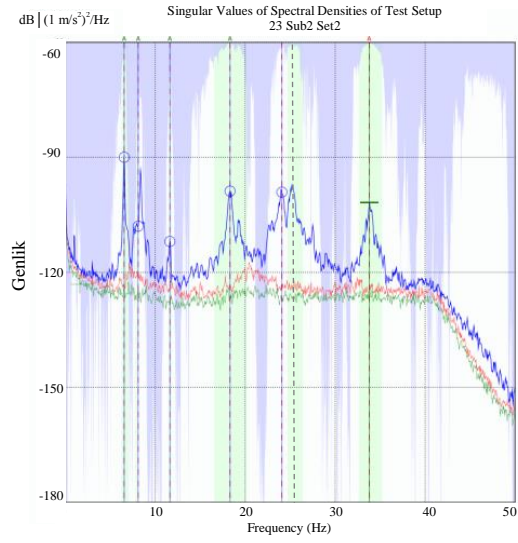
Şekil 3.6. İvmeölçerlerin her konfigürasyonda test binası üzerindeki yerleşimleri

3.6.3. Test binası modal veri analizi çalışması

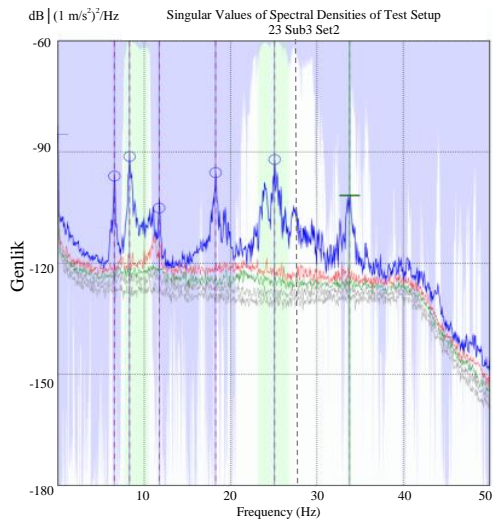
Her ivmeölçer konfigürasyonu için test binasından on dakika süre ile kayıt alınmıştır. Veri toplama sistemi yardımıyla ivme-zaman kayıtlarındaki anlık değişimler gerçek zamanlı olarak bilgisayarda izlenmiş ve veri tabanına kaydedilmiştir. Ölçümlerin alındığı zaman dilimde hava şartları 12° ile 15° arasında, kısmen güneşli ve rüzgarsızdır. Elde edilen on dakikalık kayıtlar beşer dakikalık iki sete bölünmüş ve temel çizgisi hatası (linear base-line correction), kayıtlarda gürültünün fazla olduğu çok düşük ve çok yüksek frekanslı kısımların filtrelenmesi (highpass filter 0.5 Hz ve lowpass filter 50 Hz) gibi bazı temel sinyal işleme tekniklerine tabi tutulmuştur. Filtrelenmiş kayıtlar Artemis programında [74] Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (GFTAA) yöntemi kullanılarak dokuz konfigürasyon için dinamik karakteristikler belirlenmiştir. Artemis programında her konfigürasyon için elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri (SYFTD) Şekil 3.7'de verilmiştir.



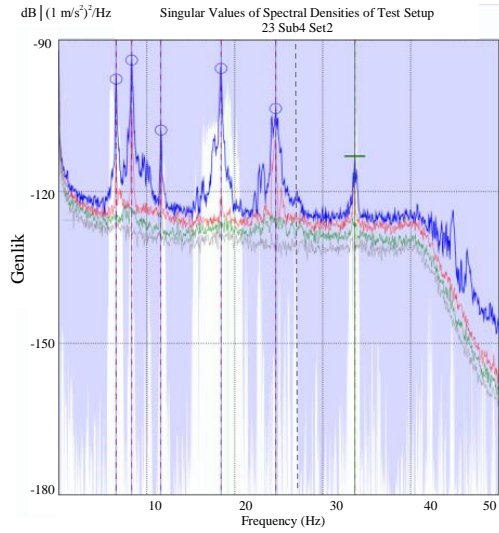
1. konfigürasyon



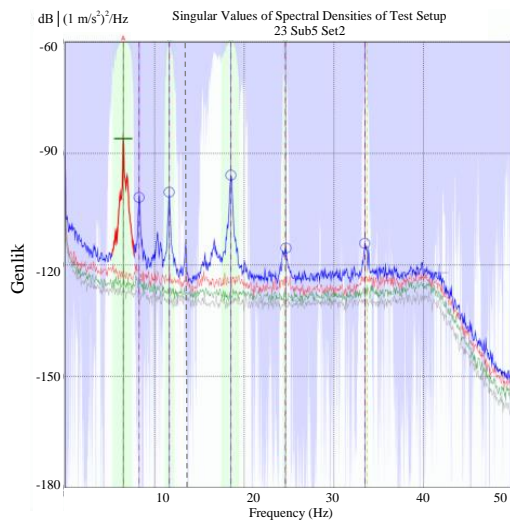
2. konfigürasyon



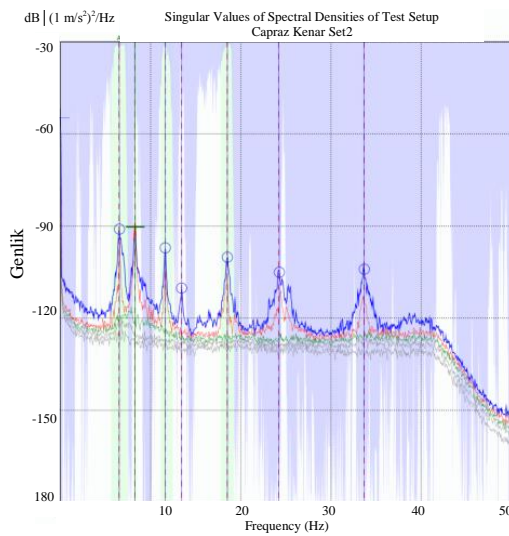
3. konfigürasyon



4. konfigürasyon

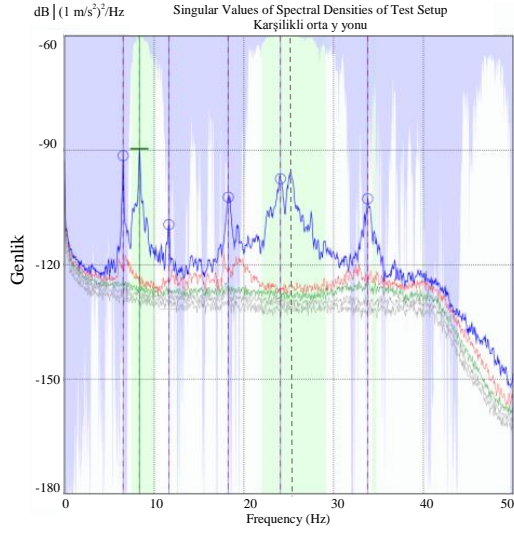


5. konfigürasyon

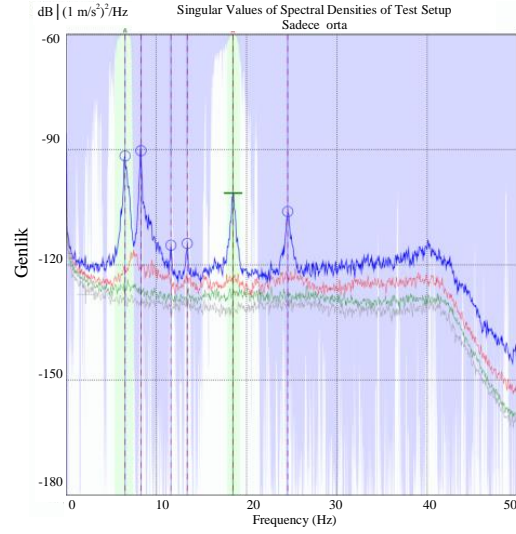


6. konfigürasyon

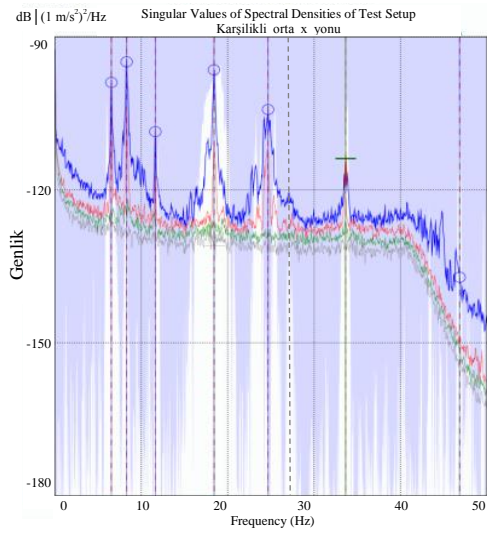
Şekil 3.7. Tüm konfigürasyonlardan elde edilen Spektral Yoğunluk Fonksiyonu Tekil Değerleri



7. konfigürasyon



8. konfigürasyon



9. konfigürasyon

Şekil 3.7. Tüm konfigürasyonlardan elde edilen Spektral Yoğunluk Fonksiyonu Tekil Değerleri (Devam)

Artemis programında elde edilen SYFTD'leri kullanılarak test binasının ilk altı doğal frekansı ve mod şekilleri belirlenmiştir. Binanın ilk altı modu için dokuz farklı konfigürasyon kullanılarak deneysel yolla elde edilen frekans değerleri Tablo 3.4'te verilmiştir.

Tablo 3.4. İlk altı mod için tüm konfigürasyonlardan elde edilen frekans değerleri

Mod	Konfig.1 (Hz)	Konfig.2 (Hz)	Konfig.3 (Hz)	Konfig.4 (Hz)	Konfig.5 (Hz)	Konfig.6 (Hz)	Konfig.7 (Hz)	Konfig.8 (Hz)	Konfig.9 (Hz)
1	6.570	6.540	6.556	6.570	6.494	6.505	6.543	6.543	6.543
2	8.296	8.105	8.277	8.296	8.252	8.269	8.349	8.300	8.300
3	11.62	11.62	11.62	11.62	11.62	11.62	11.62	11.62	11.62
4	18.45	18.31	18.29	18.45	13.43	13.43	18.26	13.43	18.40
5	24.17	24.07	24.41	24.17	18.50	18.49	24.07	18.50	24.65
6	26.09	26.19	26.23	26.08	24.56	24.21	26.19	26.56	26.27

Konfig.: konfigürasyon kelimesinin kısaltması

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde tüm deneysel frekans değerlerinin birbirine yakın olduğu belirlenmiştir. Sadece beş, altı ve sekizinci konfigürasyonda 13.43 Hz'de bir frekans değeri belirlenmiştir. Bu frekans değerinin ölçüm esnasında bir dış etkiden dolayı oluştuğu düşünülmektedir. Bu bölümde test binası üzerinden farklı konfigürasyonlar oluşturularak çevrel titreşim testi kayıtları toplanmış ve analiz edilmiştir. Dokuz konfigürasyondan en uygun olanına karar verebilmek amacıyla Dördüncü Bölüm'de nümerik modelin sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak en uygun ivme konumlandırılmasının hangisi olduğuna karar verilmiştir.

BÖLÜM 4. SONLU ELEMAN MODELİ GÜNCELLEME

4.1. Giriş

Yapı analizinde sonlu eleman modelleri 1970’li yıllardan beri kullanılmaktadır. Sonlu eleman modelleri tasarlanan yapıların davranışlarını tahmin etmede büyük kolaylık sağlamaktadır. Ancak sonlu eleman modellemesinde yapılan kabuller (malzeme davranışı ve etki eden yükler), modelleme hataları, yapının malzeme özelliklerindeki belirsizlikler, yapıda servis yükleri altında meydana gelen aşınmaların yıllar içinde birikmesi, mesnetlenme koşullarının tam olarak bilinmemesi, deprem ve patlama gibi ani etkilerle yapıda oluşabilen hasarların tam olarak bilinmemesi, analiz içindeki bilinmeyenler ve belirsizlikler (küçük hesaplama elemanı hataları, nümerik denklem çözüm yaklaşımlarının hataları, program kullanıcı hataları) sonlu eleman modelinin güvenilirliğini azaltmaktadır.

Modelleme sürecinde yapılan kabullerin veya belirsizliklerin giderilmesi için SE modelinde yapılan güncellemelerin (kalibrasyonların) nümerik sonuçları iyileştirdiği 1970’li yıllarda başlayan ve 1990’larda çok fazla kullanılan deneysel modal analiz çalışmaları ile ispatlanmıştır. Mevcut yapı ile SE modellerinin doğruluğunun sağlanması aşamasında kullanılan kalibrasyon yöntemi literatürde Sonlu Eleman Modeli Güncelleme Tekniği olarak bilinmektedir.

90’lı yıllarda başlayan deneysel model ile SE modellerinin benzeşim çalışmalarında model güncelleme teknolojileri standart birer araç olarak kullanılmış ve model tutarlılığının değerlendirilmesi ve artırılması için kullanılmıştır. SE modellerinin saha testleri ile kalibre edilmesi benzerlerinin yapılmasının yanı sıra tasarım ve imalatın gelişmesine katkı sağlamıştır. Kalibre edilmiş, gerçeğini önemli ölçüde yansıtan model, bilgisayar ortamında gerçek hayatta karşılaşılma ihtimali olan farklı yük şartlarını deneyebilme imkanı sağlamaktadır.

Sonlu Eleman Modeli Güncelleme Tekniği, deneysel verileri kullanarak, yapıların SE modellerinin doğrulanması sürecinde kullanılmaktadır. Bu yöntemde başlangıç SE modelinin bazı parametreleri, tahmin edilen dinamik özelliklerle referans özellikler (genellikle deneysel ölçüm verileri) arasındaki fark azalınca kadar değiştirilir [78].

Bu alanda Doebing vd. 1998 yılında yaptıkları hasar tanılama çalışması [79], Hearn ve Shim'in 1998 yılında yaptığı yapı sağlığı izleme çalışması [80], ve Hawk ve Small'ın 1998 yılında köprü işletme güvenliği alanında yaptıkları çalışma [81], model güncelleme tekniğinin son dönemlerde kullanılan uygulama alanlarına örnek teşkil etmektedir. Mevcut yapıların simülasyon ve test çalışmaları bazı belirsizlikler içermektedir, bu belirsizlikler beraberinde model güncelleme çalışmalarını getirmektedir, aşağıdaki başlıkta bu belirsizlikler detaylı olarak açıklanmıştır.

4.2. Simülasyon ve Test Çalışmalarındaki Belirsizlikler

Yapısal testler ve SE modelleme algoritmalarından (simülasyonlardan) elde edilen sonuçlar belirli bir tutarlılık göstermesine rağmen birçok belirsizlik içermektedir. Simülasyon çalışmalarındaki belirsizlikler temelde iki başlık altında incelenebilir. Bunlardan ilki modelimizde fizik yasalarıyla tarif etmediğimiz veya edemediğimiz hususlar, ikincisi ise nümerik algoritmalarda bilgimiz dışında olan tanımlanmamış veya yapılan basitleştirmeler sonucunda meydana gelen belirsizliklerdir. Fiziki simülasyon belirsizlikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- a. Başlangıç ve sınır şartları,
- b. Malzeme davranışı (elastisite modülü, plastik davranış parametreleri, kompleks malzeme davranışı, malzeme kusurları vs.),
- c. Geometri (kesitler, üretim, montaj, işçilik vs.),
- d. Yükler (deprem, rüzgar, ani yükler (çarpma, patlama vs.)),
- e. İklimsel ve ısısız değişimlerin etkileri (donma, rötne, sünme yorulma vs.),
- f. Kimyasal etkiler (kullanım amacına bağlı olarak endüstriyel yapılarda gözlenebilir) [82].

Sıralanan bu etkilerin bir veya birkaçının olması yapıda belirsizliklere neden olmaktadır. Nümerik simülasyon belirsizlikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- a. Teorik olarak matematik model yetersizlikleri (SE formülasyonu, sınırlı nümerik çözüm, fiziki davranışın SE matematiğinde tam tanımlanamaması vs.),
- b. Küçük hesaplama elemanı üretme hataları (SE hesap parçalarının (mesh) eleman tipi seçimi, eleman yoğunluğu vs.),
- c. Nümerik denklem çözümünde karşılaşılan hatalar (hesaplama platformuna bağlı olarak yakınsaklık problemleri, yuvarlamalar, fark toleransları vs.),
- d. İnsan hataları (yazılım ve programlama hataları, hatalı program girdileri, hatalı birim dönüşümleri vs.),
- e. Yetersiz yönetmelikler (bilgisayar programlarında kullanılan referans yönetmelik ve şartnamelerin basitleştirilmiş algoritmaları, ampirik kabuller vs.) [82].

Yukarıda sıralanan değişik ve farklı seviyelerdeki hata ve belirsizlik kaynaklarının toplam etkisi SE modelinin sonuçlarını tartışılır hale getirmektedir. SE modelinin tutarlılığının artırılması için mevcut yapı üzerinde ilave testlerin yapılması kaçınılmazdır. Yapı üzerinde yürütülen bu dinamik ve statik testler sınırlı imkanlarla ve sınırlı bilgi düzeyleri ile uygulanmakta ve birçok belirsizlik kaynağı içermektedir. Test çalışmalarındaki belirsizlikler aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- a. Test mantığına, dolayısı ile test düzeneğine bağlı hatalar (dinamik kuvvet, kuvvet cinsi, kuvvetin yapıya tespit yeri ve şartları, sensör yeri ve konumu vs.),
- b. Cihaz/cihaz ağı kapasitesi (cihaz kalibrasyon sorunları, sensör hassasiyeti, sensör tipi (ivme, hız, deplasman), veri kalitesi (sinyal-gürültü oranı) vs.),
- c. Veri kaydetme (kayıt örnekleme sayısı, kayıt cinsi, kayıt band genişliği, test adedi, kayıt süresi vs.),
- d. Sinyal işleme (tekrar sayısallaştırma, pencereleme, süzme),
- e. Sinyal analizi (yapı tanılama teknikleri, hasar tanılama teknikleri, OMA teknikleri, karakteristik dinamik parametre tahmini vs.).

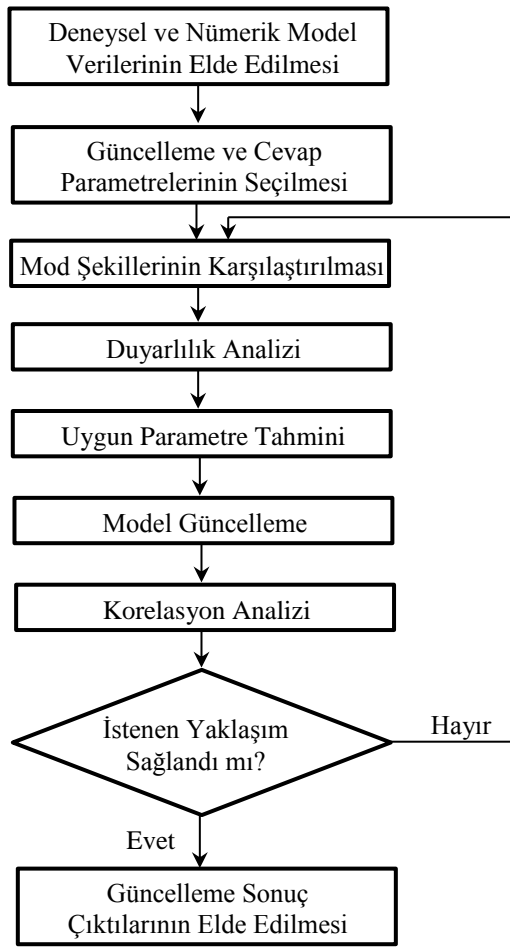
Test ve simülasyon çalışmaları aşamasında oluşan belirsizliklerin elverdiği ölçüde giderilmesinin ardından benzeşim çalışmalarına yönelik araştırmalar gerçekleştirilir.

4.3. Sonlu Eleman Modeli Güncelleme Aşamaları

Sonlu eleman modeli üzerinde model güncelleme çalışması gerçekleştirilmeden önce yapı hakkında bir takım bilgilere sahip olmak gerekir. Bunlardan ilki model güncelleme çalışmaları için referans alınacak verilerdir. Referans verileri genellikle gerçek yapı üzerinde yapılan deneysel çalışma ile ölçülmektedir. Bu veriler büyük çoğunlukla mevcut yapının gerçek dinamik karakteristikleri olup, güncellenmiş SE modelinin kabul edilebilir doğrulukta bu gerçek davranışı gösteriyor olması beklenir.

İkinci grupta ise modelin iyi bir şekilde anlaşılmasını sağlayan veriler yer almaktadır. Bu veri grubu yapı dinamik özelliklerinde çelişkiye neden olabilecek model bilgilerini kapsamaktadır. Malzeme özellikleri, tam bilinmeyen mesnetlenme şekilleri, yapı inşa aşamasında meydana gelebilecek işçilik hataları gibi bilgiler bu grupta yer almaktadır. Yapı hakkında elde edilecek bu bilgiler model güncelleme parametrelerinin seçimi ve model güncelleme ayarlarının hazırlanması açısından önem arz etmektedir.

Yapı testlerinde, incelenen yapı üzerinden kaydedilen serbest ve/veya zorlamalı titreşim verileri kullanılarak SE modelleri (nümerik modeller) uygun yöntemler yardımı ile kalibre edilmektedir. Sonlu Eleman Modeli Güncelleme Tekniği'nde, başlangıç SE modelinden elde edilen modal karakteristikler, deney sonuçlarından elde edilen modal karakteristiklere yakınsayınca kadar iteratif bir biçimde güncellenir. SE modeli güncellemesi kısıtlı bir optimizasyon problemidir ve tasarım değişkenleri güncelleme parametrelerinin çarpıldığı düzeltme katsayılarıdır. Optimizasyon probleminin amaç fonksiyonu sonlu eleman modelinden ve deneylerden elde edilen frekans ve mod şekillerinin farklarından oluşturulmaktadır. SE modeli güncelleme çalışmalarındaki gaye amaç fonksiyonu en aza indirmektir. Bu kapsamda, model güncelleme çalışmasında her iterasyonda düzeltme katsayılarında değişiklik yapılmaktadır [83]. Şekil 4. 1'de Sonlu Eleman Modeli Güncelleme Tekniği'nin işlem aşamaları şematik olarak verilmiştir.



Şekil 4.1. Sonlu eleman modeli güncelleme aşamaları

Model güncelleme işlem aşamalarını aşağıdaki şekilde özetlemek mümkündür;

- Başlangıç SE modelinin oluşturulması
- Yapı üzerinden ölçüm verilerinin alınması
- Yapı üzerinden kaydedilen ölçüm verisinin kararlaştırılması (veri yönetimi),
- Yapısal tepki kayıtlarının değerlendirilmesi (genel yapı davranışını yansıtmayan tepki kayıtlarının ayıklanması),
- Başlangıç SE modelinin doğrulanması ve korelasyonu
- Güncelleme parametresi seçimi
- Güncelleme için nümerik yöntem seçimi (seçilen yöntem güncellemeye etki edecek izlenen parametrenin hassasiyetini yansıtacak duyarlılık analizini ve parametrenin ihtimal olarak alabileceği daha iyi sonuç verecek yeni değeri tahmin edebilmelidir.).

4.4. Yapı Dinamik Karakteristiklerinin Karşılaştırılması

Deneysel modal analizin en önemli amacı yapının tahmin edilen davranışı ile gözlenen davranışının karşılaştırılmasıdır. Bu karşılaştırmada baz alınan, gözlenen davranışı yansıtan deneysel modal analiz sonuçlarıdır. Bu amaç göz önünde alınarak yapının dinamik davranışını en iyi yansıtan parametreler olan frekans ve mod şekillerinin karşılaştırılması için birçok kriter geliştirilmiştir. Bu kriterlerin çoğu mod şekillerinin karşılaştırılması için geliştirilmiştir.

4.4.1. Doğal frekansların karşılaştırılması

Deneysel ve nümerik analiz sonucunda elde edilen doğal frekansların karşılaştırılmasında deneysel sonuçlar temel alınmış ve aradaki fark Denklem 4.1 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\delta = \frac{f_d - f_a}{f_d} * 100 \quad (4.1)$$

burada δ , yüzde olarak frekanslar arasındaki farkı, f_d , deneysel olarak elde edilen frekans değerini, f_a ise nümerik model kullanılarak elde edilen frekans değerini göstermektedir [84].

4.4.2. Mod şekillerinin karşılaştırılması

Deneysel ve nümerik modal analiz çalışmalarının tarihsel gelişimi içinde ilk kullanılan uygunluk yöntemi yapının deneysel modal vektörü ile nümerik modal vektörün karşılaştırılması olmuştur. Literatürde mod gerçekleşme kriteri çerçevesinde iki vektör serisinin veya bileşenlerinin benzerliğini ve tutarlılığını lineer ilişkiyi kullanarak eşleştiren birçok kriter geliştirilmiştir. Bunlar aşağıdaki şekilde sıralanabilir;

- a. Mod Gerçekleşme Kriteri (Modal Assurance Criterion-MAC)
- b. Koordinat Tabanlı Mod Gerçekleşme Kriteri (Coordinate Modal Assurance Criterion-COMAC)
- c. Frekans Ölçekli Mod Gerçekleşme Kriteri (The Frequency Response Assurance Criterion-FRAC)
- d. Koordinat Ortogonalite Kontrolü (Coordinate Orthogonality Check-CORTHOG)
- e. Frekans Ölçekli Mod Gerçekleşme Kriteri (Frequency Scaled Modal Assurance Criterion-FMAC)
- f. Kısmi Modal Analiz Kriteri (Partial Modal Assurance Criterion-PMAC)
- g. Ölçeklendirilmiş Mod Gerçekleşme Kriteri (Scaled Modal Assurance Criterion-SMAC)
- h. Mütekel Vektör Kullanılarak Mod Gerçekleşme Kriteri (Modal Assurance Criterion Using Reciprocal Modal Vectors-MACRV) [85].

Yukarıda sıralanan kriterler arasından, literatürde de sıklıkla kullanılan, Mod Gerçekleşme Kriteri (MAC) tez çalışmasında mod şekillerinin karşılaştırılmasında tercih edilmiştir.

4.4.3. Mod gerçekleşme kriteri (MAC)

Mod gerçekleşme kriteri (MAC, Modal Assurance Criterion) mod şekil vektörleri arasındaki korelasyonun derecesini belirlemek için yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. MAC genellikle deneysel ve nümerik mod şekillerinin karşılaştırılmasında kullanılmaktadır. Uygulanması kolay ve sistem matrislerinin tahmin edilmesini gerektirmeyen bir karşılaştırma kriteridir. j. mod için deneysel mod vektörü, $\{\varphi_e\}_j$ ve i. mod için nümerik mod vektörü, $\{\varphi_a\}_i$, arasındaki MAC korelasyonu Denklem 4.2'deki gibi ifade edilir;

$$MAC_{jk} = \frac{|\{\varphi_a\}_i^T \{\varphi_e\}_j|^2}{(\{\varphi_a\}_i^T \{\varphi_a\}_i)(\{\varphi_e\}_j^T \{\varphi_e\}_j)} \quad (4.2)$$

MAC matrisi modların geçerliliğini veya ortogonalliğini değil, mod şekillerinin tutarlılığını göstermektedir. Mod şekillerinin korelasyonunda kullanılır. MAC değeri 0 ve 1 arasındadır. MAC değeri “1” ise mod şekillerinin birbiri ile tam uyumlu olduğu anlaşılmaktadır. MAC değeri “0” ise mod şekillerinin birbiri ile tutarlılık göstermediği anlaşılmaktadır. MAC değerinin 0.9’dan büyük olduğu durumlarda modların aynı olduğu 0.05’ten küçük olduğu durumlarda ise farklı olduğu kabul edilir [18].

4.5. Güncelleme Parametresi Seçimi

Model güncelleme çalışmalarında SE modelindeki her parametre güncelleme parametresi olarak aday gösterilebilir. Güncelleme parametresinin seçiminde birçok kriter göz önüne alınmalıdır. Parametre seçerken aşağıdaki soruların cevabı dikkate alınarak güncelleme için doğru parametre seçilmelidir [86].

- a. SE modeli ne amaçla yapılmıştır?
- b. SE modelinde hangi eleman tipleri kullanılmıştır ve sınır şartları nelerdir?
- c. SE modelindeki belirsizlikler nelerdir?
- d. Hangi parametreler güncellemede referans alınan cevaplara karşı duyarlıdır?

Bazı parametreler model güncelleme için diğerlerine göre daha etkindir. Güncelleme için az sayıda parametre kullanımı ve geniş hacimde ölçüm verisi kullanımı en uygun seçim olacaktır. Doğru güncelleme parametresi seçimi için birçok çalışma yapılmıştır [18,87–89]. Önerilen metotların çoğu duyarlılık analizi ve duyarlılık matrisi üzerinde yapılan bazı sayısal manipülasyonlara dayanmaktadır. Duyarlılık analizi, parametrelerdeki olası değişikliklerin optimal çözümü ve optimal amaç fonksiyonu değerini nasıl etkilediğinin incelenmesidir. Herhangi bir parametredeki değişimin optimal çözüme etkisi diğer tüm parametrelerin değerleri sabit tutularak incelenir [24, 26]. Güncelleme parametresi seçilirken dikkat edilmesi gereken en önemli husus güncelleme cevabının ne olduğudur. Seçilen güncelleme parametresi ile cevap parametresi arasındaki duyarlılık analizi sonucunda doğru güncelleme parametresine karar verilir.

Bir yapıda güncelleme parametresi olarak malzeme özellikleri (kütle yoğunluğu, elastisite değeri, poisson oranı), kesit özellikleri (kesit alanı, atalet momenti, kalınlıklar), sınır şartları (ankastre mesnet, sabit mesnet, yarı rijit (yaylı) birleşimler) güncelleme parametresi olarak kullanılabilir. Parametre seçiminin ardından her parametrenin değişim oranının belirlenmesi gerekmektedir. Bu aşamada mühendislik öngörülerini ön plana çıkarmaktadır. Seçilen parametrenin yapıda alabileceği makul değer aralığı değişim aralığı olarak belirlenmelidir. Seçilen parametreye bağlı olmakla beraber değişim oranı genel olarak %5-20 aralığında seçilmektedir [91,92]. Bu tez çalışmasında yapıda davranış ve dayanım olarak belirsizlik ihtimali yüksek olan, güncelleme sonucunu doğrudan etkileyen ve Lord vd.'nin [30] yaptıkları çalışma ile önemini vurguladığı kesit eğilme rijitliği güncelleme parametresi olarak seçilmiştir.

4.6. Güncelleme Cevabı Seçimi

Model güncellemede cevap parametresi (updating response) olarak genellikle deneysel analizden elde edilen sonuçlar seçilir. Daha genel olarak ise veri tabanına girilen herhangi bir değer hedef değer olarak kullanılabilir. Seçilen her cevap parametresi ilave kısıt denklemi (constraint equation) getirmektedir. Daha fazla kısıt ile özellikle birkaç güncelleme parametresi aynı anda kullanılıyorsa, güncellemede yeterli yaklaşımı elde etmek daha zor hale gelecektir. Ancak model güncelleme, aralarında iyi korelasyon olan yanıt parametrelerinin seçimi ile daha başarılı sonuçlar vermektedir. Bu tez çalışmasında Operasyonel Modal Analiz sonucunda elde edilen yapı dinamik karakteristikleri model güncelleme cevap parametresi olarak seçilmiştir.

4.7. Duyarlılık Tabanlı Model Güncelleme

Model güncelleme tekniğinde nümerik ve deneysel modal analiz sonuçları birbirine yakınsayınca kadar SE modelindeki kütle, rijitlik ve sönüm oranı parametreleri değiştirilir. Çeşitli yöntemler kullanarak model güncelleme çalışması yapmak mümkündür. Son yıllarda yapılan çalışmalarda model güncelleme için birçok yöntem geliştirilmiştir [93,94].

Model güncelleme yöntemleri temel olarak Direkt Yöntemler (genellikle iteratif olmayan) ve İteratif Yöntemler olarak ikiye ayrılabilir. Tez çalışmasında duyarlılık formülasyonu esasına dayanan iteratif model güncelleme tekniği kullanılmıştır. Duyarlılık Esaslı Model Güncelleme tekniğinde (Sensitivity Based Model Updating) esas amaç, seçilen parametreler için tanımlanan fonksiyonun (genellikle seçilen güncelleme parametrelerinin nonlineer fonksiyonu) minimize edilebilmesidir. Bu amaçla, cevap parametreleri ile güncelleme parametreleri arasındaki ilişki Taylor serileri açılımıyla ifade edilir. Taylor serisi açılımıyla elde edilen matris denklemini aşağıdaki şekildedir;

$$\{\Delta R\} = [S]\{\Delta P\} \quad (4.3)$$

buradaki duyarlılık matrisi $[S]$ ise Denklem 4.4 kullanılarak elde edilir;

$$[S] = S_{ij} = \frac{\partial R_i}{\partial R_j} \quad (4.4)$$

güncellenmiş parametre değerleri, P , ise Denklem 4.3 ve 4.4 kullanılarak elde edilir;

$$\{P\} = \{P^0\} + [G](\{R^e\} - \{R\}) \quad (4.5)$$

buradaki $[G]$ matrisi Bayesian kestirim teoremi kullanılarak elde edilir;

$$[G] = [C_R][G]^T ([C_P][S][C_R][S]^T)^{-1} \quad (4.6)$$

yukarıdaki, denklemlerde P^0 güncelleme parametrelerinin başlangıç değerini, $[C]$, P^0 değerlerindeki güvenilirliği ifade eden ağırlık matrislerini, R^e referans alınan deneysel veri sonuçlarını ifade etmektedir. Bu iterasyonlar hata fonksiyonları istenilen yakınsama kriterini sağlayana kadar devam eder [16,78].










4.8. Test Binası Üzerinde Yapılan Örnek Çalışma

Bu başlıkta Dördüncü Bölüm’de açıklanan yöntemlerin sayısal uygulaması yapılmıştır. Bu amaçla Üçüncü Bölüm’de örnek olarak incelenen test binasının deneysel ve nümerik yöntemlerle elde edilen yapı dinamik karakteristiklerinin karşılaştırılması ve en uygun ivmeölçer yerleşimine karar verilmesi, güncelleme parametresi ve güncelleme cevabı seçimi ve en son olarak sonlu eleman modeli güncelleme çalışmaları yapılmıştır.

4.8.1. Test binası frekans ve mod şekillerinin karşılaştırılması

Test binasının nümerik modellemesi sonucu elde edilen nümerik modal analiz sonuçları (Tablo 3.3) ile operasyonel modal analiz sonucu elde edilen doğal frekans ve mod şekilleri (Tablo 3.4) Femtools sonlu eleman modeli değerlendirme ve güncelleme programı sürüm 3.7 kullanılarak karşılaştırılmıştır [95]. Deneysel sonuçlar Üçüncü Bölüm’de Tablo 3.4’te verilmiştir. Karşılaştırma oluşturulan dokuz konfigürasyon (Şekil 3.6) için deneysel sonuçlar baz alınarak Denklem 4.1’de ifade edildiği şekilde yapılmıştır. Elde edilen hata oranları yüzde cinsinden ifade edilmiştir (Tablo 4.1).










Tablo 4.1. Deneysel ve nümerik modal analiz frekans değerleri karşılaştırması

Mod	Konfig.1 (%)	Konfig.2 (%)	Konfig.3 (%)	Konfig.4 (%)	Konfig.5 (%)	Konfig.6 (%)	Konfig.7 (%)	Konfig.8 (%)	Konfig.9 (%)
									
1	1.63	1.18	1.42	1.63	0.48	0.65	1.22	1.22	1.22
2	1.45	-0.88	1.22	1.45	0.92	1.12	2.07	1.49	1.49
3	12.9	12.9	12.9	12.9	12.9	12.9	12.9	12.9	12.9
4	6.40	5.68	5.58	6.40	-28.6	-28.6	5.42	-28.6	6.14
5	7.20	6.81	8.11	7.20	-21.2	-21.3	6.81	-21.2	9.01
6	-3.30	-2.90	-2.74	-3.34	-9.73	-11.32	-2.90	-1.47	-2.59

Konfig.: konfigürasyon kelimesinin kısaltması

Doğal frekansların karşılaştırılması ile hesaplanan hata oranları incelendiğinde beş, altı ve sekizinci konfigürasyonlar hariç bariz bir fark elde edilememiştir (max hata % 0.2). Hata oranları birbirine oldukça yakındır. Deneysel ve nümerik modelin mod şekillerinin karşılaştırılması aşamasında ise Denklem 4.2’de ifade edilen Mod Gerçekleşme Kriteri (MAC) değeri kullanılmıştır. Hesaplanan MAC değerleri yüzde cinsinden ifade edilmiştir (Tablo 4.2).

Tablo 4.2. Deneysel ve nümerik modal analiz mod şekillerinin karşılaştırması

Mod	MAC 1 (%)	MAC 2 (%)	MAC 3 (%)	MAC 4 (%)	MAC 5 (%)	MAC 6 (%)	MAC 7 (%)	MAC 8 (%)	MAC 9 (%)
									
1	91.0	99.5	99.8	68.6	99.4	38.3	99.8	99.1	99.8
2	89.9	99.0	99.7	76.9	99.4	43.2	0.70	99.2	99.9
3	2.2	1.7	-	0.1	60.8	75.3	100.0	82.7	98.6
4	95.0	99.5	99.8	21.6	99.7	66.3	99.7	99.8	99.9
5	93.3	99.7	96.5	42.4	99.4	45.1	0.10	99.4	99.7
6	4.1	0.4	0.20	0.3	1.9	86.1	100.0	35.0	97.6

MAC 1: birinci konfigürasyona ait MAC değeri

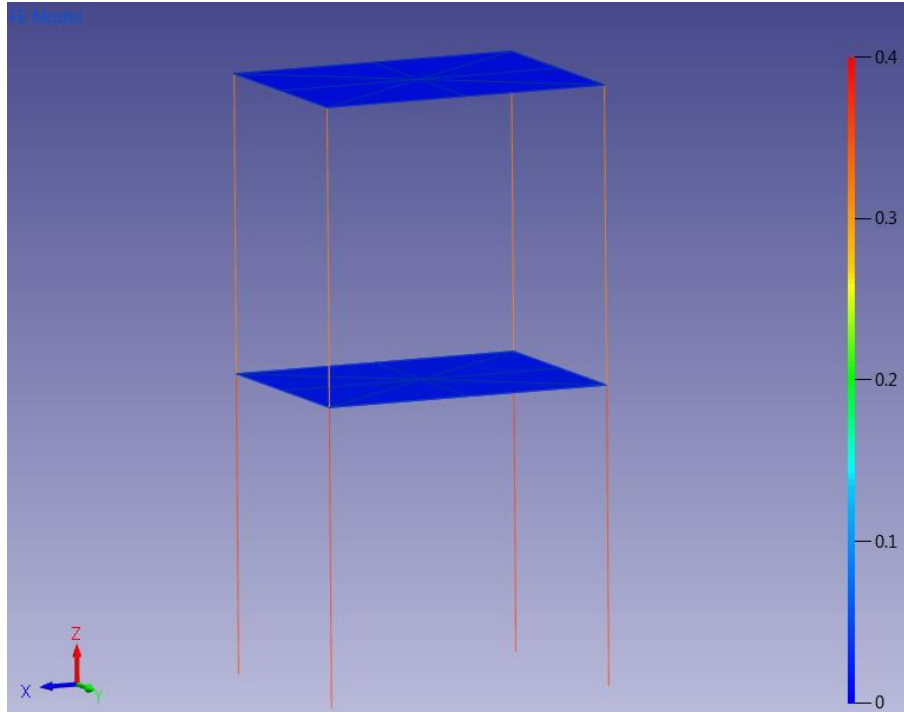
Tablo 4.2’deki MAC değerleri incelendiğinde birinci, ikinci ve üçüncü konfigürasyonda %90 ve üstü uyumla X ve Y yönü ötelenme modları, net olarak elde edilmiş fakat burulma modları elde edilememiştir. Dördüncü konfigürasyonda hiçbir modda tam uyum sağlanamamıştır en iyi uyum %77’lik oranla Y yönünde ötelenme modunda elde edilmiştir. Altıncı konfigürasyonda %75 ve %86’lık uyumla burulma modlarında başarı sağlanmıştır, ötelenme modlarında istenen başarı sağlanamamıştır. Yedinci konfigürasyonda X yönü ötelenme ve burulma modlarında %99’luk uyum sağlanmıştır. Y yönünde istenen uyum sağlanamamıştır. Sekizinci konfigürasyonda %83 ve daha yüksek uyumla ilk beş mod elde edilmiştir. Ancak altıncı modda istenen uyum sağlanamamıştır. Dokuzuncu konfigürasyonda ise tüm modlarda %97 ve üstü uyum sağlanmıştır. Bu sonuca dayanarak dokuzuncu konfigürasyondaki ivmeölçer yerleşiminin çevrel titreşim ölçümleri kullanılarak dinamik karakteristiklerin elde edilmesinde en uygun yerleşim şekli olduğuna karar verilmiştir.

4.8.2. Test binası model güncelleme çalışmaları

En uygun ivmeölçer yerleşiminin karar verilmesinin ardından dokuzuncu konfigürasyon için sonlu eleman modeli güncelleme çalışmaları yapılmıştır. Model güncelleme aşamasında ilk olarak güncelleme ve cevap parametresi belirlenmiştir. Güncelleme parametresi olarak davranışı tam olarak belirlenemeyen, binanın rijitliğini ve davranışını doğrudan etkileyen daha önce yapılmış çalışmalarda da yapı davranışı üzerindeki önemi vurgulanmış olan [30] kesit eğilme rijitliği seçilmiştir. Tüm yapısal elemanların eğilme rijitlikleri güncelleme parametresi olarak seçilmiştir.

Güncelleme cevabı olarak ise deneysel yolla elde edilen sonuç verileri yani frekans değerleri ve mod şekilleri seçilmiştir. Buradaki amaç seçilen güncelleme parametresi değiştikçe sistemin nasıl cevap vereceğini bulmak yani, yapısal elemanların eğilme rijitliği değiştikçe yapı dinamik karakteristikleri nasıl değişecek sorusunun cevabını bulmaktır. Bu değişimi kullanarak sonlu eleman modelinin gerçek modeli temsil etme oranı arttırılmaktadır.

Güncelleme parametrelerindeki değişimin cevap üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla normalize duyarlılık analizi yapılmıştır (Şekil 4.2). Duyarlılık analizi sonucunda elemanların eğilme rijitliğindeki %1'lik değişim binanın cevabını, yani yapı dinamik parametrelerini, % kaç değiştirir sorusunun cevabı bulunmuştur. Yapılan duyarlılık analizine göre ilk iki katın kolon elemanların eğilme rijitliğindeki %1'lik değişim model güncelleme üzerinde (cevap parametresinde) % 40'luk değişimle en fazla etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.

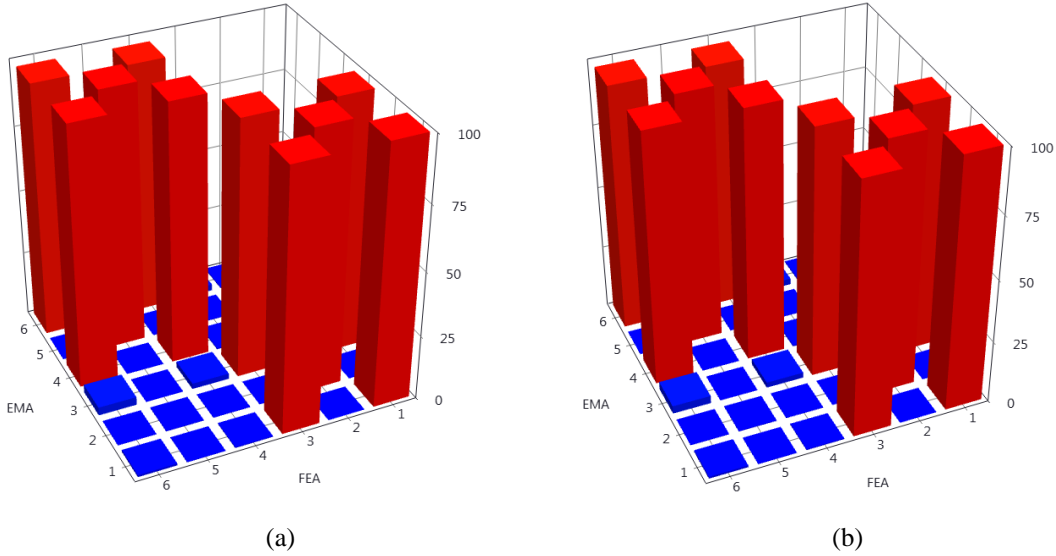


Şekil 4.2. Test binası yapı elemanlarının duyarlılık analizi

Yapısal elemanların eğilme rijitlikleri ve yapının cevabı arasındaki ilişki kullanılarak Femtools programında iteratif olarak 2 adımda binanın SE modeli güncellenmiştir. Güncelleme çalışması ile kesit eğilme rijitliklerinin %20 oranında artırılması ile frekans değerlerinde iyileşme yakalanmıştır. Mod şekillerinin korelasyonu değişmemiştir. Güncelleme sonucunda Sap2000 programından elde edilen binanın yeni frekans değerleri ve mod şekillerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması Tablo 4.3'te, model güncelleme öncesi ve sonrası elde edilen MAC matrisleri Şekil 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4.3. Dokuzuncu konfigürasyon kullanılarak elde edilen model güncelleme sonuçları

Mod	Sap2000 (Hz)	Deneysel (Hz)	Fark (%)	MAC (%)
1	6.545	6.543	-0.03	99.8
2	8.276	8.300	0.29	99.8
3	10.24	11.62	11.8	98.7
4	17.52	18.40	4.78	99.9
5	22.75	24.65	7.71	99.7
6	27.32	25.27	-8.11	97.6



EMA: Deneysel modal analiz, FEA: Sonlu eleman

Şekil 4.3. Test binası model güncelleme öncesinde (a) ve sonrasında (b) elde edilen MAC matrisleri

4.8.3. Test binasından elde edilen sonuçlar

Örnek çalışma olarak incelenen test binasının deneysel ve nümerik modal analiz yöntemleri kullanılarak yapı dinamik karakteristikleri belirlenmiştir. Deneysel yöntemde en uygun ivmeölçer konumlandırmasını belirlemek amacıyla dokuz farklı konfigürasyon denenmiştir (Şekil 3.6). Deneysel ve nümerik model sonuçları karşılaştırılarak en uygun ivmeölçer konumlandırması belirlenmiştir. Buna göre en uygun ivmeölçer konumlandırması çalışmada dokuzuncu konfigürasyon olarak adlandırılan binanın uzun doğrultusunda yerleştirilen iki adet ivmeölçerin olduğu konfigürasyondur. Dokuzuncu konfigürasyon ölçümleri kullanılarak binanın sonlu eleman modeli güncelleme çalışmaları yapılmıştır. Kesit eğilme rijitlikleri ve deneysel sonuçlar göz önüne alınarak yapılan model güncelleme sonucunda mod şekillerinde belirgin bir değişiklik elde edilememiştir ancak frekans değerlerinde bir iyileşme yakalanmıştır. Yapılan güncelleme kesitlerin eğilme rijitliğinin %4.5 oranla daha yüksek değerde olduğu sonucu elde edilmiştir. Test binasında yapılan örnek çalışmadan operasyonel modal analiz yöntemi ile yapı dinamik karakteristiklerinin gerçekçi olarak elde edilebildiği ve sonlu eleman modeli güncelleme tekniğinin nümerik modelleri iyileştirmek için kullanılabileceği sonuçları elde edilmiştir. Yapılan örnek çalışma Beşinci Bölüm'de yapılacak olan sayısal çalışmaların geçerliliğini doğrular niteliktedir.

BÖLÜM 5. SAYISAL ÇALIŞMALAR

5.1. Giriş

Test binası kullanılarak yapılan örnek çalışmanın ardından tez kapsamına alınan sekiz adet binanın inceleme çalışmaları yapılmıştır. İnceleme kapsamına alınan binalar 17 Ağustos 1999 Marmara depremini geçirmiş, depremden günümüze yapısal anlamda müdahale edilmemiş, mühendislik hizmeti almış, statik ve mimari proje paftaları bulunan beşi Gölcük, üçü Sakarya’da bulunan dördü karkas diğer dördü ise dolgu duvarlı binalardır (Şekil 5.1). Çalışmaya başlamadan önce kat maliklerinden, binaların projesine uygunluğunun belirlenmesi, hasar rölövesinin çıkarılması, malzeme dayanımlarının belirlenmesi, çevrel titreşim test ölçümlerinin alınması çalışmalarının yapılabilmesi için gerekli izinler alınmıştır.



(a)



(b)

Şekil 5.1. İncelenen binaların harita üzerindeki konumu [96]. a) Gölcük’teki binalar b) Sakarya’daki binalar

İlk olarak binalarda malzeme dayanımları, zemin sınıfları ve bina bilgi düzeylerinin belirlenmesi ile çalışmaya başlanmıştır. Bu çalışmaların akabinde, incelemeye alınan binaların sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. Bu aşamada, İnşaat Mühendisliği alanında sıklıkla kullanılan analiz programı Sap2000 kullanılmıştır.

Binaların sonlu eleman modelleri oluşturulurken özel durumlar haricinde zemin kat kolonlarının zemine ankastre mesnet ile mesnetlendiği kabul edilmiştir. Döşeme modellenmesinde ise aynı kattaki tüm döşemelerin rijit diyafram olarak çalıştığı kabulü yapılmıştır. Dolgu duvarlı binalarda duvarlar ince kabuk eleman (thin shell) olarak modellenmiştir.

Oluşturulan sonlu eleman modellerinin mevcut bina davranışı ile uyumunu arttırmak amacıyla Sonlu Eleman Modeli Güncelleme Tekniği kullanılmıştır. Model güncelleme çalışmasında çevrel titreşim ölçümleri kullanılarak elde edilen deneysel dinamik karakteristikler referans alınmıştır. Çevrel titreşim kayıtlarının binalardan toplanması aşamasında AREL elektronik [71] tarafından geliştirilen üç eksenli (x, y, z) ölçüm yapan DAC-3HDG serisi ivmeölçerler kullanılmıştır.

Tüm binalarda Bölüm 3 ve 4'te yapılan örnek çalışma sonucunda belirlenen en uygun ivme konumlandırması dikkate alınarak ivmeölçerler yapısal noktalar üstüne yerleştirilmiştir. Her bir ivmeölçerin kendi sayısallaştırıcısı, veri toplama modülü ve 140 saat kapasiteli flash hafızası olmasına rağmen veri alımı ve izlenmesi için kablosuz bir ağ kurulmuştur. İvmeölçerlerin zaman senkronizasyonu GPS kullanılarak yapılmıştır.

Binalardan 30 dakika boyunca çevrel titreşim kaydı alınmış ve elde edilen kayıt beşer dakikalık altı adet sete bölünmüştür. Her bir sete, ortalama değerlerin ve lineer hataların ayıklanması (base-line correction-lineer), gürültünün fazla olduğu çok düşük ve çok yüksek frekanslı kısımların filtre edilmesi (highpass 0.5 Hz, lowpass 50Hz) gibi bazı temel sinyal işleme teknikleri uygulanmıştır.

Filtrelenmiş kayıtlar ARTeMIS programına [74] aktarılmış ve binanın test modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan test modeli kullanılarak her bir set için Genişletilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (GFTAA) Yöntemi ile binanın dinamik karakteristikleri belirlenmiştir. Tüm setlerin dinamik karakteristik sonuçları incelenmiş ve çevresel etkilerin en az olduğu set yapı tanılama işleminde kullanılmıştır.

Yapı tanılama işlemi gerçekleştirilirken dikkate alınması gereken mod sayısına, binaların performans değerlendirilmesinde Türkiye Deprem Yönetmeliği 2007 Bölüm 7.6.5’de Artımsal Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi’nin kullanılabilmesi için verilen etkin kütle oranının en az %70 olması şartı göz önüne alınarak karar verilmiştir [53].

Deneysel yolla gerçek bina davranışının belirlenmesinin ardından binaların sonlu eleman modelleri uygun şekilde kalibre edilerek, deneysel ve analitik model davranışının örtüşmesi sağlanmıştır. Bu sayede sonlu eleman modelleri ile yapılacak olan nümerik analiz sonuçlarının gerçek davranışı yansıtma oranı artırılmıştır. Çalışmanın sonlu eleman modeli güncelleme aşamasında Femtools bilgisayar programı kullanılmıştır.

Model güncelleme çalışmasında ilk olarak güncelleme parametresi (updating parameter) ve güncelleme cevabı (updating response) belirlenmiştir. Güncelleme parametresi olarak davranışı tam olarak belirlenemeyen, binanın rijitliğini ve davranışını doğrudan etkileyen daha önce yapılmış çalışmalarda da yapı davranışı üzerindeki önemi vurgulanmış olan [30] kesit eğilme rijitlikleri seçilmiştir.

Tüm taşıyıcı sistem elemanlarının eğilme rijitlikleri güncelleme parametresi olarak seçilmiştir. Güncelleme cevabı olarak ise deneysel yolla elde edilen sonuç verileri yani frekans değerleri ve mod şekilleri seçilmiştir.

Model güncellemedeki amaç seçilen güncelleme parametresi değıştikçe sistemin nasıl cevap vereceğini bulmak yani, taşıyıcı sistem elemanlarının eğilme rijitlikleri değıştikçe yapı dinamik karakteristikleri nasıl değışecek sorusunun cevabını bulmaktır. Bu değışim kullanılarak sonlu eleman modelinin gerçek model ile uyumu artırılmaktadır.

Güncelleme parametrelerindeki değışimin cevap üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla tüm binalarda normalize duyarlılık analizi yapılmıştır. Duyarlılık analizi sonucunda elemanların eğilme rijitliğindeki %1'lik değışim binanın cevabını, yani yapı dinamik parametrelerini, % kaç değıştirir sorusunun cevabı bulunmuştur.

Güncelleme parametresi ve güncelleme cevabı arasındaki ilişki kullanılarak tüm binaların sonlu eleman modelleri iteratif olarak güncellenmiştir. Yukarıda sıralanan sonlu eleman modeli oluşturma, deneysel modal analiz ve model güncelleme aşamaları incelenen tüm binalara uygulanmış ve sonlu eleman modelleri mevcut binaları daha iyi temsil edecek şekilde güncellenmiştir.

Model güncelleme ile istenen benzeşimin sağlanmasının ardından Türkiye Deprem Yönetmeliği 2007'nin Yedinci Bölümü'nde verilen Doğrusal Elastik ve Doğrusal Elastik Olmayan performans değerlendirme yöntemleri kullanılarak binaların deprem performansları belirlenmiştir. Binaların performans değerlendirme aşamasında Probina Orion bilgisayar programı sürüm 2013 kullanılmıştır [97]. Elde edilen sonuçlar deprem sonrasında gözlenen bina performansları ile karşılaştırılarak Türkiye Deprem Yönetmeliği 2007'de önerilen performans değerlendirme yöntemlerinin gerçek sonuçlarla uyumu irdelenmiştir.

5.2. Ahmet Levent Sitesi A Blok Genel Bilgi

Çalışma kapsamında ilk olarak Kocaeli ili Gölcük ilçesi Halidere’de Karamürsel yolu üzerinde (enlem; 40°42'49.07"K ve boylam; 29°44'32.65"D) bulunan Ahmet Levent Sitesi A Blok incelenmiştir. Binanın harita üzerindeki konumu Şekil 5.2’de gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Ahmet Levent Sitesi A Blok harita üzerindeki konumu [96]

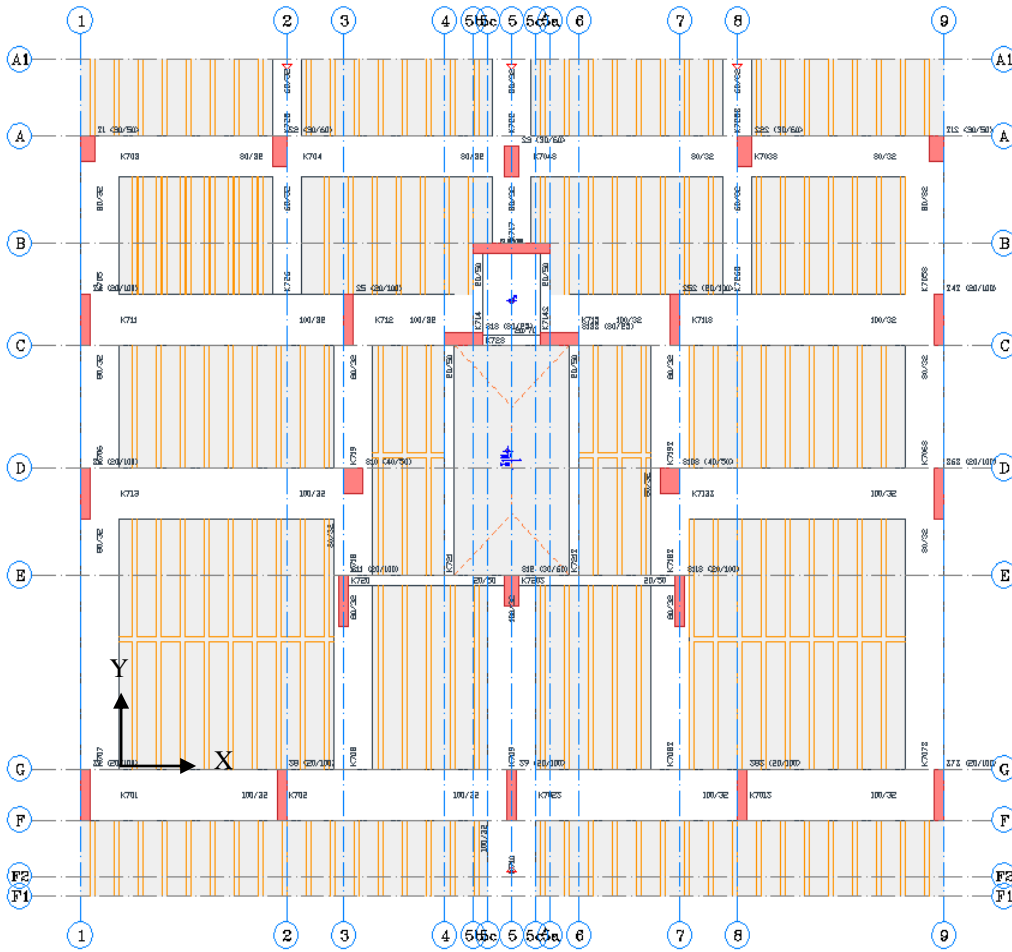
Üç blok olarak yapılması planlanan sitenin A bloğu betonarme karkas halde, zemin üstü 6 normal katı tamamlanmış 6’ncı katına duvarların örülmesi amacıyla tuğla malzemesi taşınmış, B bloğu zemin üstü 6 normal katı yapılmış tuğla duvarları örülmüş, C bloğu ise zemin kat döşemesi inşa edilmiş halde iken Marmara Depremi’ne yakalanmıştır (Şekil 5.3).



Şekil 5.3. Ahmet Levent Sitesi A Blok fotoğrafı (solda) [98]

Deprem sonrası binanın zemin katında bazı kolonların alt uçlarında mafsallaşma belirtileri mevcuttur. 160x20cm ebatındaki perdelerde çatlaklar meydana gelmiştir. Oluşan hasar durumu göz önüne alınarak binanın gözlenen deprem performansı Can Güvenliği (CG) olarak belirlenmiştir.

Binanın planda ve düşey doğrultuda herhangi bir düzensizliği bulunmamaktadır. Ahmet Levent Sitesi A Blok'ta asmolen döşeme sistemi kullanılmıştır. Binanın kolonları; 30x50 cm, 30x60 cm, 20x100 cm, perde 160x20 cm ve kirişleri ise 80x32 ve 100x32 cm boyutlarındadır (Şekil 5.4).



Şekil 5.4. Ahmet Levent Sitesi A Blok kalıp planı

Çalışmanın ilk aşamasında Ahmet Levent Sitesi A Blok'tan, Türkiye Deprem Yönetmeliği 2007 esaslarına göre, beton karot ve çelik numuneleri alınmış ve laboratuvarda test edilmiştir. Laboratuvar sonuçlarına göre malzeme dayanımları C20 ve S420'yi sağlamıştır. Zemin sınıfı Z1 olarak belirlenmiştir. [98].

5.2.1. Ahmet Levent Sitesi A Blok nümerik modeli

Binanın ilk olarak Sap2000 programı kullanılarak sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve nümerik yolla modal karakteristikleri belirlenmiştir. Sonlu eleman modeli oluşturulurken Bölüm 5.1.'de belirtilen genel kabullere ilave olarak zemin kat kolonlarının bazılarında hasar meydana geldiğinden dolayı, hasarlı kolonların zemine sabit mesnet ile mesnetlendiği kabulü yapılmıştır.

Oluşturulan SE modeli kullanılarak yapılan modal analiz sonucunda ilk dokuz mod için elde edilen frekans değerleri ile modal kütle katılım oranları (X ve Y yönü ötelenme ve Z yönü dönme) değerleri Tablo 5.1’de verilmiştir.

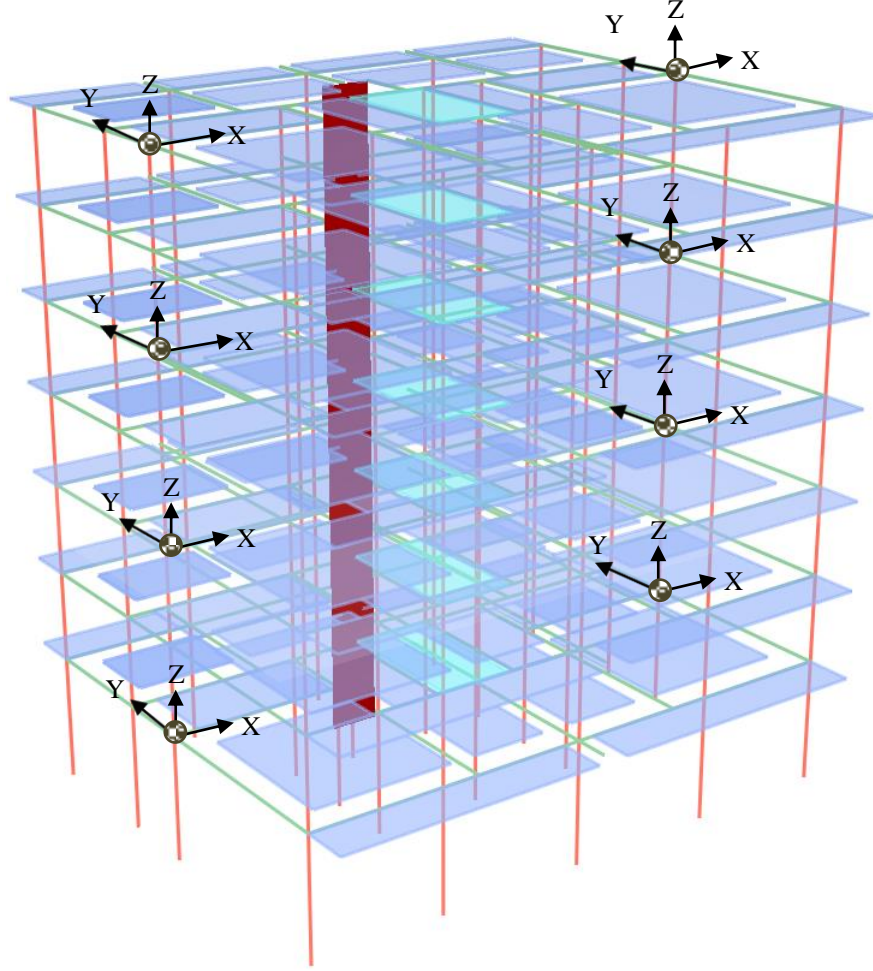
Tablo 5.1. Ahmet Levent sitesi Sap2000 modal analizi ile elde edilen frekans ve modal kütle katılımı oranı

Mod	Sap2000 Frekans (Hz)	Modal Kütle Katılım Oranı (%)		
		UX	UY	RZ
1	1.140	72.0	0.00	6.70
2	1.544	8.00	0.00	35.4
3	1.595	5.00	77.0	36.2
4	3.642	9.60	0.00	0.90
5	5.106	1.10	0.00	5.00
6	5.185	0.00	1.17	5.40
7	6.553	3.70	0.00	0.30
8	9.671	0.80	0.00	2.20
9	9.907	1.60	0.00	0.00

Nümerik modal analiz sonucunda elde edilen modal kütle katılım oranları değerlendirildiğinde ilk modun %72’lik kütle katılımı ile X yönünde öteleme, ikinci modun %35 kütle katılımı ile burulma, üçüncü modun ise %77’lik kütle katılımı ile Y yönünde öteleme modu olduğu sonucu elde edilmiştir.

5.2.2. Ahmet Levent Sitesi A Blok yapı tanılama çalışmaları

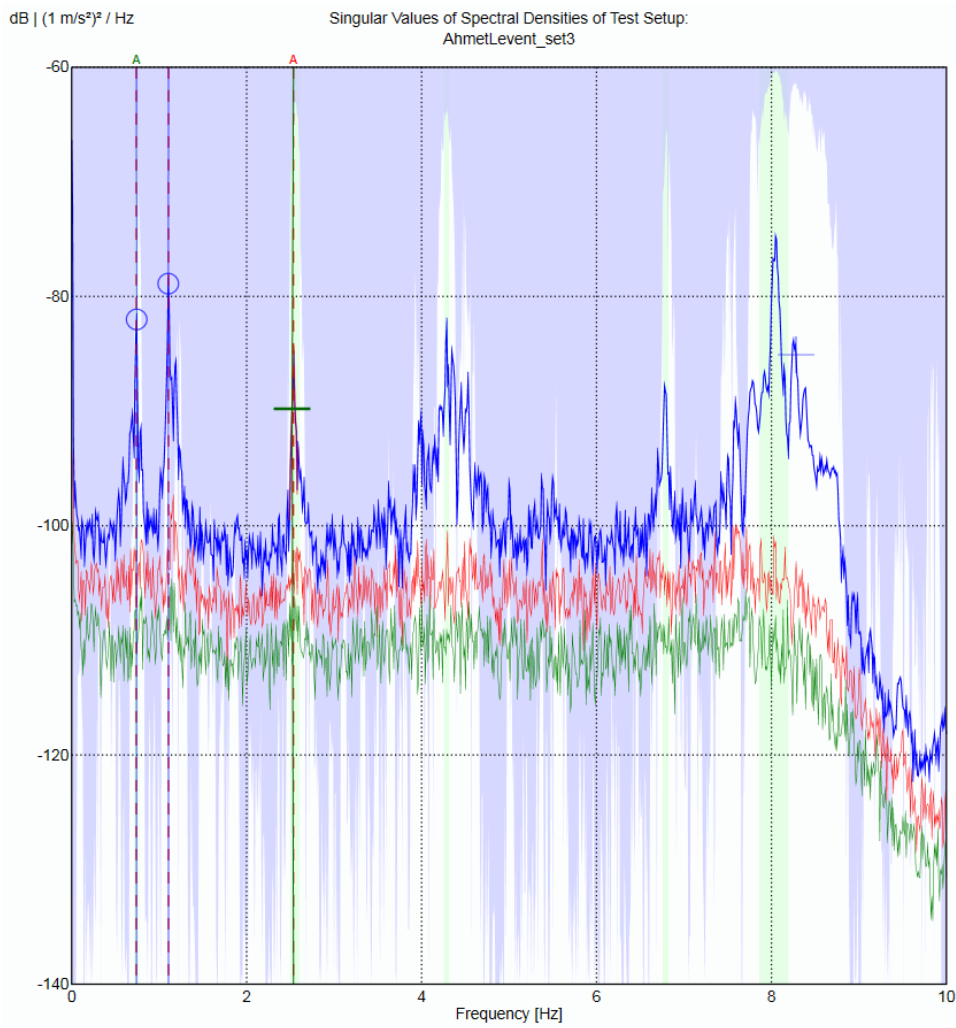
Nümerik yöntemle modal karakteristiklerin belirlenmesinin ardından deneysel yolla modal karakteristiklerin belirlenmesi işlemine geçilmiştir. İlk olarak binadan 30 dakika süre ile çevrel titreşim kaydı alınmıştır. Kayıt alırken ivmeölçerler binada uygun yapısal noktalar üstüne yerleştirilmiştir. Kullanılan ivmeölçerlerin binadaki yerleşim şekilleri ve yönelimleri üç boyutlu sonlu eleman yapı modeli üzerinde gösterilmiştir (Şekil 5.5).



Şekil 5.5. Ahmet Levent Sitesi A Blok ivme ölçüm cihazlarının konum ve yönelimlerinin üç boyutlu görünüşü

Binadan 30 dakika süre ile alınan çevrel titreşim kayıtları beşer dakikalık altı adet sete bölünmüştür. Her bir sete Bölüm 5.1.'de belirtilen sinyal işleme teknikleri uygulanmıştır. İşlenen kayıtlar ARTeMIS programına aktarılmış ve binanın test modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan test modeli kullanılarak her bir set için Genişletilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma (GFTAA) yöntemi ile binanın dinamik karakteristikleri belirlenmiştir. Tüm setlerin dinamik karakteristik sonuçları incelenmiş ve çevresel etkilerin en az olduğu set yapı tanılama işleminde kullanılmıştır. Yapı tanılama işlemi gerçekleştirilirken tüm binalarda Bölüm 5.1.'de belirtilen şart göz önüne alınarak X ve Y yönü için %70 kütle katılımı olan modlar dikkate alınmıştır.

Binanın X yönünde %72'lik modal kütle katılımı ile birinci modunu, Y yönünde ise %77'lik modal kütle katılımı ile üçüncü modunu incelemek yeterli görülmüştür (Tablo 5.1). Bu bilgi ışığı altında yapı tanılama işleminde binanın ilk üç modu belirlenmiştir. Ahmet Levent Sitesi A Blok'un ARTeMIS programında GFTAA yöntemi kullanılarak elde edilen Spektral Yoğunluk Fonksiyonu Tekil Değerleri (SYFTD) Şekil 5.6'da verilmiştir.



Şekil 5.6. Ahmet Levent Sitesi A Blok'a ait Spektral Yoğunluk Fonksiyonu Tekil Değerleri

Ahmet Levent Sitesi A Blok'un SYFTD kullanılarak elde edilen doğal frekans ve sönüm oranı değerleri ise Tablo 5.2'de verilmiştir. Dikkate alınan ilk üç mod için deneysel frekans değerleri incelendiğinde, nümerik model sonucu elde edilen değerlerden daha düşük olduğu belirlenmiştir. Yani sonlu eleman modeli gerçek modele oranla daha rijit bir davranış sergilemektedir.

Tablo 5.2. Ahmet Levent Sitesi A Blok deneysel yolla elde edilen frekans ve sönüm oranı değerleri

Mod	Deneysel Frekans (Hz)	Sönüm Oranı (%)
1	0.735	0.713
2	1.192	0.809
3	2.545	0.716

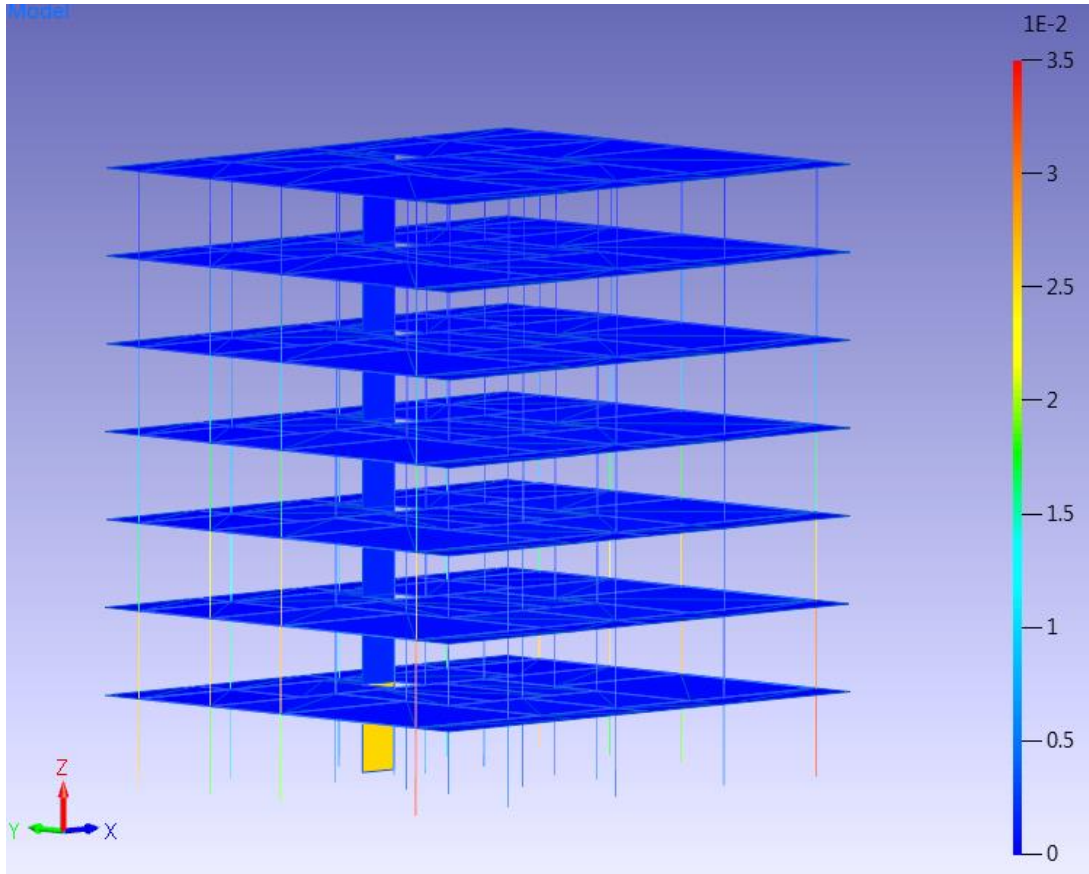
Deneysel yolla modal karakteristiklerin belirlenmesinin ardından deneysel ve nümerik model arasındaki farkı belirlemek için frekans ve mod şekilleri karşılaştırılmıştır. İki frekans değeri arasındaki fark deneysel sonuç dikkate alınarak % cinsinden (Denklem 4.1), mod şekilleri arasındaki korelasyon ise mod gerçekleşme kriteri (MAC) kullanılarak % cinsinden belirlenmiştir (Denklem 4.2). Ahmet Levent Sitesi A Blok'un ilk 3 mod için Femtools programı kullanılarak elde edilen deneysel ve nümerik analiz sonuçlarının karşılaştırılması Tablo 5.3'te verilmiştir.

Tablo 5.3. Ahmet Levent Sitesi A Blok deneysel ve nümerik sonuçların karşılaştırılması

Mod	Sap2000 (Hz)	Deneysel (Hz)	Fark (%)	MAC (%)
1	1.140	0.735	-55.10	92.7
2	1.544	2.545	39.34	1.20
3	1.595	1.192	-33.83	98.9

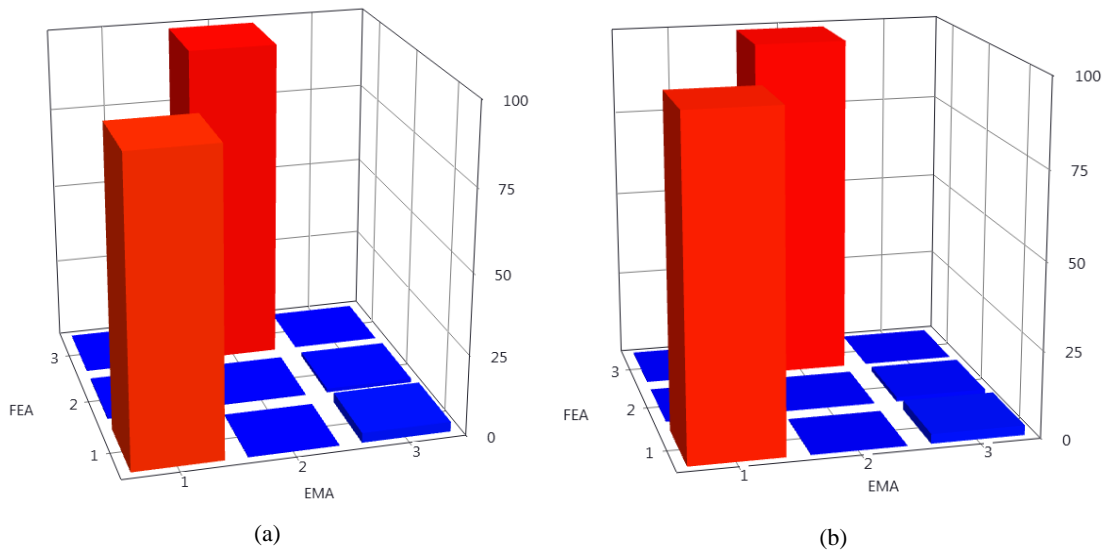
5.2.3. Ahmet Levent Sitesi A Blok model güncelleme çalışması

Binanın frekans ve mod şekillerinin karşılaştırılmasının ardından SE modelinin deneysel sonuçlara göre iyileştirilmesi yani model güncelleme çalışmalarına başlanmıştır. Tüm yapısal elemanların eğilme rijitlikleri güncelleme parametresi olarak seçilmiştir. Güncelleme cevabı olarak ise deneysel yolla elde edilen sonuç verileri yani frekans değerleri ve mod şekilleri seçilmiştir. Güncelleme parametrelerindeki değişimin cevap üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla normalize duyarlılık analizi yapılmıştır (Şekil 5.7). Yapılan duyarlılık analizine göre ilk üç katın kolon elemanları ve perde elemanın eğilme rijitliğindeki %1'lik değişim model güncelleme üzerinde (cevap parametresinde) % 3.5'lik değer ile en fazla etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.7. Ahmet Levent Sitesi A Blok yapı elemanlarının duyarlılık analizi

Binanın sonlu eleman modeli, yapısal elemanların eğilme rijitlikleri ile binanın modal karakteristikleri arasındaki ilişki kullanılarak Femtools programında iteratif olarak güncellenmiştir. Güncelleme öncesi ve sonrası elde edilen MAC matrisleri Şekil 5.8’de, güncelleme sonucunda Sap2000 programından elde edilen binanın yeni frekans değerleri ve mod şekillerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması Tablo 5. 4’te verilmiştir.



EMA: Deneysel modal analiz, FEA: Sonlu eleman analizi

Şekil 5.8. Ahmet Levent sitesi model güncelleme öncesinde (a) ve sonrasında (b) elde edilen MAC matrisleri

Tablo 5. 4. Ahmet Levent Sitesi A Blok güncelleme sonrası elde edilen frekanslar

Mod	Sap2000 (Hz)	Deneysel (Hz)	Fark (%)	MAC (%)
1	1.106	0.735	-50.48	95.1
2	1.607	2.545	-34.82	1.30
3	1.601	1.192	37.09	98.9

Güncelleme çalışması ile kesit eğilme rijitliklerinin %22.5 oranında azaltılması ile frekans değerlerinde ve birinci mod şeklinde bir iyileşme yakalanmıştır. Eğilme rijitliğindeki azalmanın, sonlu eleman modelinde doğru bir şekilde tanımlanamayan zemin katta bazı kolonların alt ucunda meydana gelen hasardan ve gözle görülemeyen kesit rijitliği azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bundan sonraki aşamada %70 kütle katılımı sağlayan X ve Y yönündeki modlarla uyumlu performans analizi gerçekleştirilecektir (Tablo 5.1).

5.3. Aydın Bak Sitesi 2. Blok Genel Bilgi

Kocaeli ili Gölcük ilçesi Halidere'de (enlem; 40°42'45.39"K, boylam; 29°44'17.14"D) bulunan Aydın Bak Blokları Ahmet Levent Sitesine yakın mesafede bulunmaktadır. Binanın harita üzerindeki konumu Şekil 5.9'da gösterilmiştir. Zemin+5 normal katlı olarak projelendirilen ve toplam yedi bloktan oluşan Aydın Bak Bloklarından biri temel seviyesinde, biri tek katlı karkas, bir diğeri zemin+1 normal kat karkas, üç blok zemin+5 normal kat karkas ve bir blok zemin+4 normal kat karkas olarak Marmara depremine yakalanmıştır. Siteye depremden günümüze kadar yapısal anlamda hiçbir şekilde müdahale edilmemiştir.



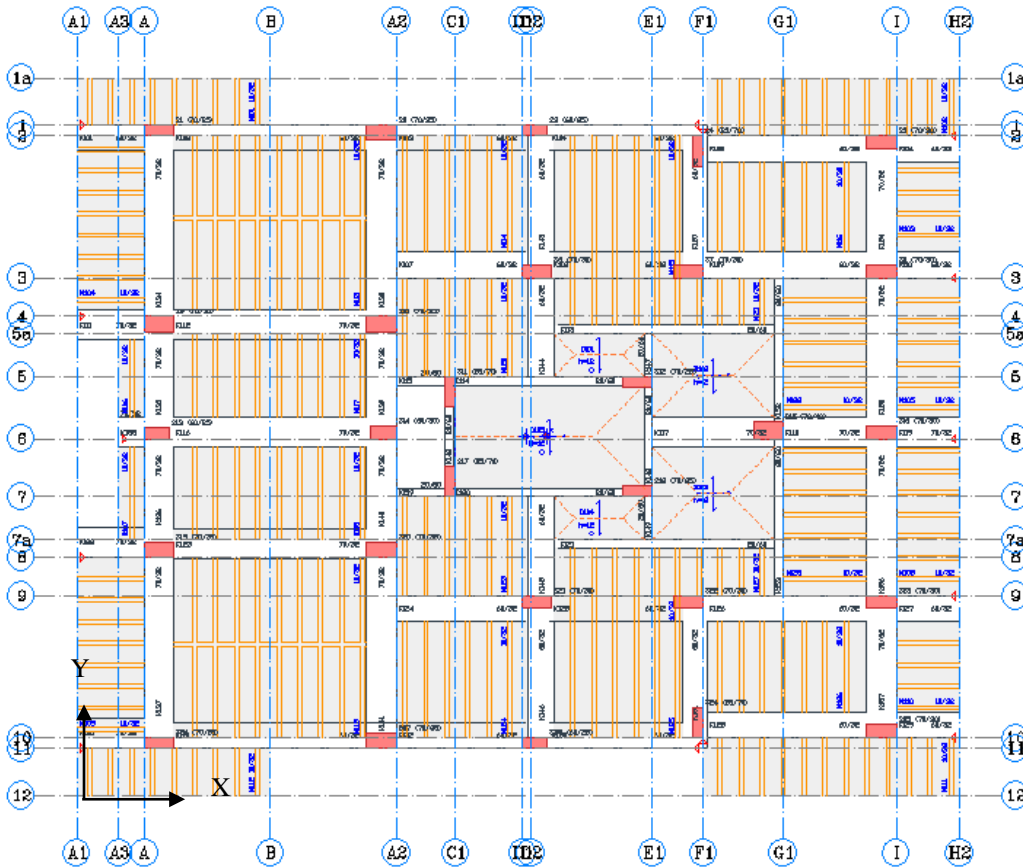
Şekil 5.9. Aydın Bak Sitesi 2. Blok harita üzerindeki konumu [96]

Deprem etkisiyle 6 ve 5 katlı bloklarda tüm zemin kat kolonlarının sadece alt uçlarında mafsal oluşması suretiyle hasar oluşmuştur. Binalarda buna ilave olarak döşeme hasarlarına ve merdiven hasarlarına rastlanmıştır Oluşan hasar durumu göz önüne alınarak binanın gözlenen deprem performansı Can Güvenliği (CG) olarak belirlenmiştir. Tez çalışması kapsamında Aydın Bak Sitesi 2. Blok (5 katlı karkas blok) incelenmiştir (Şekil 5.10).



Şekil 5.10. Aydın Bak Sitesi 2. Blok'un fotoğrafı [98]

Aydın Bak Sitesi 2. Blok 1975 Deprem Yönetmeliği çerçevesinde projelendirilmiştir. Tüm bloklarda döşemeler asmolen döşeme sistemi olarak uygulanmıştır. Binanın kolonları; 70x35 cm, 70x30 cm ve 60x25cm, kirişleri ise 70x32 cm, 60x32 cm ve 20x60 cm boyutlarındadır. Aydın Bak Sitesi 2. Blok 'tan, Türkiye Deprem Yönetmeliği 2007 esaslarına göre, beton karot ve çelik numuneleri alınmış ve laboratuvarında test edilmiştir. Laboratuvar sonuçlarına göre malzeme dayanımları C20 ve S420'yi sağlamıştır. Zemin sınıfı Z1 olarak belirlenmiştir [98].



Şekil 5.11. Aydın Bak Sitesi 2. Blok'un kalıp planı

5.3.1. Aydın Bak Sitesi 2. Blok nümerik modeli

Binanın ilk olarak Sap2000 programı kullanılarak sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve nümerik yolla modal karakteristikleri belirlenmiştir. Sonlu eleman modeli oluşturulurken Bölüm 5.1.'de belirtilen genel kabullere ilave olarak zemin kat kolonlarının hepsinde hasar meydana geldiğinden dolayı, tüm zemin kat kolonlarının zemine sabit mesnet ile mesnetlendiği kabulü yapılmıştır. Oluşturulan SE modeli kullanılarak Sap 2000 programında yapılan modal analiz sonucunda ilk dokuz mod için elde edilen frekans değerleri ile modal kütle katılım oranları değerleri (X ve Y yönü ötelenme ve Z yönü dönme) Tablo 5.5'te verilmiştir.

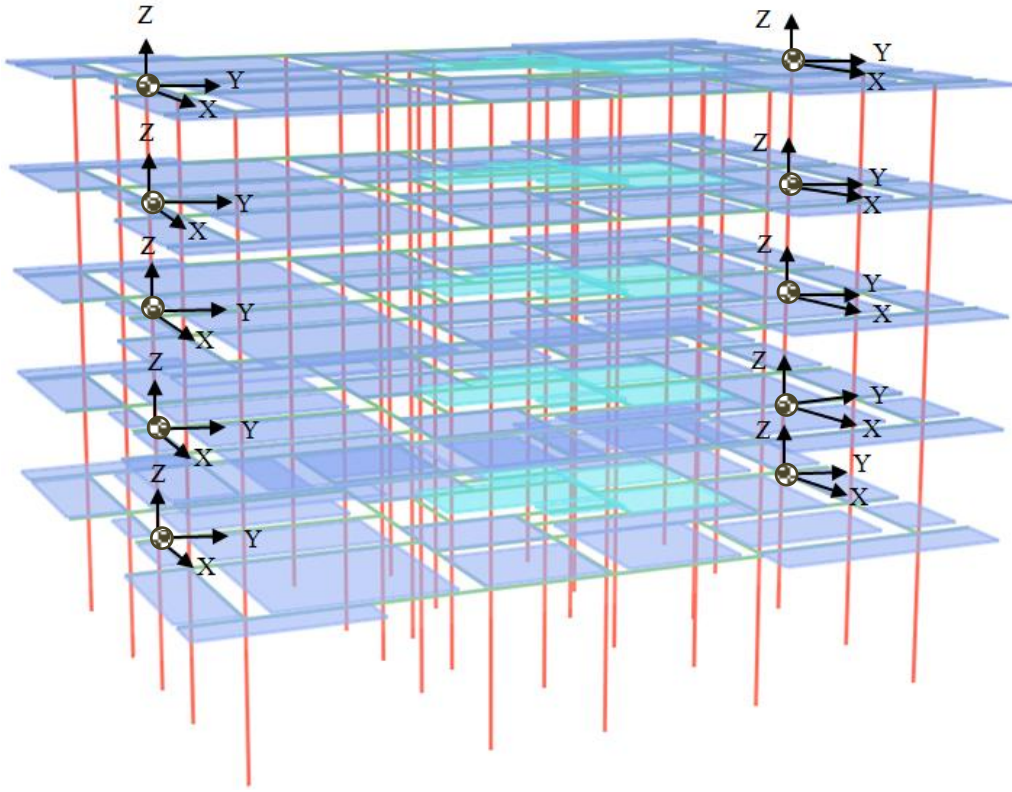
Tablo 5.5. Aydın Bak Sitesi 2. Blok Sap2000 modal analizi ile elde edilen frekans ve modal kütle katılımı oranı

Mod	Sap2000 Frekans (Hz)	Modal Kütle Katılım Oranı (%)		
		UX	UY	RZ
1	1.514	0.00	81.6	0.78
2	1.554	0.00	12.7	69.8
3	1.850	91.6	0.00	22.9
4	4.990	0.00	4.20	1.03
5	5.091	0.00	0.30	2.45
6	6.028	6.10	0.00	1.50
7	8.429	0.00	20.4	0.00
8	8.683	0.00	3.20	15.6
9	8.684	4.50	0.00	2.30

Nümerik modal analiz sonucunda elde edilen modal kütle katılım oranları değerlendirildiğinde ilk modun %81.6'lık kütle katılımı ile Y yönünde öteleme, ikinci modun %69.8'lik kütle katılımı değeri ile burulma, üçüncü modun ise %91.6'lık kütle katılımı ile X yönünde öteleme modu olduğu sonucu elde edilmiştir.

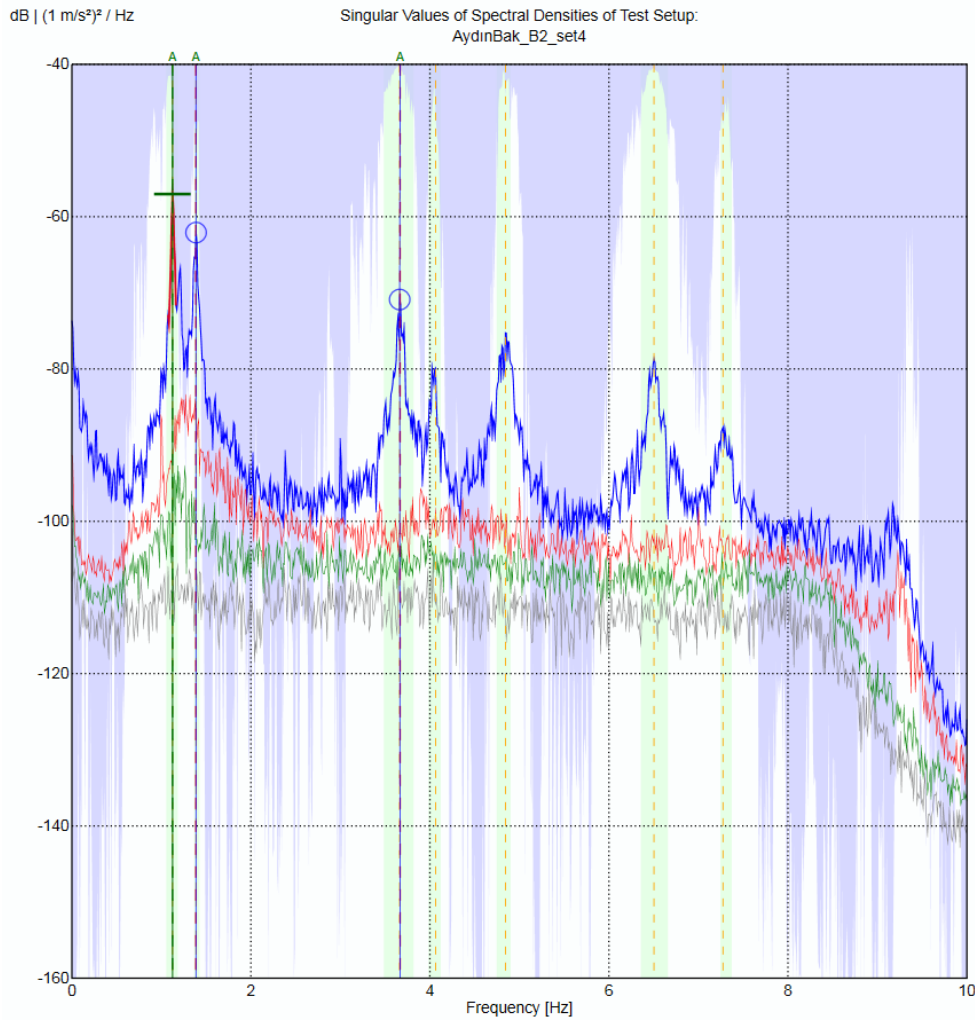
5.3.2. Aydın Bak Sitesi 2. Blok yapı tanılama çalışmaları

Nümerik yöntemle modal karakteristiklerin belirlenmesinin ardından deneysel yolla modal karakteristiklerin belirlenmesi işlemine geçilmiştir. İlk olarak binadan 30 dakika süre ile çevrel titreşim kaydı alınmıştır. Kayıt alırken ivmeölçerler binada uygun yapısal noktalar üstüne yerleştirilmiştir. Kullanılan ivmeölçerlerin binadaki yerleşim şekilleri ve yönelimleri üç boyutlu sonlu eleman yapı modeli üzerinde Şekil 5.12'de gösterilmiştir.



Şekil 5.12. Aydın Bak Sitesi 2.blok ivme ölçüm cihazlarının konum ve yönelimlerinin üç boyutlu görünüşü

Binadan 30 dakika süre ile alınan çevrel titreşim kayıtları beşer dakikalık altı adet sete bölünmüştür. Her bir sete Bölüm 5.1.'de belirtilen sinyal işleme teknikleri uygulanmıştır. İşlenen kayıtlar ARTEMIS programına aktarılmış ve binanın test modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan test modeli kullanılarak her bir set için Genişletilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (GFTAA) yöntemi ile binanın dinamik karakteristikleri belirlenmiştir. Tüm setlerin dinamik karakteristik sonuçları incelenmiş ve çevresel etkilerin en az olduğu set yapı tanılama işlemine kullanılmıştır. Yapı tanılama işlemi gerçekleştirilirken tüm binalarda Bölüm 5.1.'de belirtilen şart göz önüne alınarak X ve Y yönü için %70 kütle katılımı olan modlar dikkate alınmıştır. Binanın X yönünde %91.6'lık modal kütle katılımı ile üçüncü modunu, Y yönünde ise %81.6'lık modal kütle katılımı ile üçüncü modunu incelemek yeterli görülmüştür (Tablo 5.5). Bu bilgi ışığı altında yapı tanılama işleminde binanın ilk üç modu belirlenmiştir. Aydın Bak Sitesi 2. Blok'un ARTEMIS programında GFTAA yöntemi kullanılarak elde edilen Spektral Yoğunluk Fonksiyonu Tekil Değerleri (SYFTD) Şekil 5.13'te verilmiştir.



Şekil 5.13. Aydın Bak Sitesi 2.Blok'a ait Spektral Yoğunluk Fonksiyonu Tekil Değerleri

Aydın Bak Sitesi 2. Blok'un SYFTD kullanılarak elde edilen doğal frekans ve sönüm oranı değerleri ise Tablo 5.6'da verilmiştir. Dikkate alınan ilk üç mod için deneysel frekans değerleri incelendiğinde, nümerik model sonucu elde edilen değerlerden daha düşük olduğu belirlenmiştir. Yani sonlu eleman modeli gerçek modele oranla daha rijit bir davranış sergilemektedir.

Tablo 5.6. Aydın Bak Sitesi 2. Blok deneysel yolla elde edilen frekans ve sönüm oranı değerleri

Mod	Deneysel Frekans (Hz)	Sönüm Oranı (%)
1	1.124	0.782
2	1.385	1.039
3	3.667	0.694

Deneysel yolla modal karakteristiklerin belirlenmesinin ardından deneysel ve nümerik model arasındaki farkı belirlemek için frekans ve mod şekilleri karşılaştırılmıştır. İki frekans değeri arasındaki fark deneysel sonuç dikkate alınarak % cinsinden (Denklem 4.1), mod şekilleri arasındaki korelasyon ise mod gerçekleşme kriteri (MAC) kullanılarak % cinsinden belirlenmiştir (Denklem 4.2). Aydın Bak Sitesi 2. Blok'un ilk 3 mod için Femtools programı kullanılarak elde edilen deneysel ve nümerik analiz sonuçlarının karşılaştırılması Tablo 5.7'de verilmiştir.

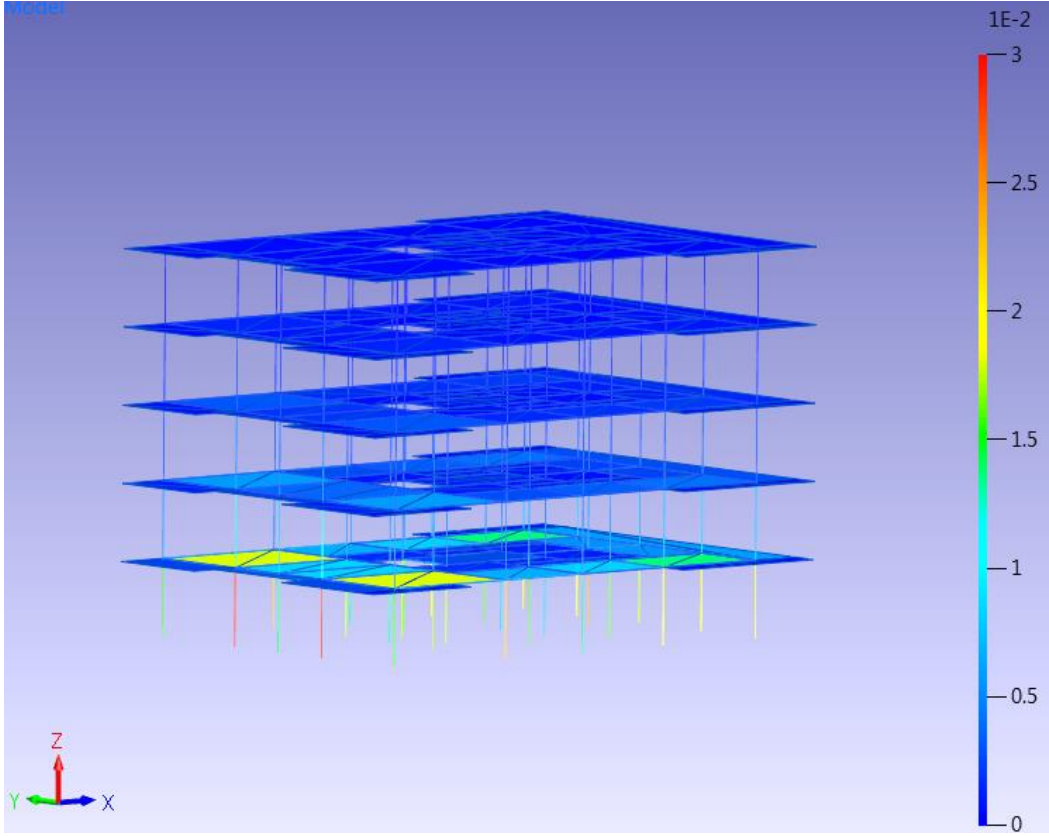
Tablo 5.7. Aydın Bak Sitesi 2.Blok deneysel ve SE modelinden elde edilen frekanslar

Mod	Sap2000 (Hz)	Deneysel (Hz)	Fark (%)	MAC (%)
1	1.514	1.124	-34.70	91.0
2	1.554	3.667	57.62	0.10
3	1.850	1.385	-33.57	97.4

5.3.3. Aydın Bak sitesi 2.blok model güncelleme çalışması

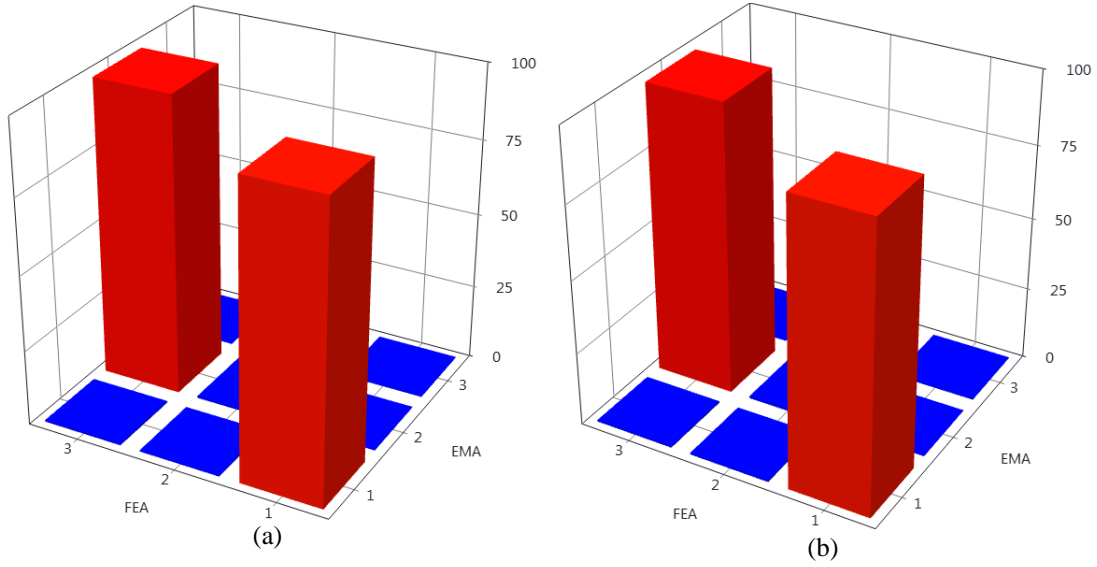
Binanın frekans ve mod şekillerinin karşılaştırılmasının ardından SE modelinin deneysel sonuçlara göre iyileştirilmesi yani model güncelleme çalışmalarına başlanmıştır. Tüm yapısal elemanların eğilme rijitlikleri güncelleme parametresi olarak seçilmiştir. Güncelleme cevabı olarak ise deneysel yolla elde edilen sonuç verileri yani frekans değerleri ve mod şekilleri seçilmiştir.

Güncelleme parametrelerindeki değişimin cevap üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla normalize duyarlılık analizi yapılmıştır (Şekil 5.14). Yapılan duyarlılık analizine göre alt kattaki kolon elemanların eğilme rijitliğindeki %1'lik değişim model güncelleme üzerinde (cevap parametresinde) % 3'lük değer ile en fazla etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.14. Aydın Bak sitesi 2.blok yapı elemanlarının duyarlılık analizi

Binanın SE modeli, yapısal elemanların eğilme rijitlikleri ile binanın modal karakteristikleri arasındaki ilişki kullanılarak Femtools programında iteratif olarak güncellenmiştir. Güncelleme öncesi ve sonrası elde edilen MAC matrisleri Şekil 5.15'te, güncelleme sonucunda Sap2000 programından elde edilen binanın yeni frekans değerleri ve mod şekillerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması Tablo 5.8'de verilmiştir.



EMA: Deneysel modal analiz, FEA: Sonlu eleman analizi

Şekil 5.15. Aydın Bak Sitesi model güncelleme öncesinde (a) ve sonrasında (b) elde edilen MAC matrisleri

Tablo 5.8. Aydın Bak Sitesi 2. Blok güncelleme sonrası elde edilen frekanslar

Mod	Sap2000 (Hz)	Deneysel (Hz)	Fark (%)	MAC (%)
1	1.364	1.124	-21.35	94.1
2	1.426	3.667	61.12	0.30
3	1.774	1.385	-28.08	97.2

Güncelleme çalışması ile kesit eğilme rijitliklerinin %14 oranında azaltılması ile frekans değerlerinde ve birinci mod şeklinde bir iyileşme yakalanmıştır. Eğilme rijitliğindeki azalmanın, sonlu eleman modelinde doğru bir şekilde tanımlanamayan zemin kat kolonlarının alt ucunda meydana gelen hasardan ve gözle tespit edilemeyen rijitlik azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bundan sonraki aşamada %70 kütle katılımı sağlayan X ve Y yönündeki modlarla uyumlu performans analizi gerçekleştirilecektir (Tablo 5.5).

5.4. Dayal İnşaat A Blok Genel Bilgi

Dayal İnşaat A Blok Sakarya ili Serdivan ilçesinde (enlem; 40°45'46.89''K, boylam; 30°21'42.78''D) bulunmaktadır. Binanın harita üzerindeki konumu Şekil 5.16'da gösterilmiştir.



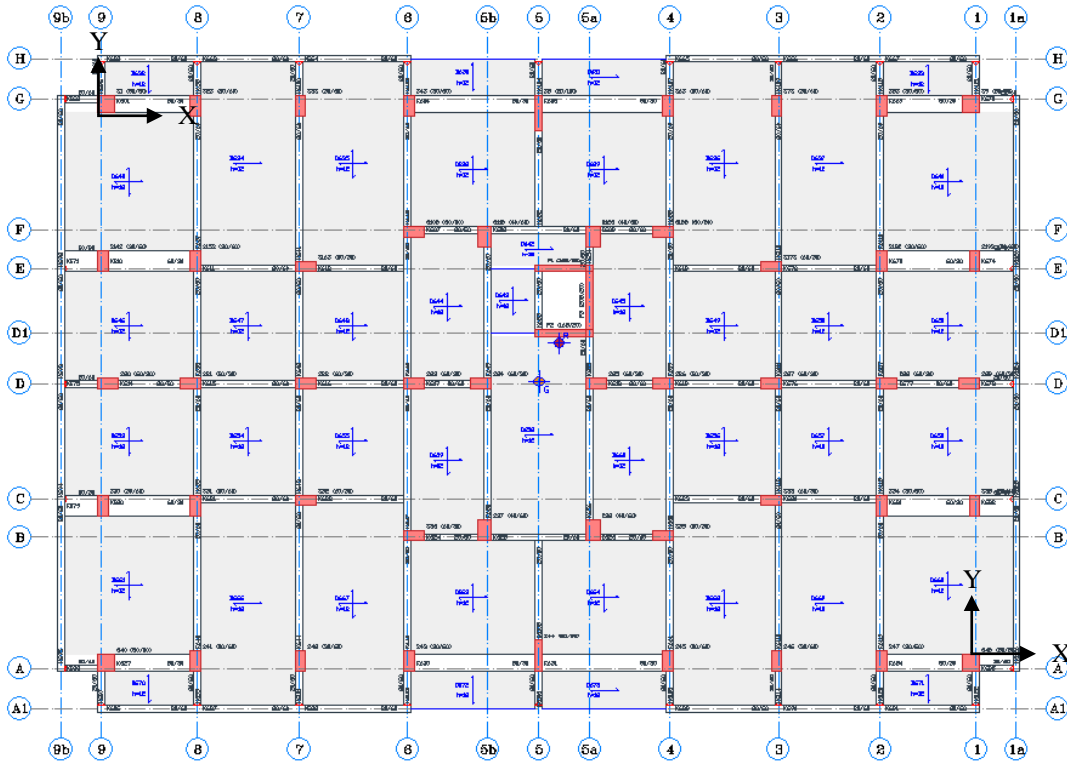
Şekil 5.16. Dayal İnşaat A Blok harita üzerindeki konumu [96]

Bina Zemin +5 katlı betonarme karkas halde, zemin kat ve birinci normal kat duvarları örülmüş iken Marmara Depremi'ne yakalanmıştır (Şekil 5.16). Deprem sonucu binada merdiven hasarları meydana gelmiştir. Taşıyıcı sistemde herhangi bir hasar oluşmamıştır. Dayal İnşaat A Blok binasının yapılan incelemeler sonucunda, Hemen Kullanım (HK) performans düzeyinde olduğu tespit edilmiştir. Binaya depremden günümüze yapısal anlamda hiçbir müdahale yapılmamıştır.



Şekil 5.17. Dayal İnşaat A blok fotoğrafı [98]

Bina 1975 Deprem Yönetmeliği çerçevesinde projelendirilmiştir. Binanın kolonları; 30x50 cm, 60x30 cm, 50x50 cm, 20x90 cm, çekirdek perdede P1 165x20 cm ve P2 205x20 cm, kirişler ise 30x50 cm boyutlarındadır (Şekil 5.18). Dayal binasından, Türkiye Deprem Yönetmeliği (2007) esaslarına göre, beton karot ve çelik numuneleri alınmış ve laboratuvarında test edilmiştir. Laboratuvar sonuçlarına göre malzeme dayanımları C20 ve S420'yi sağlamıştır. Zemin sınıfı Z2 olarak belirlenmiştir. [98].



Şekil 5.18. Dayal İnşaat A blok kalıp planı

5.4.1. Dayal İnşaat A Blok nümerik modeli

Binanın ilk olarak Sap2000 programı kullanılarak sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve nümerik yolla modal karakteristikleri belirlenmiştir. Sonlu eleman modeli oluşturulurken Bölüm 5.1.'de belirtilen genel kabuller uygulanmıştır. Oluşturulan SE modeli kullanılarak Sap 2000 programında yapılan modal analiz sonucunda ilk dokuz mod için elde edilen frekans değerleri ile X ve Y yönü ötelenme ve Z yönü dönme değerlerinin modal kütle katılım oranları değerleri Tablo 5.9'da verilmiştir.

Nümerik modal analiz sonucunda elde edilen modal kütle katılım oranları değerlendirildiğinde, birinci modun %37.2'lik kütle katılımı ile burulma modu, ikinci modun %71.4'lük kütle katılımı ile X yönünde ötelenme modu, üçüncü modun %83.6'lık kütle katılımı ile Y yönünde ötelenme olduğu sonucu elde edilmiştir.

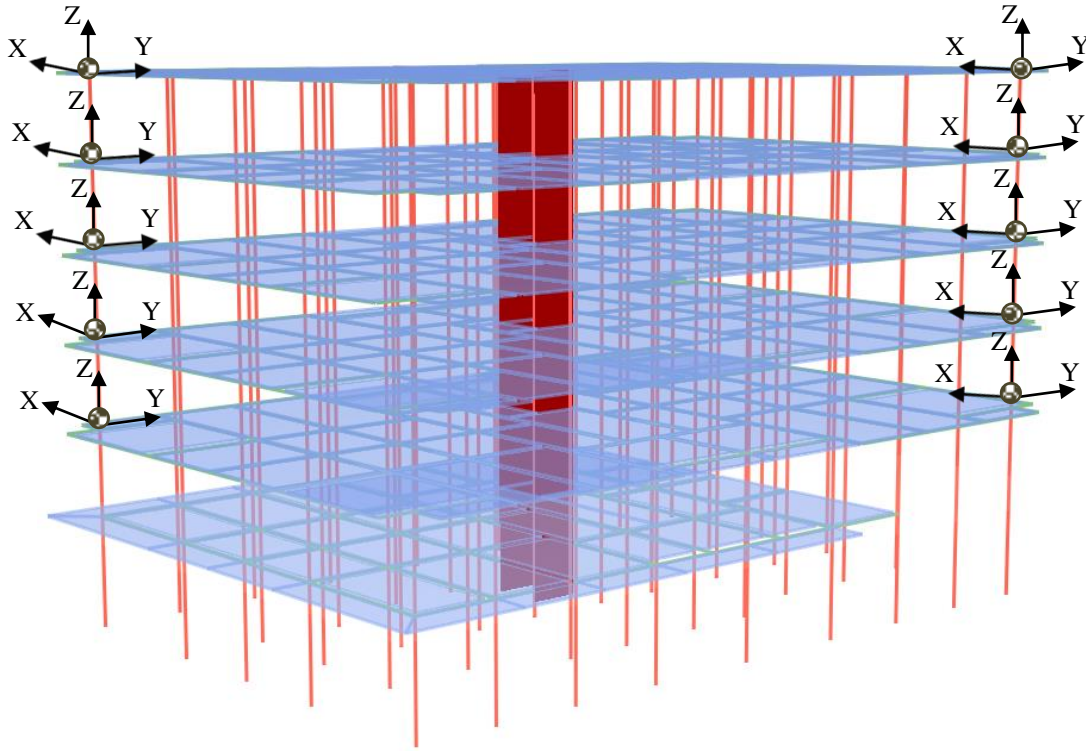
Tablo 5.9. Dayal İnşaat Sap2000 modal analizi ile elde edilen frekans ve modal kütle katılımı oranı

Mod	Sap2000 Frekans (Hz)	Modal Kütle Katılım Oranı (%)		
		UX	UY	RZ
1	1.930	0.09	0.08	37.2
2	2.083	71.4	0.00	13.3
3	2.343	0.00	83.6	33.8
4	5.823	16.2	0.00	2.23
5	6.159	1.30	0.00	3.62
6	8.185	0.00	8.90	3.90
7	10.83	4.25	0.00	0.80
8	12.14	0.13	0.42	0.54
9	15.40	0.00	0.34	1.34

5.4.2. Dayal İnşaat A Blok yapı tanılama çalışmaları

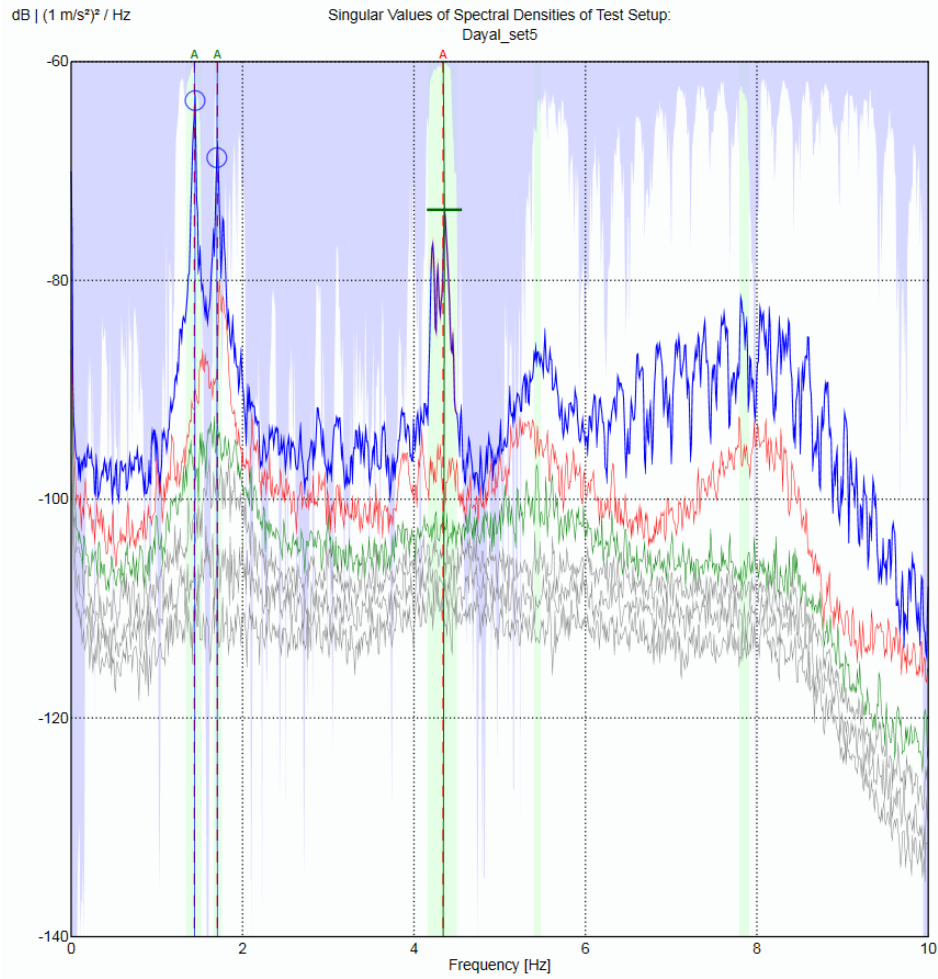
Nümerik yöntemle modal karakteristiklerin belirlenmesinin ardından deneysel yolla modal karakteristiklerin belirlenmesi işlemine geçilmiştir. İlk olarak binadan 30 dakika süre ile çevrel titreşim kaydı alınmıştır. Kayıt alırken ivmeölçerler binada uygun yapısal noktalar üstüne yerleştirilmiştir. Kullanılan ivmeölçerlerin binadaki yerleşim şekilleri ve yönelimleri üç boyutlu sonlu eleman yapı modeli üzerinde Şekil 5.19'da gösterilmiştir.

Binadan 30 dakika süre ile alınan çevrel titreşim kayıtları beşer dakikalık altı adet sete bölünmüştür. Her bir sete Bölüm 5.1.'de belirtilen sinyal işleme teknikleri uygulanmıştır. İşlenen kayıtlar ARTeMIS programına aktarılmış ve binanın test modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan test modeli kullanılarak her bir set için Genişletilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (GFTAA) yöntemi ile binanın dinamik karakteristikleri belirlenmiştir. Tüm setlerin dinamik karakteristik sonuçları incelenmiş ve çevresel etkilerin en az olduğu set yapı tanılama işleminde kullanılmıştır.



Şekil 5.19. Dayal İnşaat A Blok ivme ölçüm cihazlarının konum ve yönelimlerinin üç boyutlu görünüşü

Yapı tanılama işlemi gerçekleştirilirken tüm binalarda Bölüm 5.1.'de belirtilen şart göz önüne alınarak X ve Y yönü için %70 kütle katılımı olan modlar dikkate alınmıştır. Binanın X yönünde %71.4'lük modal kütle katılımı ile ikinci modunu, Y yönünde ise %83.6'lık modal kütle katılımı ile üçüncü modunu incelemek yeterli görülmüştür (Tablo 5.9). Bu bilgi ışığı altında yapı tanılama işleminde binanın ilk üç modu belirlenmiştir. Dayal İnşaat A Blok'un ARTeMIS programında GFTAA yöntemi kullanılarak elde edilen Spektral Yoğunluk Fonksiyonu Tekil Değerleri (SYFTD) Şekil 5.20'de verilmiştir.



Şekil 5.20. Dayal İnşaat A Blok'a ait Spektral Yoğunluk Fonksiyonu Tekil Değerleri

Dayal İnşaat A Blok'un SYFTD kullanılarak elde edilen doğal frekans ve sönüm oranı değerleri ise Tablo 5.10'da verilmiştir. Dikkate alınan ilk üç mod için deneysel frekans değerleri incelendiğinde, nümerik model sonucu elde edilen değerlerden daha düşük olduğu belirlenmiştir. Yani sonlu eleman modeli gerçek modele oranla daha rijit bir davranış sergilemektedir.

Tablo 5.10. Dayal inşaat deneysel yolla elde edilen frekans ve sönüm oranı değerleri

Mod	Deneysel Frekans (Hz)	Sönüm Oranı (%)
1	1.439	0.967
2	1.707	0.853
3	4.340	1.478

Deneysel yolla modal karakteristiklerin belirlenmesinin ardından deneysel ve nümerik model arasındaki farkı belirlemek için frekans ve mod şekilleri karşılaştırılmıştır. İki frekans değeri arasındaki fark deneysel sonuç dikkate alınarak % cinsinden (Denklem 4.1), mod şekilleri arasındaki korelasyon ise mod gerçekleşme kriteri (MAC) kullanılarak % cinsinden belirlenmiştir (Denklem 4.2). Dayal İnşaat A Blok'un ilk 3 mod için Femtools programı kullanılarak elde edilen deneysel ve nümerik analiz sonuçlarının karşılaştırılması Tablo 5.11'de verilmiştir.

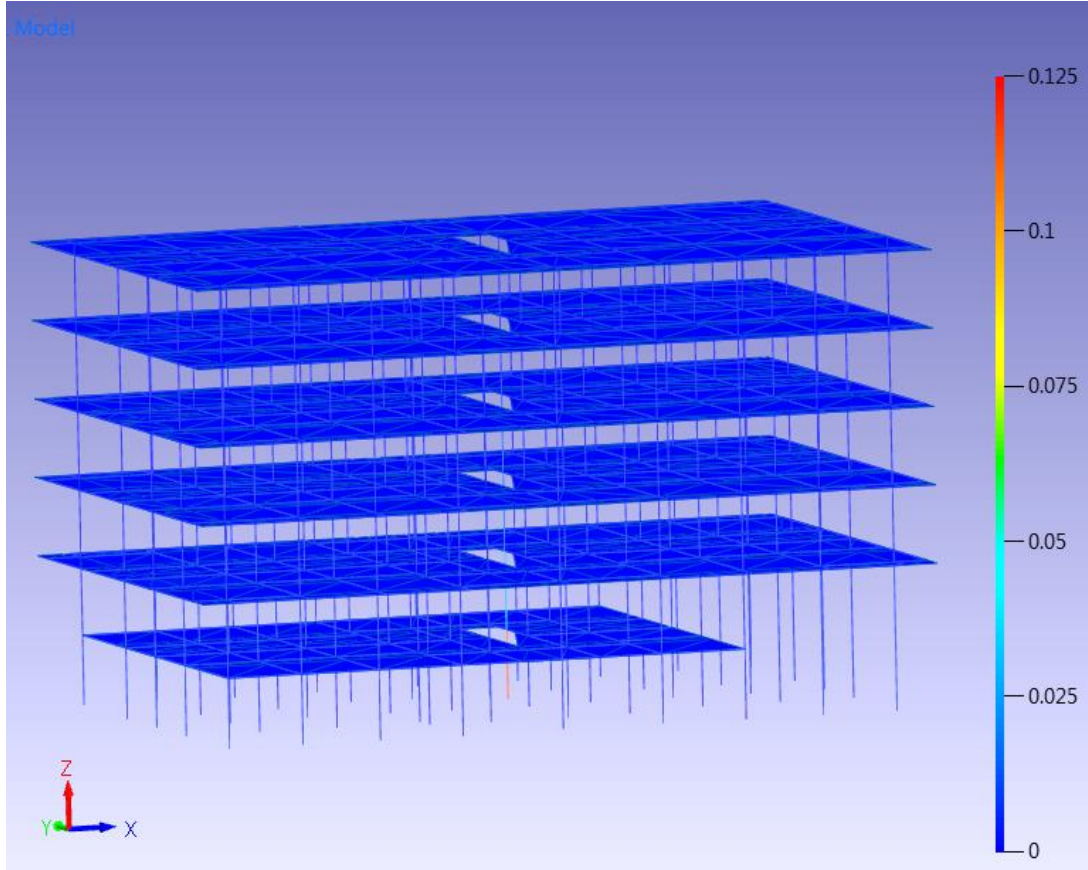
Tablo 5.11. Dayal inşaat deneysel ve SE modelinden elde edilen frekanslar

Mod	Sap2000 (Hz)	Deneysel (Hz)	Fark (%)	MAC (%)
1	1.930	1.439	-34.12	94.1
2	2.083	1.707	-22.03	93.2
3	2.343	4.340	46.01	1.20

5.4.3. Dayal inşaat A blok model güncelleme çalışması

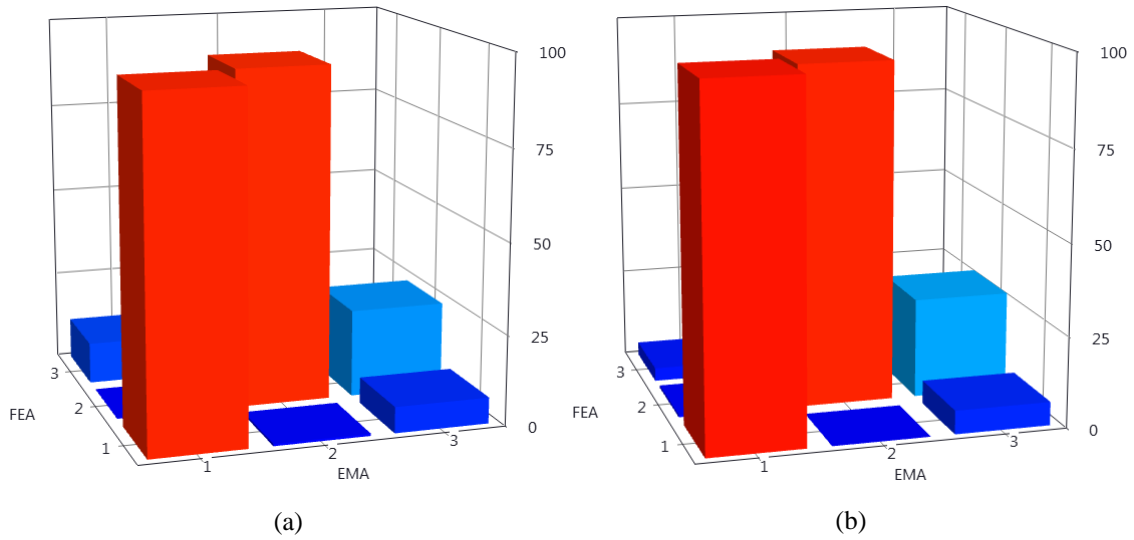
Binanın frekans ve mod şekillerinin karşılaştırılmasının ardından SE modelinin deneysel sonuçlara göre iyileştirilmesi yani model güncelleme çalışmalarına başlanmıştır. Tüm yapısal elemanların eğilme rijitlikleri güncelleme parametresi olarak seçilmiştir. Güncelleme cevabı olarak ise deneysel yolla elde edilen sonuç verileri yani frekans değerleri ve mod şekilleri seçilmiştir.

Güncelleme parametrelerindeki değişimin cevap üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla normalize duyarlılık analizi yapılmıştır (Şekil 5.21). Yapılan duyarlılık analizine göre çekirdek perdenin eğilme rijitliğindeki %1'lik değişim model güncelleme üzerinde (cevap parametresinde) % 12.5'lik değer ile en fazla etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.21. Dayal İnşaat A blok yapı elemanlarının duyarlılık analizi

Binanın SE modeli, yapısal elemanların eğilme rijitlikleri ile binanın modal karakteristikleri arasındaki ilişki kullanılarak Femtools programında iteratif olarak güncellenmiştir. Güncelleme öncesi ve sonrası elde edilen MAC matrisleri Şekil 5.22’de, güncelleme sonucunda Sap2000 programından elde edilen binanın yeni frekans değerleri ve mod şekillerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması Tablo 5.12’de verilmiştir.



EMA: Deneysel modal analiz, FEA: Sonlu eleman analizi

Şekil 5.22. Dayal İnşaat A Blok model güncelleme öncesinde (a) ve sonrasında (b) elde edilen MAC matrisleri

Tablo 5.12. Dayal İnşaat A Blok güncelleme sonrası elde edilen frekanslar

Mod	Sap2000 (Hz)	Deneysel (Hz)	Fark (%)	MAC (%)
1	1.872	1.439	-30.09	96.5
2	2.023	1.707	-18.51	94.0
3	2.376	4.340	45.25	1.00

Güncelleme çalışması ile kesit eğilme rijitliklerinin %18 oranında azaltılması ile frekans değerlerinde, birinci ve ikinci mod şeklinde iyileşme yakalanmıştır. Eğilme rijitliğindeki azalmanın binada gözle görülemeyen kesit rijitliği azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bundan sonraki aşamada %70 kütle katılımı sağlayan X ve Y yönündeki modlarla uyumlu performans analizi gerçekleştirilecektir (Tablo 5.5).

5.5. Durusoy Apartmanı Genel Bilgi

Durusoy Apartmanı Kocaeli ili Gölcük ilçesinde (enlem; 40°43'2.08"K, boylam; 29°48'55.13"D) bulunmaktadır (Şekil 5.23). Apartman 1960'ların ortalarında inşa edilmiş, düzenli bir yapıdır. Bina dükkan üstü üç kattan oluşmaktadır. Bodrumsuz inşa edilen yapının giriş katı ticari amaçla kullanılmaktadır. Yapının dolgu duvarları dolu harman tuğlası ile inşa edilmiştir. Giriş katında dolgu duvarlar düzensiz olarak dağılmış ve üst katlara nazaran daha az dolgu duvar bulunmaktadır.



Şekil 5.23. Durusoy Apartmanı harita üzerindeki konumu [96]

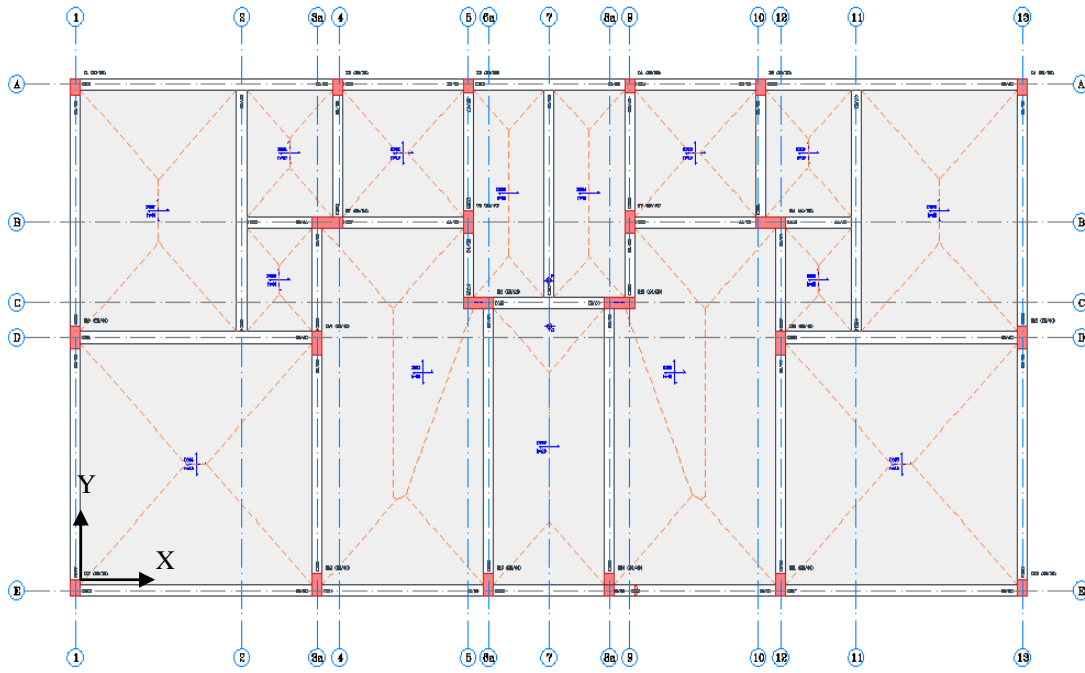
Yapı Marmara Depremi'nde hasar almamıştır ve halen kullanılmaktadır. Yapılan incelemeler sonucunda Durusoy Apartmanı'nın Hemen Kullanım (HK) performans düzeyinde olduğu tespit edilmiştir (Şekil 5.24).



Şekil 5.24. Durusoy Apartmanı fotoğrafı [98]

Yapı tasarımının, 1961 Deprem Yönetmeliği'ne göre yapıldığı sanılmaktadır, çünkü 1968 Yönetmeliği ile getirilen minimum en kesit koşuluna projede uygulanmamıştır (Şekil 5.25). Binanın kolonları; 60x25 cm, 25x60 cm ve kirişleri ise 70x32 cm boyutlarındadır.

Karot numuneleri ve kalibre edilmiş beton çekici okumalarından elde edilen verilere dayanılarak, tüm betonarme elemanların karakteristik beton basınç mukavemetleri 14 MPa alınmıştır. Bina kullanımda olduğundan dolayı çelik numunesi alınamamıştır, çelik sınıfı projede öngörülen S220 çeliği kabul edilmiştir. Zemin sınıfı Z1 olarak belirlenmiştir [98].



Şekil 5.25. Durusoy Apartmanı kalıp planı

5.5.1. Durusoy Apartmanı nümerik modeli

Binanın ilk olarak Sap2000 programı kullanılarak sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve nümerik yolla modal karakteristikleri belirlenmiştir. Sonlu eleman modeli oluşturulurken Bölüm 5.1.'de belirtilen genel kabuller uygulanmıştır. Oluşturulan SE modeli kullanılarak Sap 2000 programında yapılan modal analiz sonucunda ilk dokuz mod için elde edilen frekans değerleri ile X ve Y yönü ötelenme ve Z yönü dönme değerlerinin modal kütle katılım oranları değerleri Tablo 5.13'te verilmiştir.

Tablo 5.13. Durusoy apartmanı Sap2000 modal analizi ile elde edilen frekans ve modal kütle katılım oranı

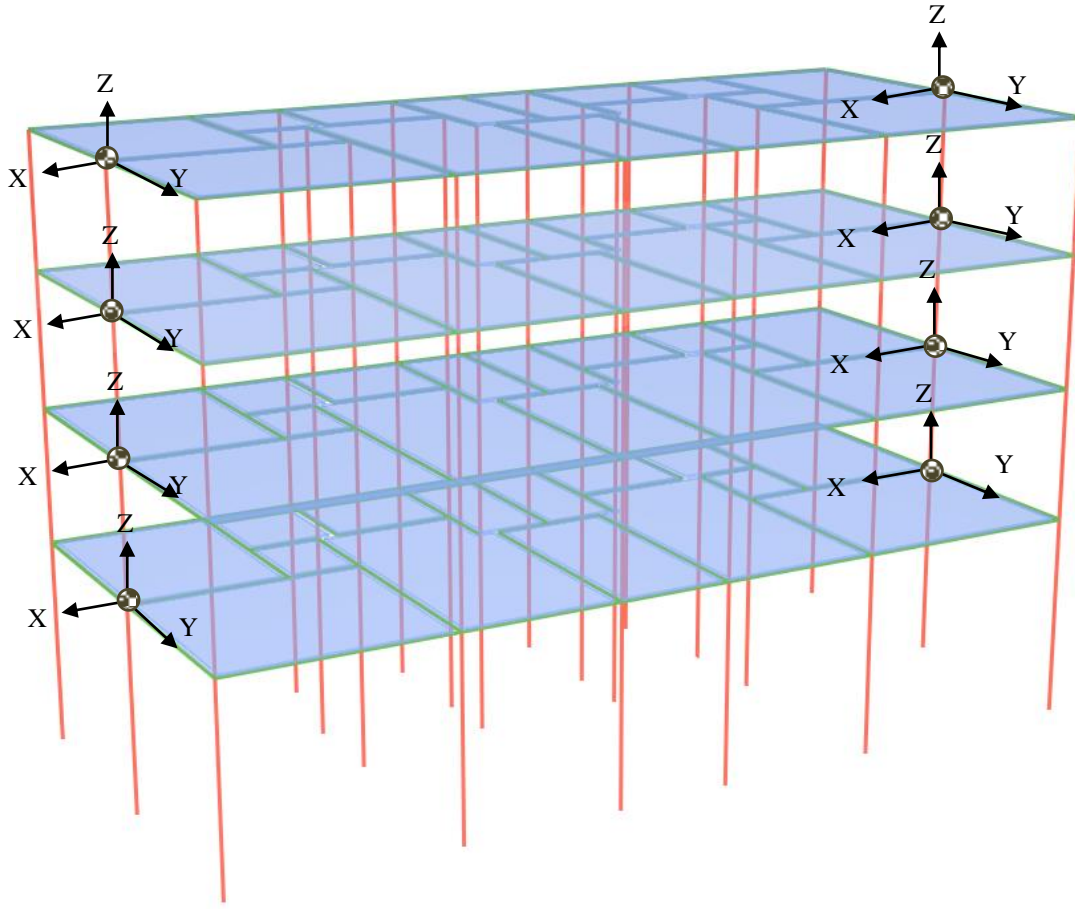
Mod	Sap2000 Frekans (Hz)	Modal Kütle Katılım Oranı (%)		
		UX	UY	RZ
1	3.986	93.7	0.00	11.5
2	4.382	0.00	84.3	24.3
3	5.525	0.13	0.00	50.7
4	12.25	0.00	10.7	6.40
5	12.45	4.31	0.00	0.70
6	15.87	0.00	0.00	2.21
7	17.76	0.00	0.00	0.00
8	17.85	0.00	0.00	0.00
9	18.62	0.00	0.00	0.00

Nümerik modal analiz sonucunda elde edilen modal kütle katılım oranları değerlendirildiğinde, birinci modun %93.7'lik kütle katılımı ile X yönünde öteleme modu, ikinci modun %84.3'lük kütle katılımı ile Y yönünde öteleme modu, üçüncü modun %50.7'lik kütle katılımı ile burulma modu olduğu sonucu elde edilmiştir.

5.5.2. Durusoy Apartmanı yapı tanılama çalışmaları

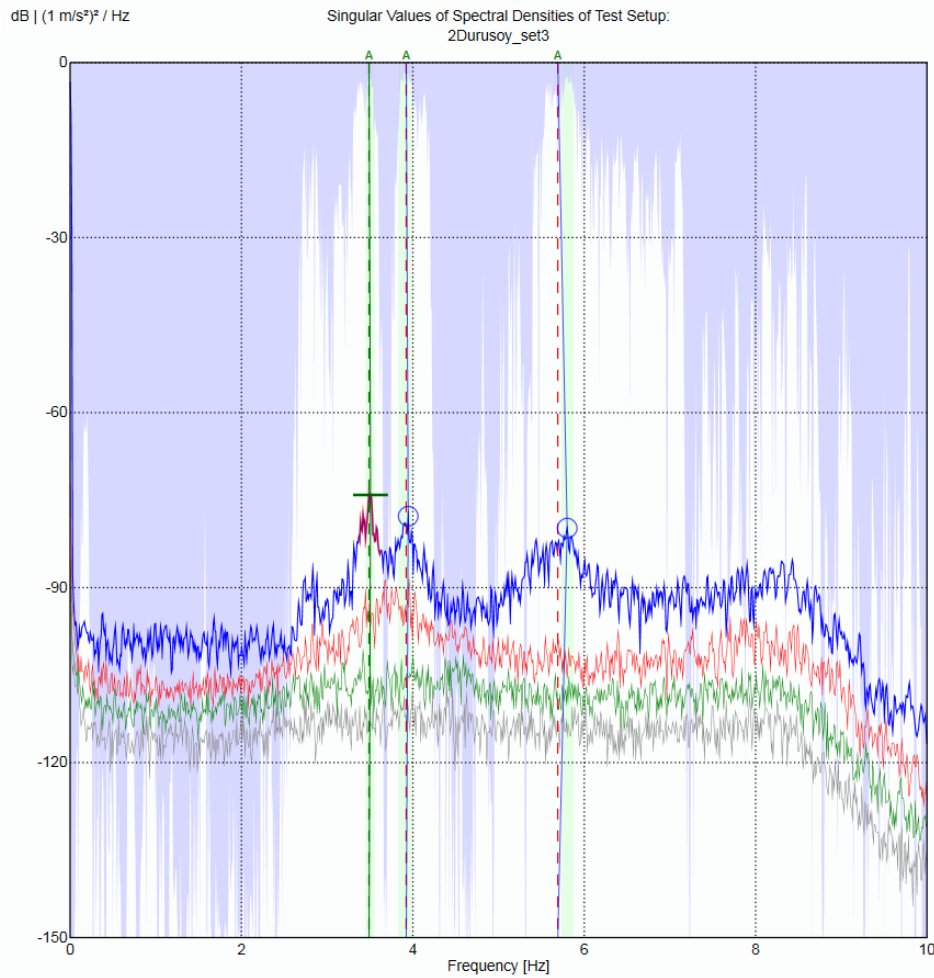
Nümerik yöntemle modal karakteristiklerin belirlenmesinin ardından deneysel yolla modal karakteristiklerin belirlenmesi işlemine geçilmiştir. İlk olarak binadan 30 dakika süre ile çevrel titreşim kaydı alınmıştır. Kayıt alırken ivmeölçerler binada uygun yapısal noktalar üstüne yerleştirilmiştir. Kullanılan ivmeölçerlerin binadaki yerleşim şekilleri ve yönelimleri üç boyutlu sonlu eleman yapı modeli üzerinde Şekil 5.26'da gösterilmiştir.

Binadan 30 dakika süre ile alınan çevrel titreşim kayıtları beşer dakikalık altı adet sete bölünmüştür. Her bir sete Bölüm 5.1.'de belirtilen sinyal işleme teknikleri uygulanmıştır. İşlenen kayıtlar ARTeMIS programına aktarılmış ve binanın test modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan test modeli kullanılarak her bir set için Genişletilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (GFTAA) yöntemi ile binanın dinamik karakteristikleri belirlenmiştir. Tüm setlerin dinamik karakteristik sonuçları incelenmiş ve çevresel etkilerin en az olduğu set yapı tanılama işleminde kullanılmıştır. Yapı tanılama işlemi gerçekleştirilirken tüm binalarda Bölüm 5.1.'de belirtilen şart göz önüne alınarak X ve Y yönü için %70 kütle katılımı olan modlar dikkate alınmıştır.



Şekil 5.26. Durusoy Apartmanı ivme ölçüm cihazlarının konum ve yönelimlerinin üç boyutlu görünüşü

Binanın X yönünde %93.7'lik modal kütle katılımı ile birinci modunu, Y yönünde ise %84.3'lük modal kütle katılımı ile ikinci modunu incelemek yeterli olmuştur ancak diğer binalarda ilk 3 mod dikkate alındığı için bu binada da 3 mod incelenmiştir (Tablo 5.13). ARTeMIS programında GFTAA yöntemi kullanılarak elde edilen Durusoy Apartmanı'na ait Spektral Yoğunluk Fonksiyonu Tekil Değerleri (SYFTD) Şekil 5.27'de verilmiştir.



Şekil 5.27. Durusoy Apartmanına ait Spektral Yoğunluk Fonksiyonu Tekil Değerleri

Durusoy Apartmanı'na ait SYFTD kullanılarak elde edilen doğal frekans ve sönüm oranı değerleri ise Tablo 5.14'te verilmiştir. Dikkate alınan ilk üç mod için deneysel frekans değerleri incelendiğinde, nümerik model sonucu elde edilen değerlerden daha düşük olduğu belirlenmiştir. Yani sonlu eleman modeli gerçek modele oranla daha rijit bir davranış sergilemektedir.

Tablo 5.14. Durusoy Apartmanı deneysel yolla elde edilen frekans ve sönüm oranı değerleri

Mod	Deneysel Frekans (Hz)	Sönüm Oranı (%)
1	3.491	1.570
2	3.921	1.308
3	5.671	3.155

Deneysel yolla modal karakteristiklerin belirlenmesinin ardından deneysel ve nümerik model arasındaki farkı belirlemek için frekans ve mod şekilleri karşılaştırılmıştır. İki frekans değeri arasındaki fark deneysel sonuç dikkate alınarak % cinsinden (Denklem 4.1), mod şekilleri arasındaki korelasyon ise mod gerçekleşme kriteri (MAC) kullanılarak % cinsinden belirlenmiştir (Denklem 4.2). Durusoy Apartmanı'nın ilk 3 mod için Femtools programı kullanılarak elde edilen deneysel ve nümerik analiz sonuçlarının karşılaştırılması Tablo 5.15'te verilmiştir.

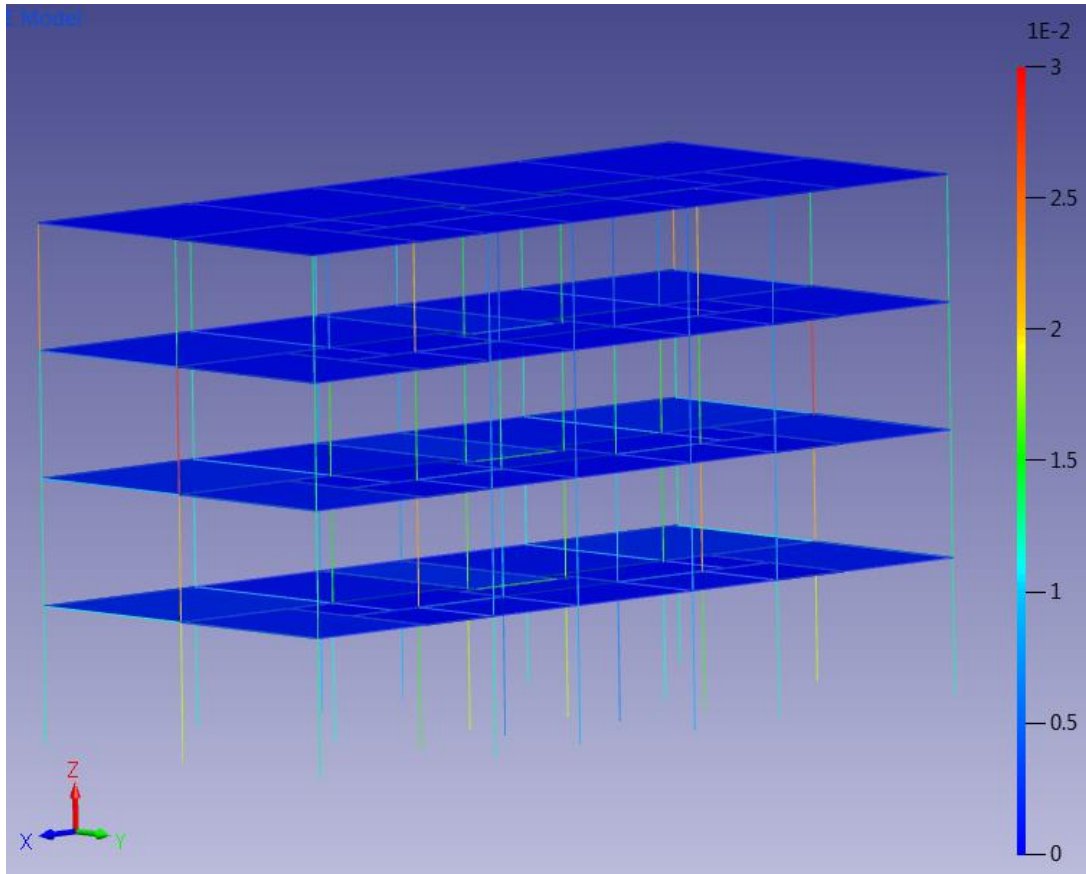
Tablo 5.15. Durusoy apartmanı deneysel ve SE modelinden elde edilen frekanslar

Mod	Sap2000 (Hz)	Deneysel (Hz)	Fark (%)	MAC (%)
1	3.986	3.491	-14.18	58.2
2	4.382	3.921	-11.76	90.1
3	5.525	5.671	2.57	79.4

5.5.3. Durusoy Apartmanı model güncelleme çalışması

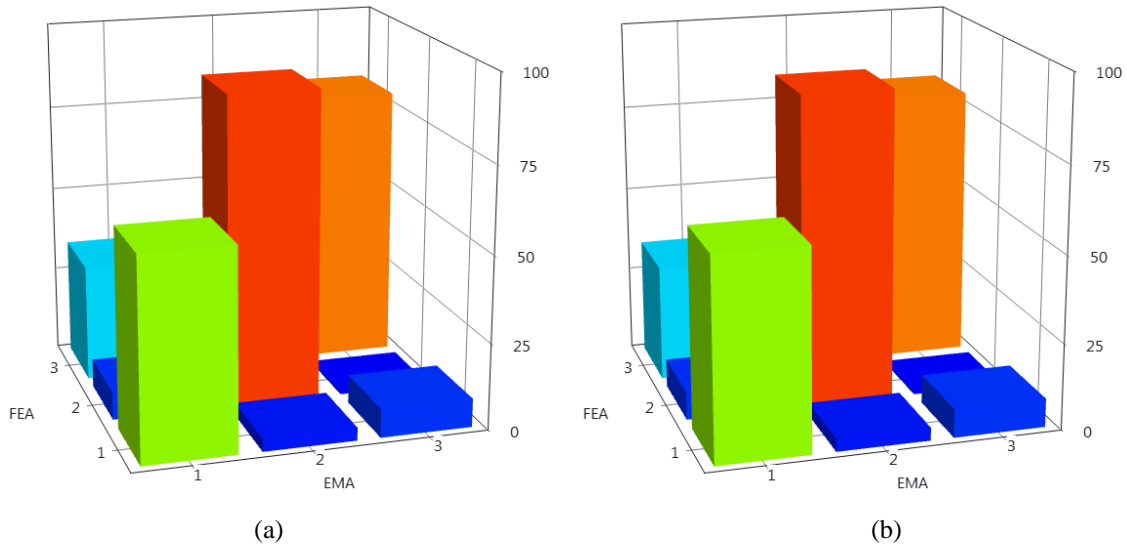
Binanın frekans ve mod şekillerinin karşılaştırılmasının ardından SE modelinin deneysel sonuçlara göre iyileştirilmesi yani model güncelleme çalışmalarına başlanmıştır. Tüm yapısal elemanların eğilme rijitlikleri güncelleme parametresi olarak seçilmiştir. Güncelleme cevabı olarak ise deneysel yolla elde edilen sonuç verileri yani frekans değerleri ve mod şekilleri seçilmiştir.

Güncelleme parametrelerindeki değişimin cevap üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla normalize duyarlılık analizi yapılmıştır (Şekil 5.28). Yapılan duyarlılık analizine göre alt kattaki kolon elemanların eğilme rijitliğindeki %1'lik değişim model güncelleme üzerinde (cevap parametresinde) % 3'lük değer ile en fazla etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.28. Durusoy Apartmanı yapı elemanlarının duyarlılık analizi

Binanın SE modeli, yapısal elemanların eğilme rijitlikleri ile binanın modal karakteristikleri arasındaki ilişki kullanılarak Femtools programında iteratif olarak güncellenmiştir. Güncelleme öncesi ve sonrası elde edilen MAC matrisleri Şekil 5.29’da, güncelleme sonucunda Sap2000 programından elde edilen binanın yeni frekans değerleri ve mod şekillerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması Tablo 5.16’da verilmiştir.



EMA: Deneysel modal analiz, FEA: Sonlu eleman analizi

Şekil 5.29. Durusoy apartmanı model güncelleme öncesinde (a) ve sonrasında (b) elde edilen MAC matrisleri

Tablo 5.16. Durusoy apartmanı güncelleme sonrası elde edilen frekanslar

Mod	Sap2000 (Hz)	Deneysel (Hz)	Fark (%)	MAC (%)
1	3.644	3.491	-4.38	58.2
2	4.015	3.921	-2.40	90.1
3	5.217	5.671	8.01	79.4

Güncelleme çalışmasında kesit eğilme rijitliklerinin %30 oranında azaltılması ile frekans değerlerinde iyileşme yakalanmıştır ancak mod şekillerinde bir iyileşme yakalanamamıştır. Eğilme rijitliğindeki azalmanın dolgu duvarların modellenmesinde yapılan kabullerden ve binada gözle görülemeyen kesit rijitliği azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bundan sonraki aşamada %70 kütle katılımı sağlayan X ve Y yönündeki modlarla uyumlu performans analizi gerçekleştirilecektir (Tablo 5.13).

5.6. Hikmet Şahin Apartmanı Genel Bilgi

Hikmet Şahin Apartmanı Kocaeli ili Gölcük ilçesinde (enlem; 40°42'49.80"K, boylam; 29°49'53.46"D) bulunmaktadır, eğimli bir arazi üzerine kurulmuş küçük ve nispeten düzenli bir binadır (Şekil 5.30). Bina Marmara Depremi'ne inşaat halinde yakalanmıştır ve halen karkas halde ayaktadır. Yapıda deprem sonucu herhangi bir hasar meydana gelmemiştir ve gözlenen deprem performansı Hemen Kullanım (HK) olarak belirlenmiştir (Şekil 5.31).

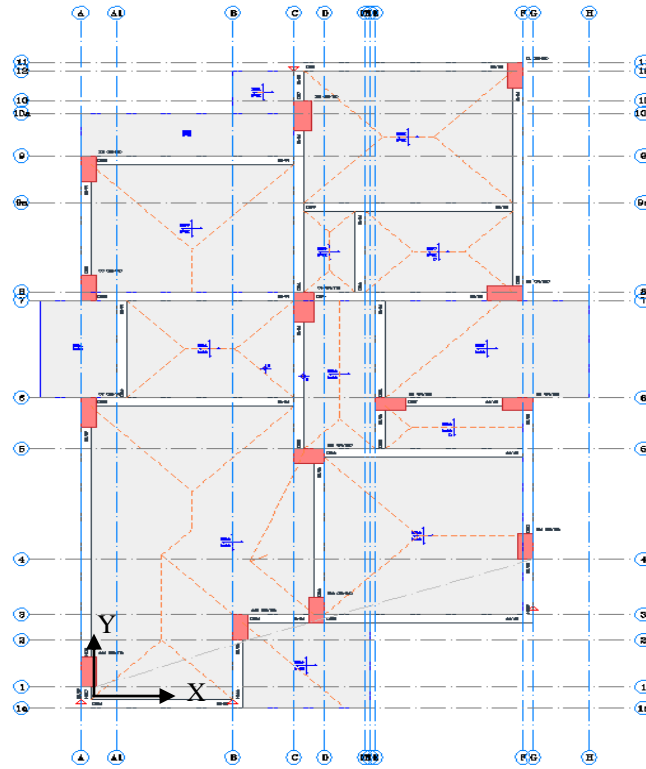


Şekil 5.30. Hikmet Şahin Apartmanı harita üzerindeki konumu [96]

Binanın kolonları; 70x70 cm, 30x50 cm, 60x30 cm, 35x70 cm ve kirişleri ise 20x60 cm boyutlarındadır (Şekil 5.32). Hikmet Şahin binası, Türkiye Deprem Yönetmeliği (2007) esaslarına göre, beton karot ve çelik numuneleri alınmış ve laboratuvarda test edilmiştir. Laboratuvar sonuçlarına göre malzeme dayanımları C16 ve S420'yi sağlamıştır. Zemin sınıfı ise Z1 olarak belirlenmiştir [98].



Şekil 5.31. Hikmet Şahin Apartmanı fotoğrafı [98]



Şekil 5.32. Hikmet Şahin Apartmanı kayıp planı

5.6.1. Hikmet Şahin Apartmanı nümerik modeli

Binanın ilk olarak Sap2000 programı kullanılarak sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve nümerik yolla modal karakteristikleri belirlenmiştir. Sonlu eleman modeli oluşturulurken Bölüm 5.1.'de belirtilen genel kabuller uygulanmıştır. Oluşturulan SE modeli kullanılarak Sap 2000 programında yapılan modal analiz sonucunda ilk dokuz mod için elde edilen frekans değerleri ile X ve Y yönü ötelenme ve Z yönü dönme değerlerinin modal kütle katılım oranları değerleri Tablo 5. 17'de verilmiştir.

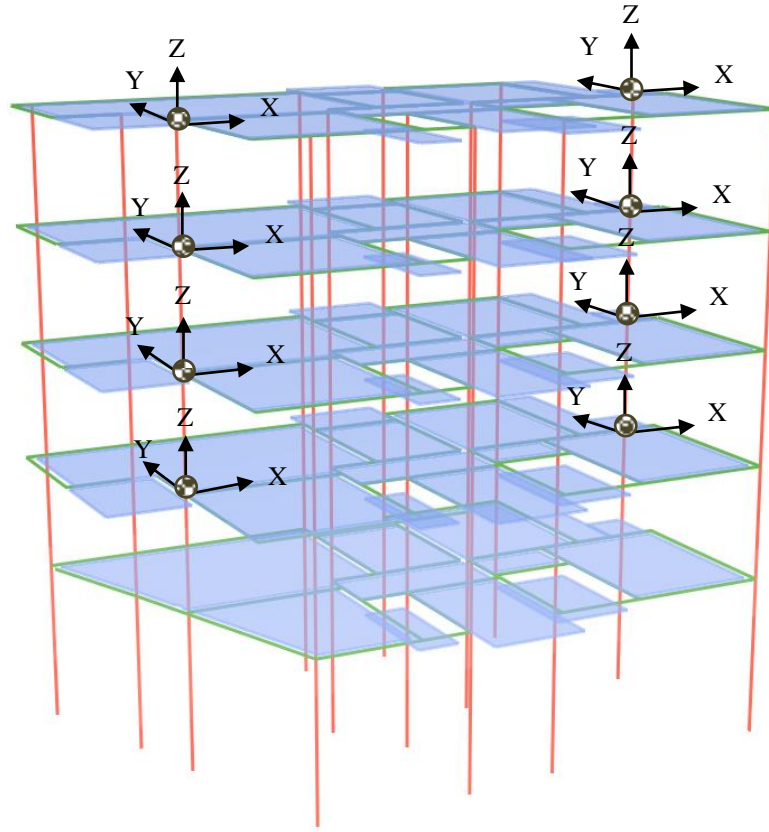
Tablo 5. 17. Hikmet Şahin Apt. Sap2000 modal analizi ile elde edilen frekans ve modal kütle katılımı oranı

Mod	Sap2000 Frekans (Hz)	Modal Kütle Katılım Oranı (%)		
		UX	UY	RZ
1	1.544	77.5	0.90	20.5
2	2.033	0.30	2.60	53.4
3	2.185	0.80	74.9	4.97
4	6.619	12.1	0.10	9.71
5	6.964	0.60	0.70	1.95
6	8.008	0.00	11.2	0.62
7	11.52	4.34	0.00	4.01
8	11.97	0.38	0.38	0.57
9	14.41	0.00	4.43	0.24

Nümerik modal analiz sonucunda elde edilen modal kütle katılım oranları değerlendirildiğinde, birinci modun %77.5'lik kütle katılımı ile X yönünde öteleme modu, ikinci modun %53.4'lük kütle katılımı ile burulma modu, üçüncü modun %74.9'lük kütle katılımı ile Y yönünde öteleme modu olduğu sonucu elde edilmiştir.

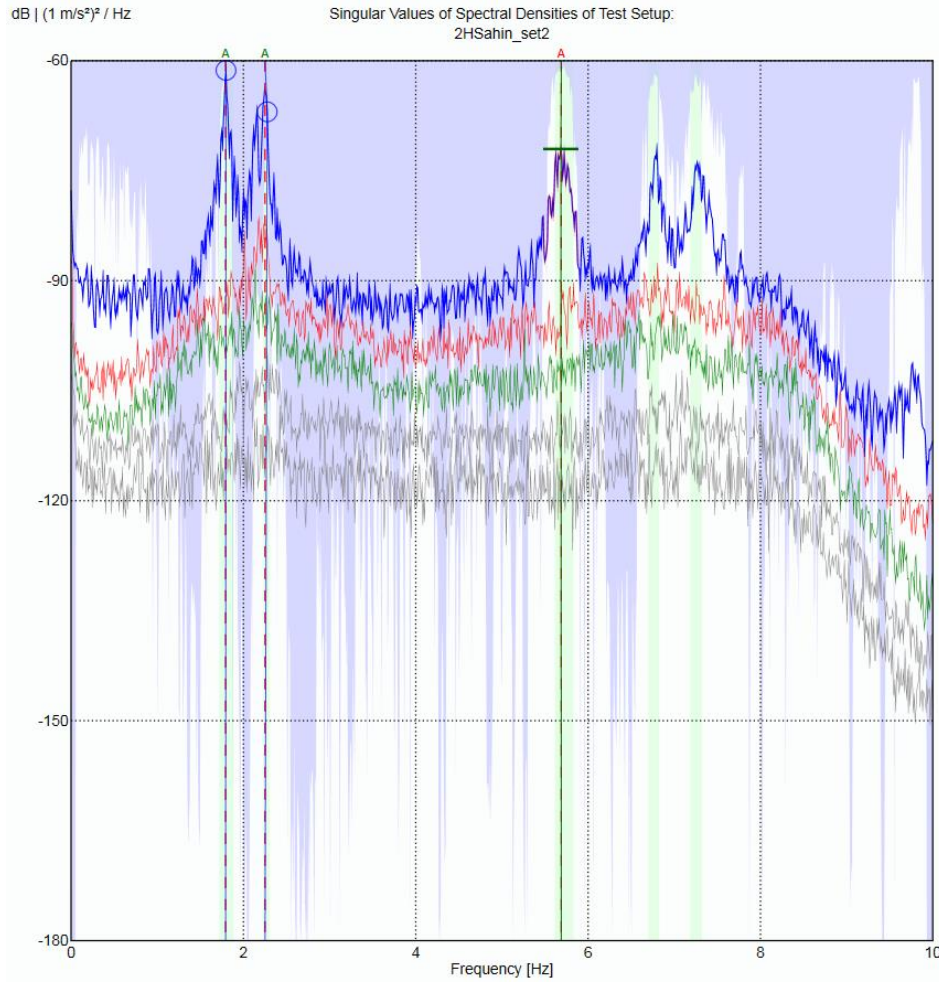
5.6.2. Hikmet Şahin Apartmanı yapı tanılama çalışmaları

Nümerik yöntemle modal karakteristiklerin belirlenmesinin ardından deneysel yolla modal karakteristiklerin belirlenmesi işlemine geçilmiştir. İlk olarak binadan 30 dakika süre ile çevrel titreşim kaydı alınmıştır. Kayıt alırken ivmeölçerler binada uygun yapısal noktalar üstüne yerleştirilmiştir. Kullanılan ivmeölçerlerin binadaki yerleşim şekilleri ve yönelimleri üç boyutlu sonlu eleman yapı modeli üzerinde Şekil 5.33'te gösterilmiştir.



Şekil 5.33. Hikmet Şahin Apartmanı ivme ölçüm cihazlarının konum ve yönelimlerinin üç boyutlu görünüşü

Binadan 30 dakika süre ile alınan çevrel titreşim kayıtları beşer dakikalık altı adet sete bölünmüştür. Her bir sete Bölüm 5.1.'de belirtilen sinyal işleme teknikleri uygulanmıştır. İşlenen kayıtlar ARTeMIS programına aktarılmış ve binanın test modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan test modeli kullanılarak her bir set için Genişletilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (GFTAA) yöntemi ile binanın dinamik karakteristikleri belirlenmiştir. Tüm setlerin dinamik karakteristik sonuçları incelenmiş ve çevresel etkilerin en az olduğu set yapı tanılama işleminde kullanılmıştır. Yapı tanılama işlemi gerçekleştirilirken tüm binalarda Bölüm 5.1.'de belirtilen şart göz önüne alınarak X ve Y yönü için %70 kütle katılımı olan modlar dikkate alınmıştır. Binanın X yönünde %77.5lik modal kütle katılımı ile birinci modunu, Y yönünde ise %74.9'luk modal kütle katılımı ile üçüncü modunu incelemek yeterli görülmüştür (Tablo 5. 17). Bu bilgi ışığı altında yapı tanılama işleminde binanın ilk üç modu belirlenmiştir. ARTeMIS programında GFTAA yöntemi kullanılarak elde edilen Hikmet Şahin Apartmanı'na ait Spektral Yoğunluk Fonksiyonu Tekil Değerleri (SYFTD) Şekil 5.34'te verilmiştir.



Şekil 5.34. Hikmet Şahin apartmanına ait Spektral Yoğunluk Fonksiyonu Tekil Değerleri

Hikmet Şahin Apartmanı'na ait SYFTD kullanılarak elde edilen doğal frekans ve sönüm oranı değerleri ise Tablo 5.18'de verilmiştir. Dikkate alınan ilk üç mod için deneysel frekans değerleri incelendiğinde, nümerik model sonucu elde edilen değerlerden daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Yani gerçek model sonlu eleman modeline oranla daha rijit bir davranış sergilemektedir.

Tablo 5.18. Hikmet Şahin apartmanı deneysel yolla elde edilen frekans ve sönüm oranı değerleri

Mod	Deneysel Frekans (Hz)	Sönüm Oranı (%)
1	1.793	0.921
2	2.249	0.748
3	5.691	1.120

Deneysel yolla modal karakteristiklerin belirlenmesinin ardından deneysel ve nümerik model arasındaki farkı belirlemek için frekans ve mod şekilleri karşılaştırılmıştır. İki frekans değeri arasındaki fark deneysel sonuç dikkate alınarak % cinsinden (Denklem 4.1), mod şekilleri arasındaki korelasyon ise mod gerçekleşme kriteri (MAC) kullanılarak % cinsinden belirlenmiştir (Denklem 4.2). Hikmet Şahin Apartmanı'nın ilk 3 mod için Femtools programı kullanılarak elde edilen deneysel ve nümerik analiz sonuçlarının karşılaştırılması Tablo 5.19'da verilmiştir.

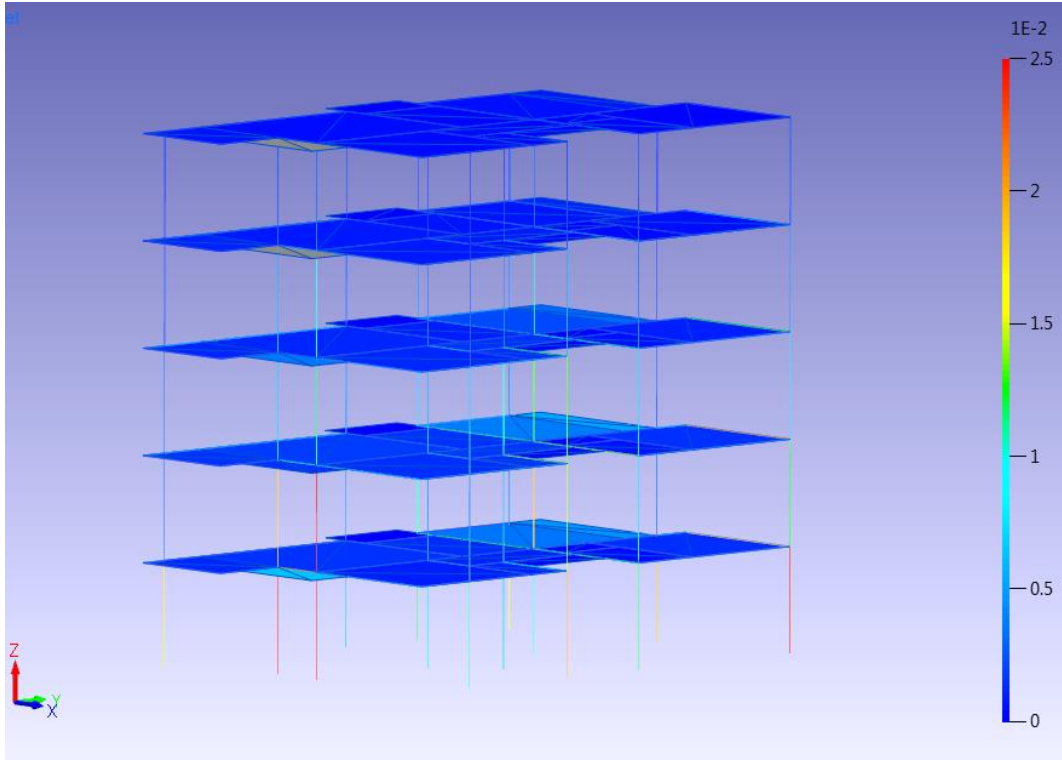
Tablo 5.19. Hikmet Şahin apartmanı deneysel ve SE modelinden elde edilen frekanslar

Mod	Sap2000 (Hz)	Deneysel (Hz)	Fark (%)	MAC (%)
1	1.544	5.691	72.86	3.70
2	2.033	2.249	9.60	92.6
3	2.185	1.793	-21.91	94.3

5.6.3. Hikmet Şahin Apartmanı model güncelleme çalışması

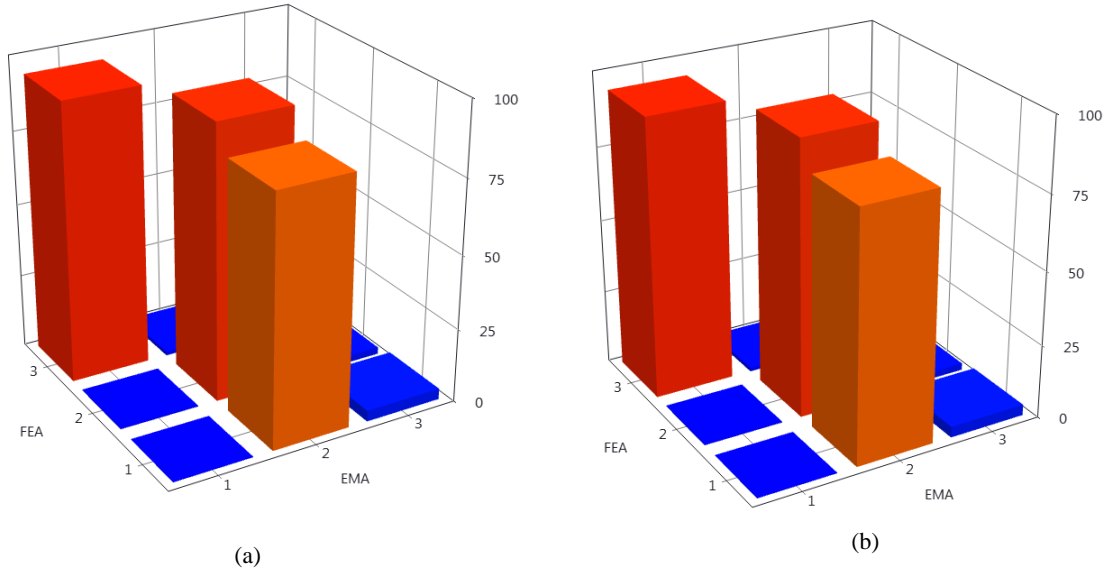
Binanın frekans ve mod şekillerinin karşılaştırılmasının ardından SE modelinin deneysel sonuçlara göre iyileştirilmesi yani model güncelleme çalışmalarına başlanmıştır. Tüm yapısal elemanların eğilme rijitlikleri güncelleme parametresi olarak seçilmiştir. Güncelleme cevabı olarak ise deneysel yolla elde edilen sonuç verileri yani frekans değerleri ve mod şekilleri seçilmiştir.

Güncelleme parametrelerindeki değişimin cevap üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla normalize duyarlılık analizi yapılmıştır (Şekil 5.35). Yapılan duyarlılık analizine göre ilk ik kattaki kolon elemanların eğilme rijitliğindeki %1'lik değişim model güncelleme üzerinde (cevap parametresinde) % 2.5'lik değer ile en fazla etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.35. Hikmet Şahin Apartmanı yapı elemanlarının duyarlılık analizi

Binanın SE modeli, yapısal elemanların eğilme rijitlikleri ile binanın modal karakteristikleri arasındaki ilişki kullanılarak Femtools programında iteratif olarak güncellenmiştir. Güncelleme öncesi ve sonrası elde edilen MAC matrisleri Şekil 5.36'da, güncelleme sonucunda Sap2000 programından elde edilen binanın yeni frekans değerleri ve mod şekillerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması Tablo 5.20'de verilmiştir.



EMA: Deneysel modal analiz, FEA: Sonlu eleman analizi

Şekil 5.36. Hikmet Şahin Apart. model güncelleme öncesinde (a) ve sonrasında (b) elde edilen MAC matrisleri

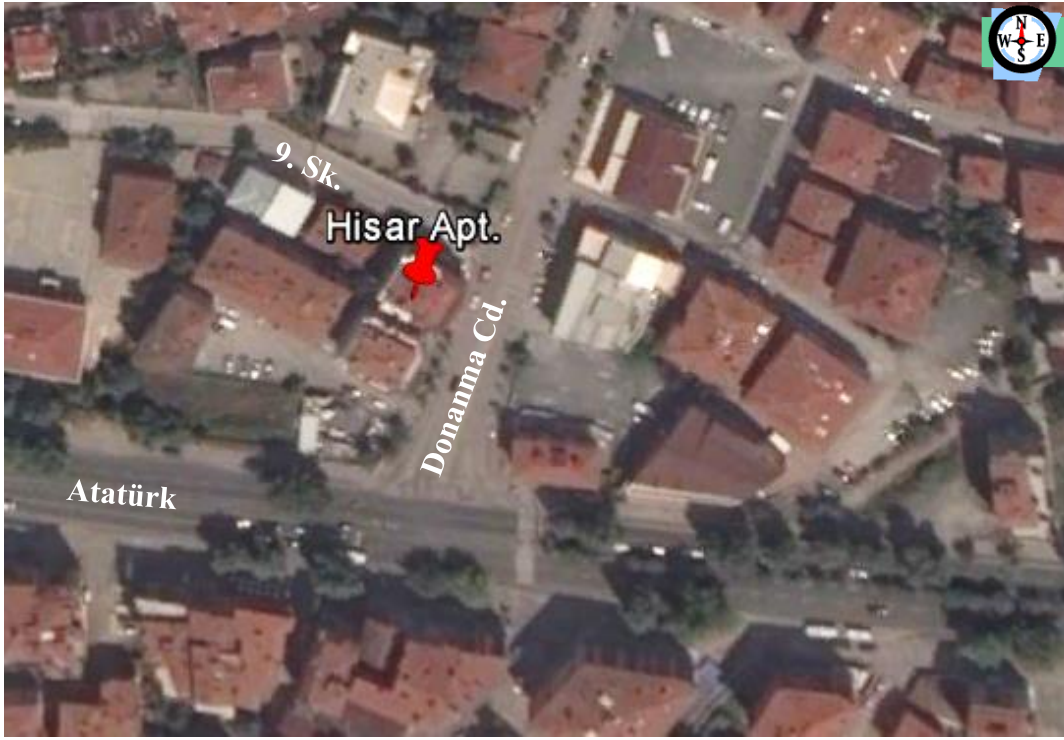
Tablo 5.20. Hikmet Şahin apartmanı güncelleme sonrası elde edilen frekanslar

Mod	Sap2000 (Hz)	Deneysel (Hz)	Fark (%)	MAC (%)
1	1.619	5.691	71.55	3.7
2	2.133	2.249	5.517	92.6
3	2.292	1.793	-27.83	94.3

Güncelleme çalışması ile kesit eğilme rijitliklerinin %1 oranında azaltılması ile frekans değerlerinde iyileşme yakalanmıştır. Mod şekillerinde bir iyileşme yakalanamamıştır. Başlangıç sonlu eleman modelinin gerçek model davranışını %99 oranla temsil ettiği belirlenmiştir. Bundan sonraki aşamada %70 kütle katılımı sağlayan X ve Y yönündeki modlarla uyumlu performans analizi gerçekleştirilecektir (Tablo 5. 17).

5.7. Hisar Apartmanı A Blok Genel Bilgi

Hisar Apartmanı Marmara Depremi'nin merkezine oldukça yakın, Kocaeli ili Gölcük ilçesinde (enlem; 40°43'3.47''K, boylam; 29°48'53.81''D) hasarın yoğunlaştığı bir bölgede bulunmaktadır (Şekil 5.37). Binanın bulunduğu Donanma Caddesi'nde Marmara Depremi sonucu birçok hasarlı yapı gözlenmiştir. Yan yana iki bloktan oluşan Hisar Apartmanı'nın iki bloğunda da hasar meydana gelmemiştir. Bina'nın gözlenen deprem performansı Hemen Kullanım (HK) olarak belirlenmiştir.



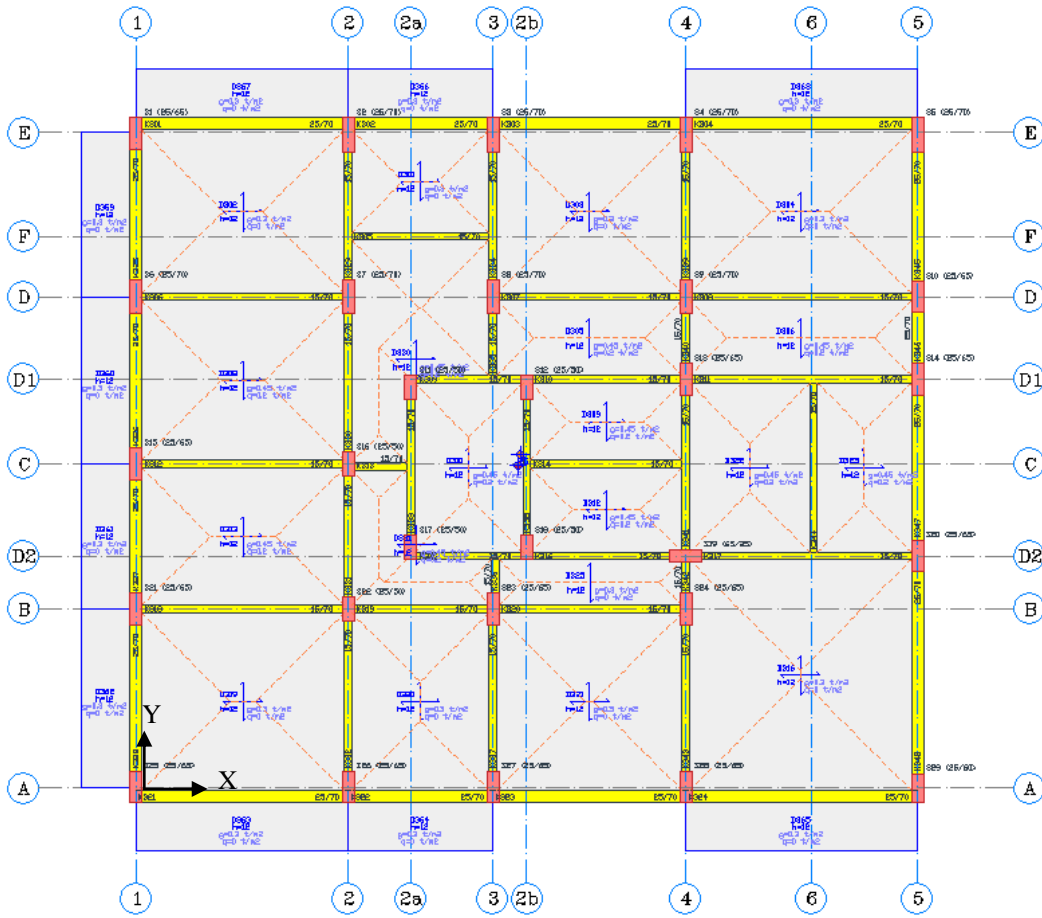
Şekil 5.37. Hisar Apartmanı harita üzerindeki konumu [96]

Deprem sonrasında binalar halen kullanımdadır. Hisar Apartmanı gerek planda gerekse düşey doğrultuda oldukça düzenli inşa edilmiş bir binadır. Altı katlı binanın giriş katı dükkân olarak kullanılmaktadır ve dolgu duvarlar bu katta oldukça kısıtlıdır. Şekil 5.38'de binaya ait bir fotoğraf yer almaktadır.



Şekil 5.38. Hisar Apartmanı A blok fotoğrafı [98]

Binanın kolonları; 25x50 cm, 25x70 cm, 25x80 cm, 35x70 cm ve kirişleri ise 15x70 cm ve 25x70 cm boyutlarındadır (Şekil 5.39). Çalışmada Hisar Apartmanı A Blok inceleme kapsamına alınmıştır. Alınan karot numuneleri ve kalibre edilmiş beton çekici okumalarından elde edilen verilere dayanılarak, yapıda tüm betonarme elemanların karakteristik beton basınç mukavemetleri 14 MPa alınmıştır. Bina kullanımda olduğundan dolayı çelik numunesi alınamamıştır. Bu nedenle çelik sınıfı projede öngörülen S220 çeliği kabul edilmiştir. Zemin sınıfı Z1 olarak belirlenmiştir [98].



Şekil 5.39. Hisar Apartmanı A blok kalıp planı

5.7.1. Hisar Apartmanı nümerik modeli

Binanın ilk olarak Sap2000 programı kullanılarak sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve nümerik yolla modal karakteristikleri belirlenmiştir. Sonlu eleman modeli oluşturulurken Bölüm 5.1.'de belirtilen genel kabuller uygulanmıştır. Sonlu eleman modeli oluşturulurken dolgu duvarlar ince kabuk eleman olarak tanımlanmıştır. Oluşturulan SE modeli kullanılarak Sap 2000 programında yapılan modal analiz sonucunda ilk dokuz mod için elde edilen frekans değerleri ile X ve Y yönü ötelenme ve Z yönü dönme değerlerinin modal kütle katılım oranları değerleri Tablo 5.21'de verilmiştir.

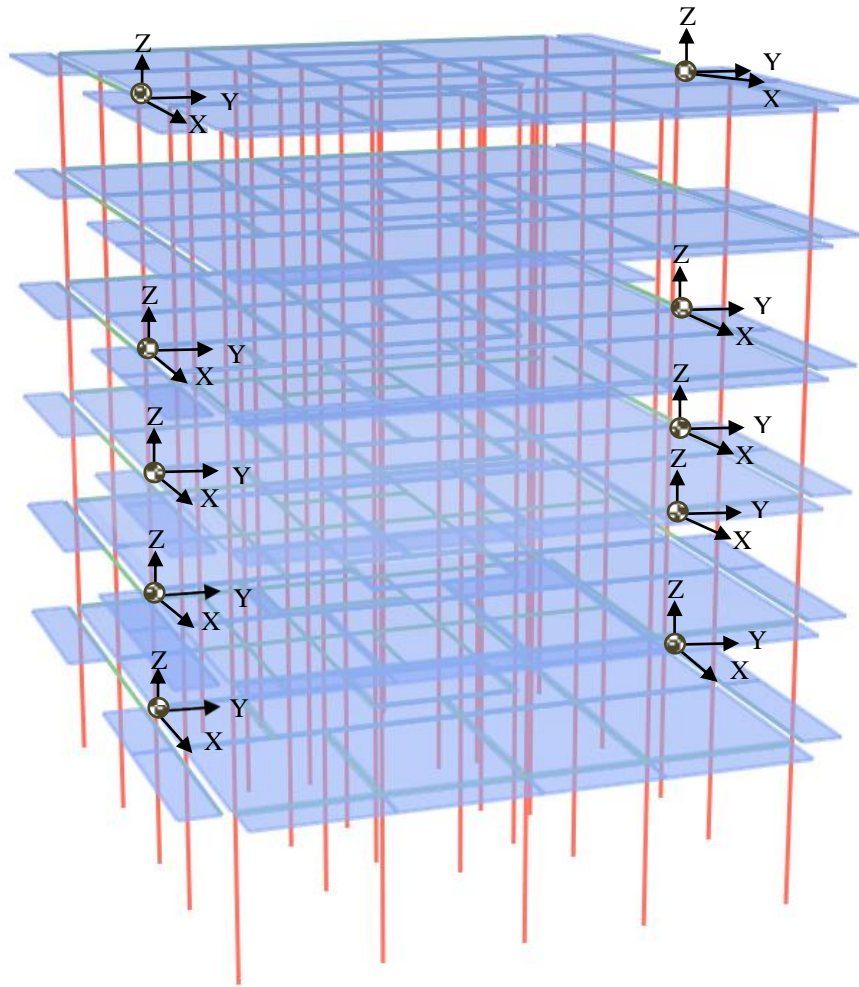
Tablo 5.21. Hisar Apt. Sap2000 modal analizi ile elde edilen frekans ve modal kütle katılımı oranı

Mod	Sap2000 Frekans (Hz)	Modal Kütle Katılım Oranı (%)		
		UX	UY	RZ
1	5.264	0.00	95.0	17.5
2	7.914	3.99	0.00	37.5
3	8.611	78.8	0.00	36.9
4	16.68	0.00	4.37	1.97
5	18.71	0.46	0.11	0.00
6	18.97	0.29	0.00	0.00
7	19.14	0.00	0.00	0.00
8	19.23	0.00	0.00	0.00
9	19.33	0.00	0.00	0.00

Nümerik modal analiz sonucunda elde edilen modal kütle katılım oranları değerlendirildiğinde, birinci modun %95.0'lik kütle katılımı ile Y yönünde ötelenme modu, ikinci modun %37.5'lik kütle katılımı ile burulma ve üçüncü mod ise %78.8'lik kütle katılımı X yönünde ötelenme modu olduğu sonucu elde edilmiştir.

5.7.2. Hisar Apartmanı yapı tanılama çalışmaları

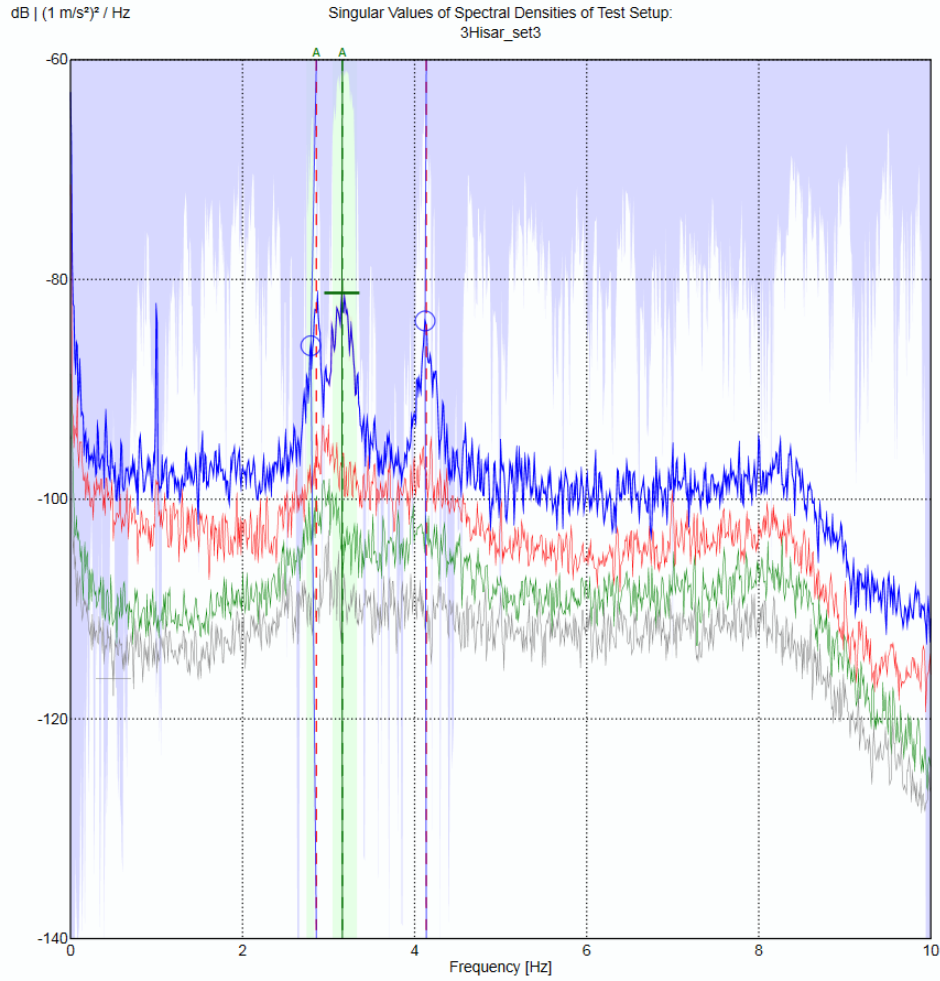
Nümerik yöntemle modal karakteristiklerin belirlenmesinin ardından deneysel yolla modal karakteristiklerin belirlenmesi işlemine geçilmiştir. İlk olarak binadan 30 dakika süre ile çevrel titreşim kaydı alınmıştır. Kayıt alırken ivmeölçerler binada uygun yapısal noktalar üstüne yerleştirilmiştir. Kullanılan ivmeölçerlerin binadaki yerleşim şekilleri ve yönelimleri üç boyutlu sonlu eleman yapı modeli üzerinde Şekil 5.40'ta gösterilmiştir.



Şekil 5.40. Hisar Apartmanı ivme ölçüm cihazlarının konum ve yönelimlerinin üç boyutlu görünüşü

Binadan 30 dakika süre ile alınan çevrel titreşim kayıtları beşer dakikalık altı adet sete bölünmüştür. Her bir sete Bölüm 5.1.'de belirtilen sinyal işleme teknikleri uygulanmıştır. İşlenen kayıtlar ARTEMIS programına aktarılmış ve binanın test modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan test modeli kullanılarak her bir set için Genişletilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma (GFTAA) yöntemi ile binanın dinamik karakteristikleri belirlenmiştir. Tüm setlerin dinamik karakteristik sonuçları incelenmiş ve çevresel etkilerin en az olduğu set yapı tanılama işleminde kullanılmıştır. Yapı tanılama işlemi gerçekleştirilirken tüm binalarda Bölüm 5.1.'de belirtilen şart göz önüne alınarak X ve Y yönü için %70 kütle katılımı olan modlar dikkate alınmıştır. Binanın X yönünde %95'lik modal kütle katılımı ile birinci modunu, Y yönünde ise %78.8'lik modal kütle katılımı ile üçüncü modunu incelemek yeterli görülmüştür

(Tablo 5.21). Bu bilgi ışığı altında yapı tanılama işleminde binanın ilk üç modu belirlenmiştir. ARTEMIS programında GFTAA yöntemi kullanılarak elde edilen Hisar Apartmanı'na ait Spektral Yoğunluk Fonksiyonu Tekil Değerleri (SYFTD) Şekil 5.41'de verilmiştir.



Şekil 5.41. Hisar Apartmanına ait Spektral Yoğunluk Fonksiyonu Tekil Değerleri

Hisar Apartmanı'na ait SYFTD kullanılarak elde edilen doğal frekans ve sönüm oranı değerleri ise Tablo 5.22'de verilmiştir. Dikkate alınan ilk üç mod için deneysel frekans değerleri incelendiğinde, nümerik model sonucu elde edilen değerlerden daha düşük olduğu belirlenmiştir. Yani sonlu eleman modeli gerçek modele oranla daha rijit bir davranış sergilemektedir.

Tablo 5.22. Hisar Apartmanı deneysel yolla elde edilen frekans ve sönüm oranı değerleri

Mod	Deneysel Frekans (Hz)	Sönüm Oranı (%)
1	2.857	1.267
2	3.153	2.370
3	4.126	1.572

Deneysel yolla modal karakteristiklerin belirlenmesinin ardından deneysel ve nümerik model arasındaki farkı belirlemek için frekans ve mod şekilleri karşılaştırılmıştır. İki frekans değeri arasındaki fark deneysel sonuç dikkate alınarak % cinsinden (Denklem 4.1), mod şekilleri arasındaki korelasyon ise mod gerçekleşme kriteri (MAC) kullanılarak % cinsinden belirlenmiştir (Denklem 4.2). Hisar Apartmanı'nın ilk 3 mod için Femtools programı kullanılarak elde edilen deneysel ve nümerik analiz sonuçlarının karşılaştırılması Tablo 5.23'te verilmiştir.

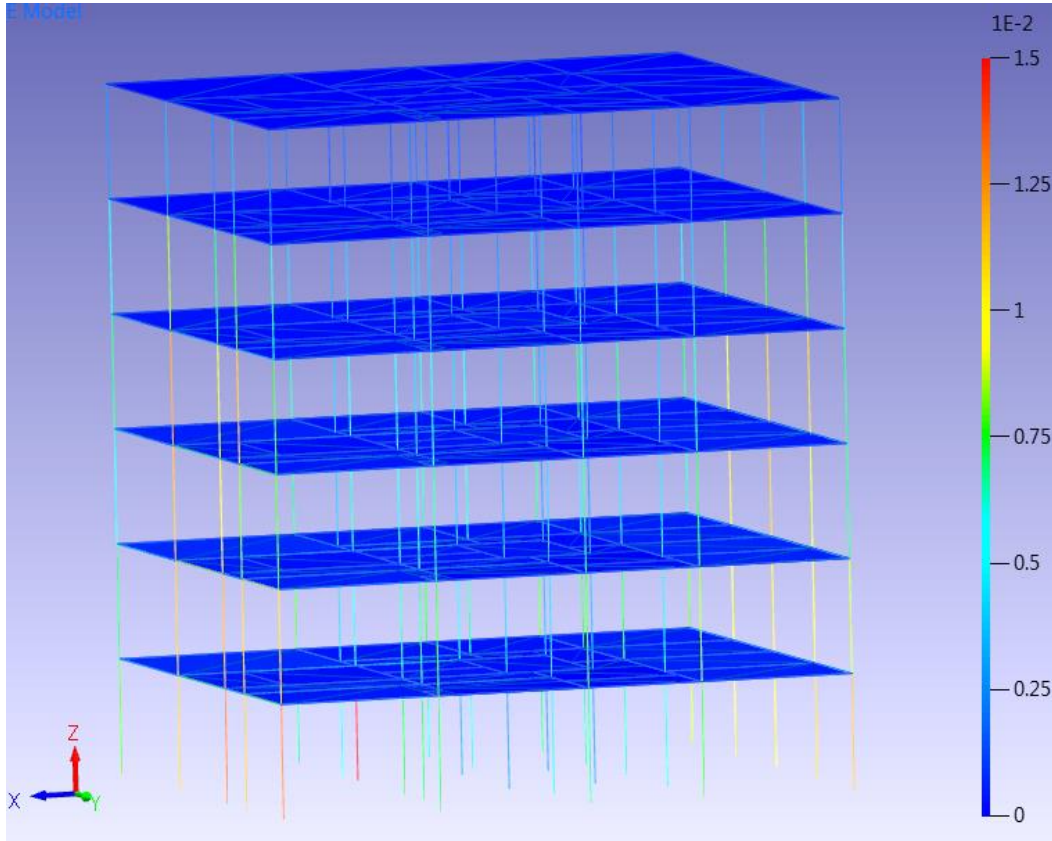
Tablo 5.23. Hisar Apartmanı deneysel ve SE modelinden elde edilen frekanslar

Mod	Sap2000 (Hz)	Deneysel (Hz)	Fark	MAC
1	5.264	2.857	-84.25	86.8
2	7.914	4.126	-91.81	87.1
3	8.611	3.153	-173.1	91.4

5.7.3. Hisar Apartmanı model güncelleme çalışması

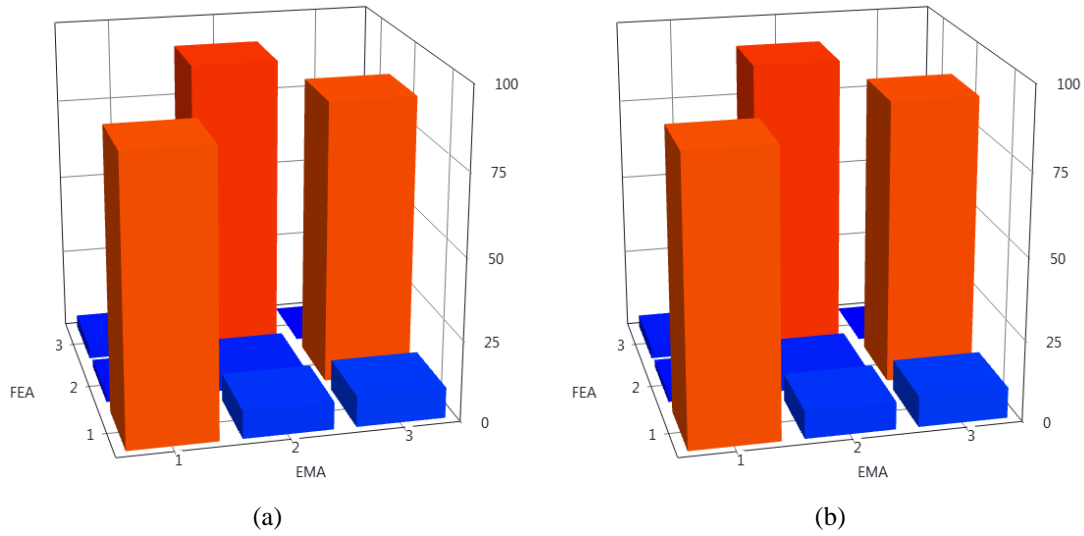
Binanın frekans ve mod şekillerinin karşılaştırılmasının ardından SE modelinin deneysel sonuçlara göre iyileştirilmesi yani model güncelleme çalışmalarına başlanmıştır. Tüm yapısal elemanların eğilme rijitlikleri güncelleme parametresi olarak seçilmiştir. Güncelleme cevabı olarak ise deneysel yolla elde edilen sonuç verileri yani frekans değerleri ve mod şekilleri seçilmiştir.

Güncelleme parametrelerindeki değişimin cevap üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla normalize duyarlılık analizi yapılmıştır (Şekil 5.42). Yapılan duyarlılık analizine göre alt kattaki kolon elemanların eğilme rijitliğindeki %1’lik değişim model güncelleme üzerinde (cevap parametresinde) % 1.5’lik değer ile en fazla etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.42. Hisar Apartmanı yapı elemanlarının duyarlılık analizi

Binanın SE modeli, yapısal elemanların eğilme rijitlikleri ile binanın modal karakteristikleri arasındaki ilişki kullanılarak Femtools programında iteratif olarak güncellenmiştir. Güncelleme öncesi ve sonrası elde edilen MAC matrisleri Şekil 5.43’te, güncelleme sonucunda Sap2000 programından elde edilen binanın yeni frekans değerleri ve mod şekillerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması Tablo 5.24’te verilmiştir.



EMA: Deneysel modal analiz, FEA: Sonlu eleman analizi

Şekil 5.43. Hisar Apartmanı model güncelleme öncesinde (a) ve sonrasında (b) elde edilen MAC matrisleri

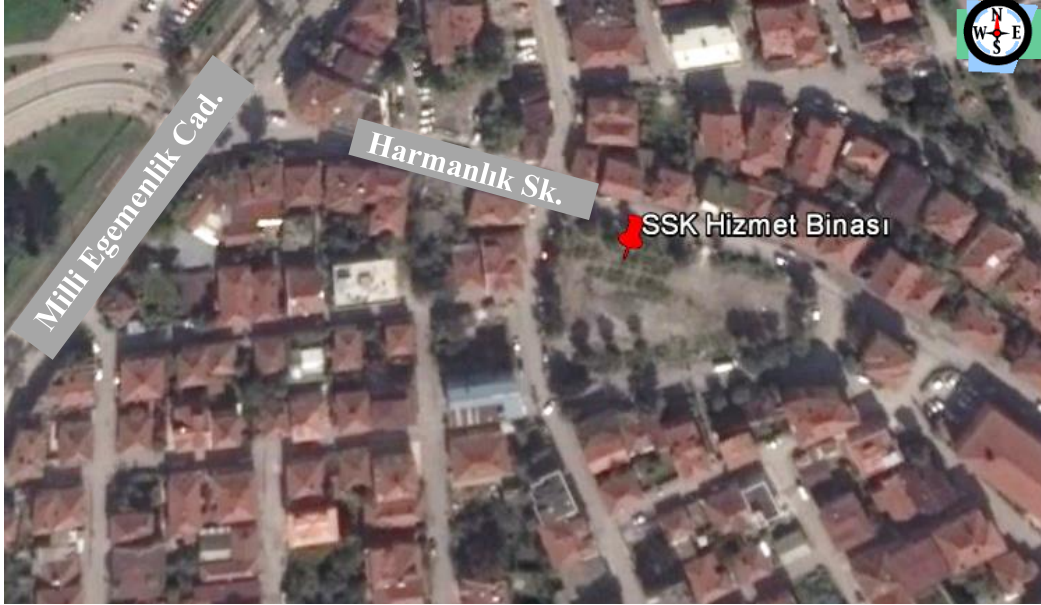
Tablo 5.24 Hisar apartmanı güncelleme sonrası elde edilen frekanslar

Mod	Sap2000 (Hz)	Deneysel (Hz)	Fark	MAC
1	2.948	2.857	-3.19	86.8
2	4.433	4.126	-7.44	87.1
3	4.824	3.153	-53.0	91.4

Güncelleme çalışması ile kesit eğilme rijitliklerinin %65 oranında azaltılması ile frekans değerlerinde iyileşme yakalanmıştır. Eğilme rijitliğindeki azalmanın dolgu duvarların modellenmesinde yapılan kabullerden ve binada gözle görülemeyen kesit rijitliği azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Dolgu duvarlarında çok fazla pencere boşluğu vardır. Bunlar sonlu eleman modelinde dikkate alınmalıdır. Bundan sonraki aşamada %70 kütle katılımı sağlayan X ve Y yönündeki modlarla uyumlu performans analizi gerçekleştirilecektir (Tablo 5.21).

5.8. SSK Hizmet Binası Genel Bilgi

SSK Hizmet binası Sakarya ili Mithatpaşa Mahallesi'nde (enlem; 40°46'9.25"K, boylam; 30°23'29.80"D) bulunmaktadır (Şekil 5.44). Bina, 1968 deprem yönetmeliğine göre, 1969 tarihinde projelendirilmiştir. Bina hiçbir düzensizliği bulunmayan, rijitlik ve kütle merkezlerinin çakıştığı ender binalardan biridir.



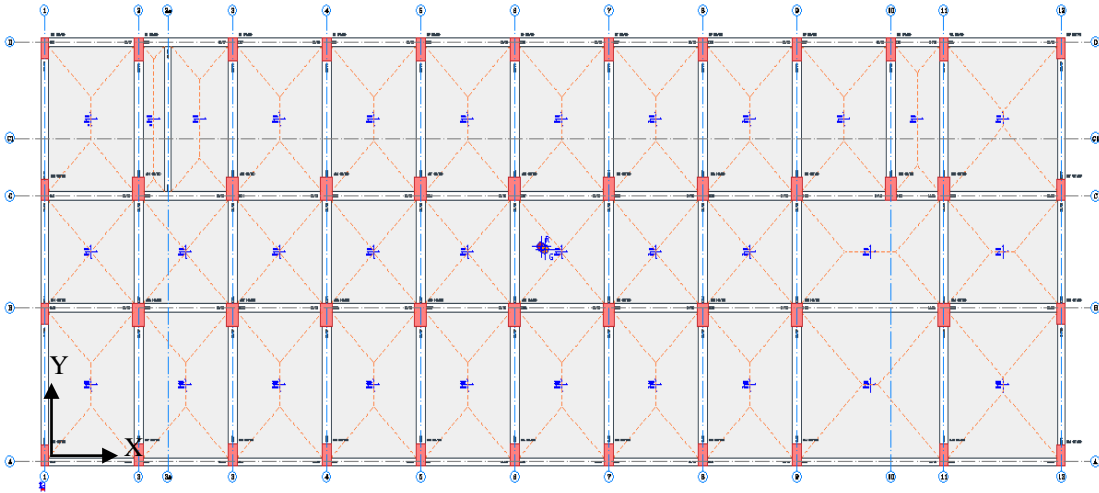
Şekil 5.44. SSK Hizmet Binası harita üzerindeki konumu [96]

Marmara Depremi'nde binada herhangi bir hasar oluşmamıştır. (Şekil 5.45). Depremde, B ve 6 akslarının kesişiminde yer alan S30 kolonunun üst ucunda, imalat hatası sonucu sıvanın dökülmesi sebebiyle binaya orta hasar verilmiş ve bina boşaltılmıştır (Şekil 5.46). Binanın gözlenen deprem performansı Hemen Kullanım (HK) olarak belirlenmiştir. Bina 2012 yılında kentsel dönüşüm kapsamında yıkılmıştır. Sakarya'da kentsel dönüşüm SSK Hizmet Binası'nın yıkımı ile başlamıştır. Bina yıkılmadan önce tüm incelemeleri yapıldığı için tez kapsamında çıkartılmamıştır.



Şekil 5.45. SSK Hizmet Binası fotoğrafı [98]

Binanın kolonları; 30x65 cm, 40x65 cm, 27x60 cm ve kirişleri ise 24x60 cm ve 30x60 cm boyutlarındadır. SSK binasında her kattan karot numuneleri alınmış ve laboratuvarında test edilmiştir. Test sonuçları, projede belirtilen C14 ve S220'yi sağlamıştır. Zemin sınıfı Z3 olarak belirlenmiştir [98].



Şekil 5.46. SSK Hizmet Binası kalıp planı

5.7.1. SSK Hizmet Binası nümerik modeli

Binanın ilk olarak Sap2000 programı kullanılarak sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve nümerik yolla modal karakteristikleri belirlenmiştir. Sonlu eleman modeli oluşturulurken Bölüm 5.1.'de belirtilen genel kabuller uygulanmıştır. B ve 6 akslarının kesişiminde yer alan S30 kolonunun üst ucunda hasar oluştuğundan dolayı kolonun üst ucunun sabit mesnet ile mesnetlendiği kabul edilmiştir. Oluşturulan SE modeli kullanılarak Sap 2000 programında yapılan modal analiz sonucunda ilk dokuz mod için elde edilen frekans değerleri ile X ve Y yönü ötelenme ve Z yönü dönme değerlerinin modal kütle katılım oranları değerleri Tablo 5.25'te verilmiştir.

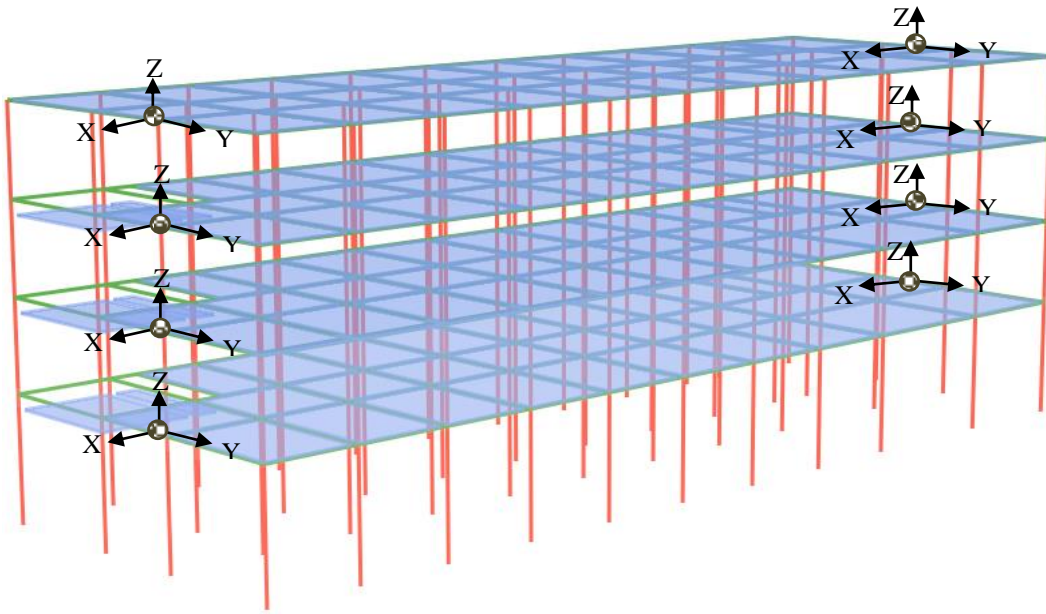
Tablo 5.25. SSK Hizmet Binası Sap2000 modal analizi ile elde edilen frekans ve modal kütle katılımı oranı

Mod	Sap2000 Frekans (Hz)	Modal Kütle Katılım Oranı (%)		
		UX	UY	RZ
1	4.240	0.00	83.2	0.00
2	4.783	87.3	0.00	5.74
3	4.832	0.10	0.00	85.0
4	12.12	0.00	11.1	0.00
5	13.43	9.62	0.00	0.00
6	13.89	0.00	0.00	10.1
7	19.41	0.00	3.35	0.00
8	20.78	1.80	0.00	0.00
9	21.03	0.36	0.00	0.00

Nümerik modal analiz sonucunda elde edilen modal kütle katılım oranları değerlendirildiğinde, birinci modun %83.2'lik kütle katılımı ile Y yönünde ötelenme modu, ikinci modun %87.3'lük kütle katılımı ile X yönünde ötelenme modu ve üçüncü mod ise %85.0'lık kütle katılımı ile burulma modu olduğu sonucu elde edilmiştir.

5.8.1. SSK Hizmet Binası yapı tanılama çalışmaları

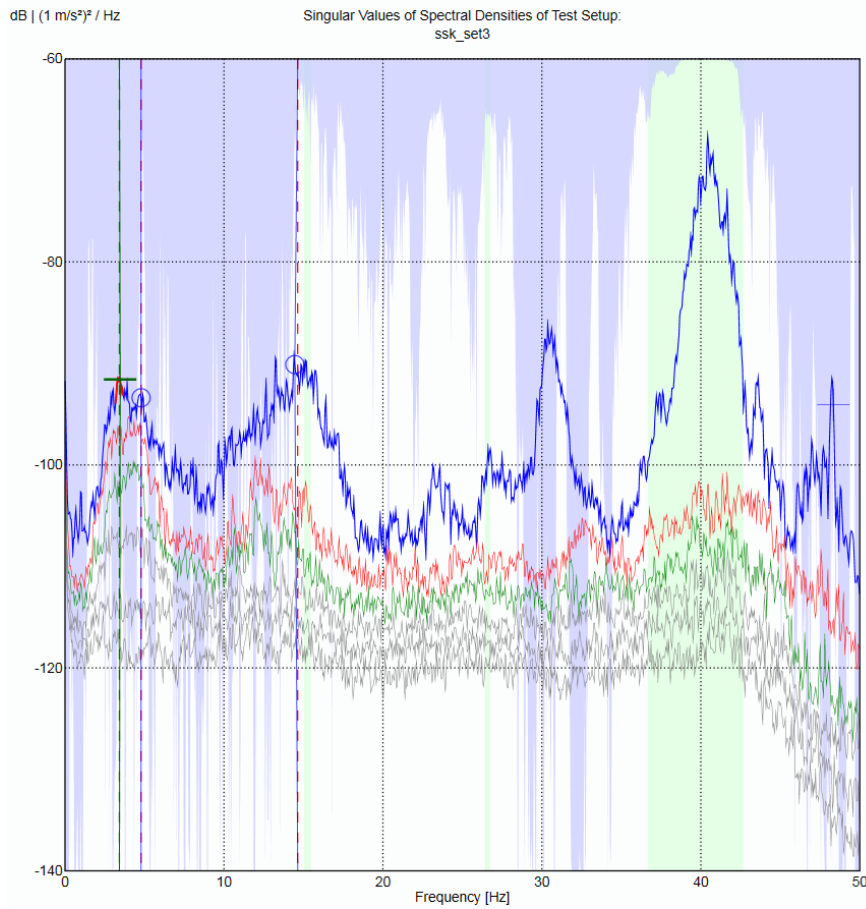
Nümerik yöntemle modal karakteristiklerin belirlenmesinin ardından deneysel yolla modal karakteristiklerin belirlenmesi işlemine geçilmiştir. İlk olarak binadan 30 dakika süre ile çevrel titreşim kaydı alınmıştır. Kayıt alırken ivmeölçerler binada uygun yapısal noktalar üstüne yerleştirilmiştir. Kullanılan ivmeölçerlerin binadaki yerleşim şekilleri ve yönelimleri üç boyutlu sonlu eleman yapı modeli üzerinde Şekil 5.47’de gösterilmiştir.



Şekil 5.47. SSK hizmet binası ivme ölçüm cihazlarının konum ve yönelimlerinin üç boyutlu görünüşü

Binadan 30 dakika süre ile alınan çevrel titreşim kayıtları beşer dakikalık altı adet sete bölünmüştür. Her bir sete Bölüm 5.1.’de belirtilen sinyal işleme teknikleri uygulanmıştır. İşlenen kayıtlar ARTeMIS programına aktarılmış ve binanın test modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan test modeli kullanılarak her bir set için Genişletilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (GFTAA) yöntemi ile binanın dinamik karakteristikleri belirlenmiştir. Tüm setlerin dinamik karakteristik sonuçları incelenmiş ve çevresel etkilerin en az olduğu set yapı tanılama işleminde kullanılmıştır. Yapı tanılama işlemi gerçekleştirilirken tüm binalarda Bölüm 5.1.’de belirtilen şart göz önüne alınarak X ve Y yönü için %70 kütle katılımı olan modlar dikkate alınmıştır.

Binanın X yönünde %83.2'lik modal kütle katılımı ile birinci modunu, Y yönünde ise %87.3'lük modal kütle katılımı ile ikinci modunu incelemek yeterli olmuştur ancak diğer binalarda ilk 3 mod dikkate alındığı için bu binada da 3 mod incelenmiştir (Tablo 5.21). Bu bilgi ışığı altında yapı tanılama işleminde binanın ilk üç modu belirlenmiştir. ARTeMIS programında GFTAA yöntemi kullanılarak elde edilen SSK Hizmet Binası'na ait Spektral Yoğunluk Fonksiyonu Tekil Değerleri (SYFTD) Şekil 5.48'de verilmiştir.



Şekil 5.48. SSK Hizmet Binası'na ait Spektral Yoğunluk Fonksiyonu Tekil Değerleri

SSK Hizmet Binası'na ait SYFTD kullanılarak elde edilen doğal frekans ve sönüm oranı değerleri ise Tablo 5.26'da verilmiştir. Dikkate alınan ilk üç mod için deneysel frekans değerleri incelendiğinde, nümerik model sonucu elde edilen değerlerden daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Yani gerçek model sonlu eleman modeline oranla daha rijit bir davranış sergilemektedir.

Tablo 5.26. SSK hizmet binası deneysel yolla elde edilen frekans ve sönüm oranı değerleri

Mod	Deneysel Frekans (Hz)	Sönüm Oranı (%)
1	3.419	4.424
2	4.785	1.71
3	14.64	5.66

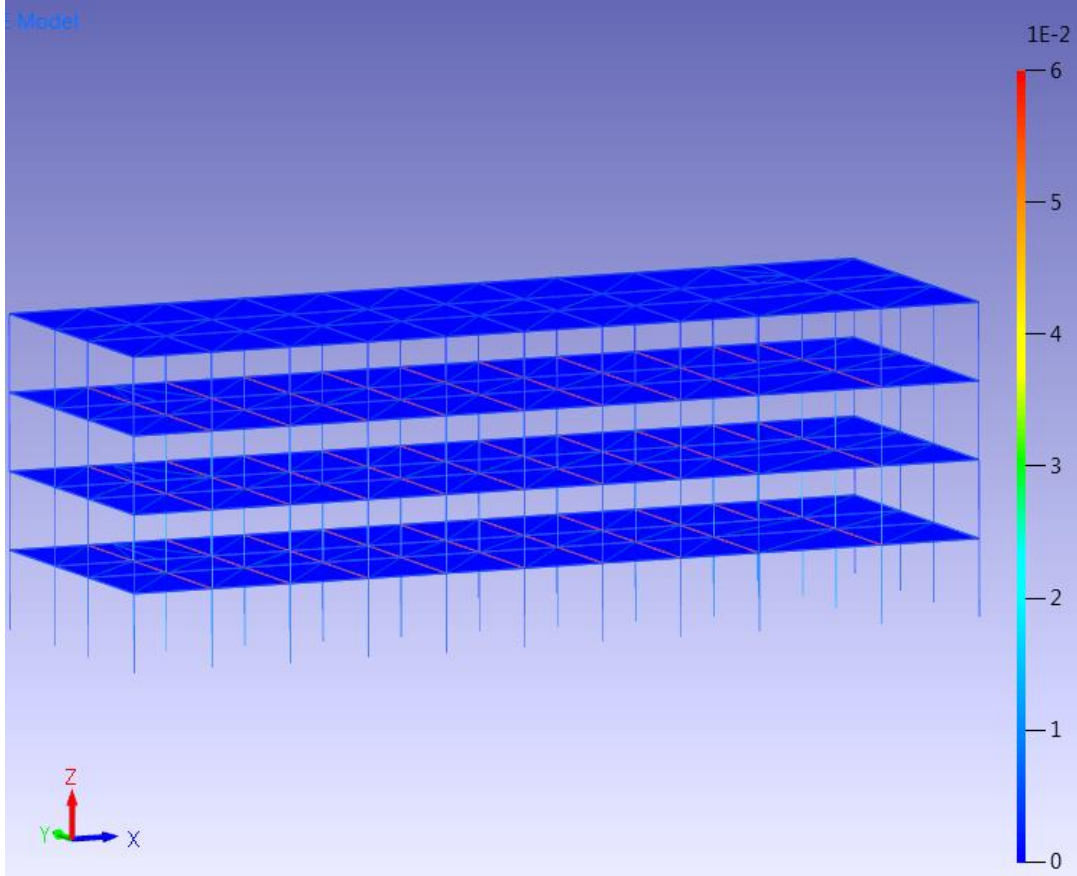
Deneysel yolla modal karakteristiklerin belirlenmesinin ardından deneysel ve nümerik model arasındaki farkı belirlemek için frekans ve mod şekilleri karşılaştırılmıştır. İki frekans değeri arasındaki fark deneysel sonuç dikkate alınarak % cinsinden (Denklem 4.1), mod şekilleri arasındaki korelasyon ise mod gerçekleşme kriteri (MAC) kullanılarak % cinsinden belirlenmiştir (Denklem 4.2). SSK Hizmet Binası'nın ilk 3 mod için Femtools programı kullanılarak elde edilen deneysel ve nümerik analiz sonuçlarının karşılaştırılması Tablo 5.27'te verilmiştir.

Tablo 5.27. SSK hizmet binası deneysel ve SE modelinden elde edilen frekanslar

Mod	Sap2000 (Hz)	Deneysel (Hz)	Fark (%)	MAC (%)
1	4.240	4.785	11.39	41.7
2	4.783	3.419	-39.8	78.1
3	4.832	14.64	66.9	69.5

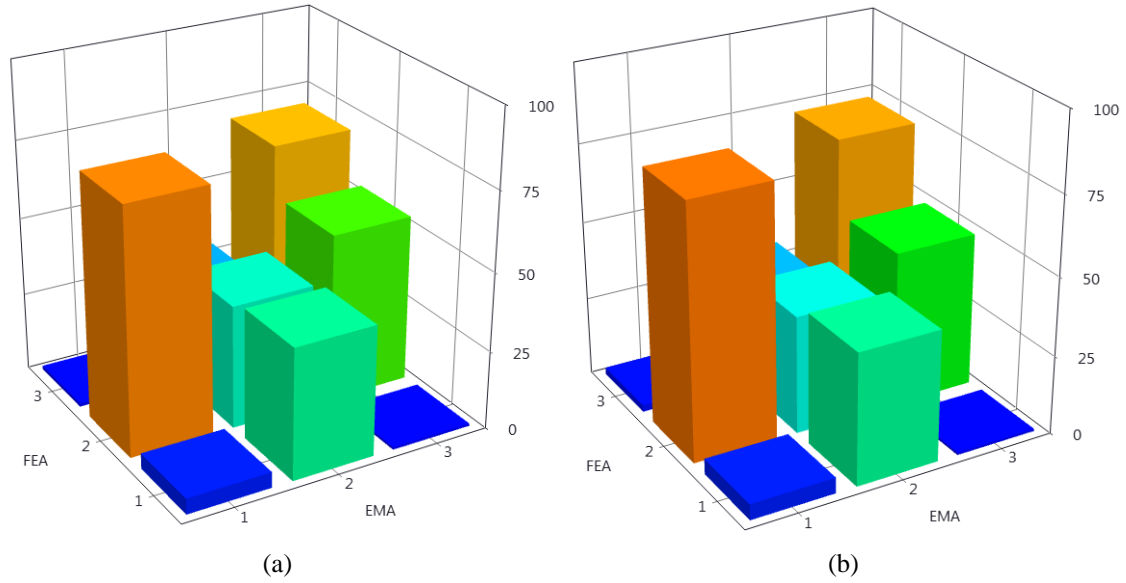
5.8.2. SSK Hizmet Binası model güncelleme çalışması

Binanın frekans ve mod şekillerinin karşılaştırılmasının ardından SE modelinin deneysel sonuçlara göre iyileştirilmesi yani model güncelleme çalışmalarına başlanmıştır. Tüm yapısal elemanların eğilme rijitlikleri güncelleme parametresi olarak seçilmiştir. Güncelleme cevabı olarak ise deneysel yolla elde edilen sonuç verileri yani frekans değerleri ve mod şekilleri seçilmiştir. Güncelleme parametrelerindeki değişimin cevap üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla normalize duyarlılık analizi yapılmıştır (Şekil 5.42). Yapılan duyarlılık analizine göre ilk üç kat kiriş elemanların eğilme rijitliğindeki %1'lik değişim model güncelleme üzerinde (cevap parametresinde) % 6'luk değer ile en fazla etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.49. SSK Hizmet Binası yapı elemanlarının duyarlılık analizi

Binanın SE modeli, yapısal elemanların eğilme rijitlikleri ile binanın modal karakteristikleri arasındaki ilişki kullanılarak Femtools programında iteratif olarak güncellenmiştir. Güncelleme öncesi ve sonrası elde edilen MAC matrisleri Şekil 5.50’de, güncelleme sonucunda Sap2000 programından elde edilen binanın yeni frekans değerleri ve mod şekillerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması Tablo 5.28’de verilmiştir.



EMA: Deneysel modal analiz, FEA: Nümerik analiz

Şekil 5.50. SSK hizmet binası model güncelleme öncesinde (a) ve sonrasında (b) elde edilen MAC matrisleri

Tablo 5.28. SSK hizmet binası güncelleme sonrası elde edilen frekanslar

Mod	Sap2000 (Hz)	Deneysel (Hz)	Fark (%)	MAC (%)
1	3.450	4.785	27.89	41.7
2	4.300	3.419	-25.76	80.5
3	4.610	14.64	68.51	72.7

Güncelleme çalışması ile kesit eğilme rijitliklerinin %30 oranında azaltılması ile frekans değerlerinde ikinci ve üçüncü mod şeklinde bir iyileşme yakalanmıştır. Frekans değerindeki iyileşmeye her iki modelin ilk modları göz önüne alınarak karar verilmiştir. Eğilme rijitliğindeki azalmanın dolgu duvarların modellenmesinde yapılan kabullerden ve binada gözle görülemeyen kesit rijitliği azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bundan sonraki aşamada %70 kütle katılımı sağlayan X ve Y yönündeki modlarla uyumlu performans analizi gerçekleştirilecektir (Tablo 5.25).

5.9. Yan Sokak Apartmanı Genel Bilgi

Yan Sokak Apartmanı Sakarya ili merkezi Yan Sokak'ta (enlem; 40°46'23.34"K, boylam; 30°23'48.15"D) bulunmaktadır (Şekil 5.51). 1975 Deprem Yönetmeliği'ne göre tasarlanmıştır. Marmara Depremi sonucu binada herhangi bir hasar oluşmamıştır. Bina Hemen Kullanım (HK) performans düzeyindedir.



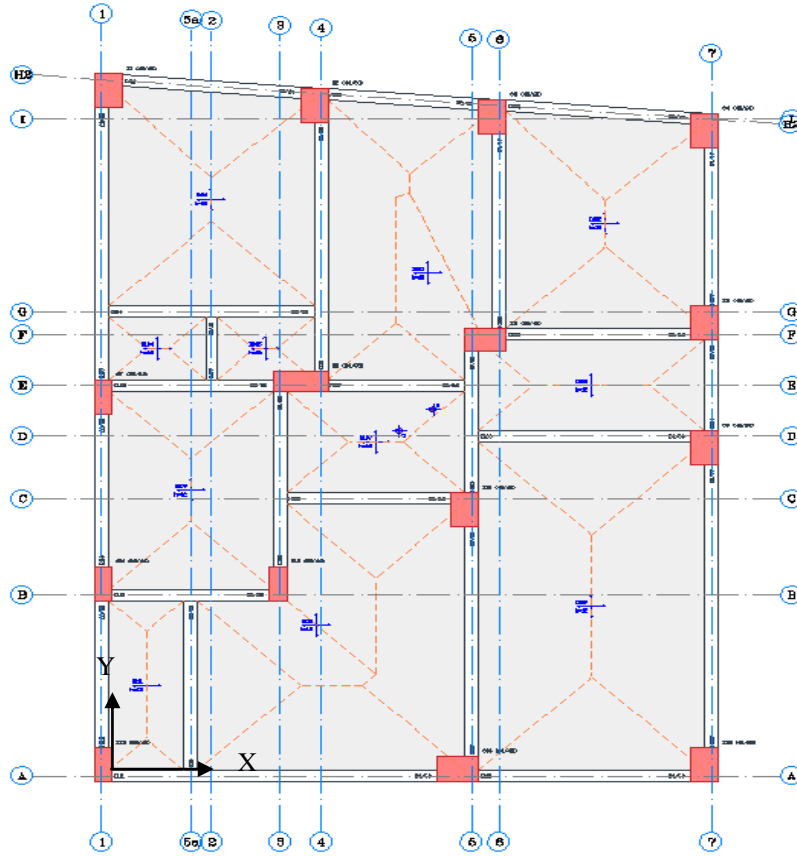
Şekil 5.51. Yan Sokak Apartmanı harita üzerindeki konumu [96]

Apartman düzenli, küçük, zemin kat+5 normal kat olarak tasarlanmış bir binadır. İlk katı dükkan/depo olarak tanzim edilmiştir. Yapının normal katlarında dolgu duvarlar mevcuttur, giriş katında ise düzensiz ve tek yönde dolgu duvarları bulunmaktadır. (Şekil 5.52). Yapı proje kapsamında açılan derin kuyu sondajına 300m mesafede olması, yapının bulunduğu alanda sıvılaşma gözlenmemesi ve yapı temelinin depremde hareket etmemesi nedeniyle seçilmiştir.



Şekil 5.52. Yan Sokak Apartmanı fotoğrafı [98]

Binanın kolonları; 25x60 cm, 35x60 cm, 60x35 cm, 80x30 cm ve kirişleri ise 20x60 cm boyutlarındadır (Şekil 5.53). Yan Sokak binasında karot numuneleri ve kalibre edilmiş beton çekici okumalarından elde edilen verilere dayanılarak, yapıda tüm betonarme elemanların karakteristik beton basınç mukavemetleri 16 MPa alınmıştır. Bina kullanımda olduğundan dolayı çelik numunesi alınamamıştır. Bu nedenle çelik sınıfı projede öngörülen S420 çeliği kabul edilmiştir. Zemin sınıfı Z3 olarak belirlenmiştir [98].



Şekil 5.53. Yan Sokak Apartmanı kalıp planı

5.9.1. Yan Sokak Apartmanı nümerik modeli

Binanın ilk olarak Sap2000 programı kullanılarak sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve nümerik yolla modal karakteristikleri belirlenmiştir. Sonlu eleman modeli oluşturulurken Bölüm 5.1.'de belirtilen genel kabuller uygulanmıştır. Sonlu eleman modeli oluşturulurken dolgu duvarlar ince kabuk eleman olarak tanımlanmıştır. Oluşturulan SE modeli kullanılarak Sap 2000 programında yapılan modal analiz sonucunda ilk dokuz mod için elde edilen frekans değerleri ile X ve Y yönü ötelenme ve Z yönü dönme değerlerinin modal kütle katılım oranları değerleri Tablo 5.29'da verilmiştir.

Tablo 5.29. Yan sokak apartmanı Sap2000 modal analizi ile elde edilen frekans ve modal kütle katılımı oranı

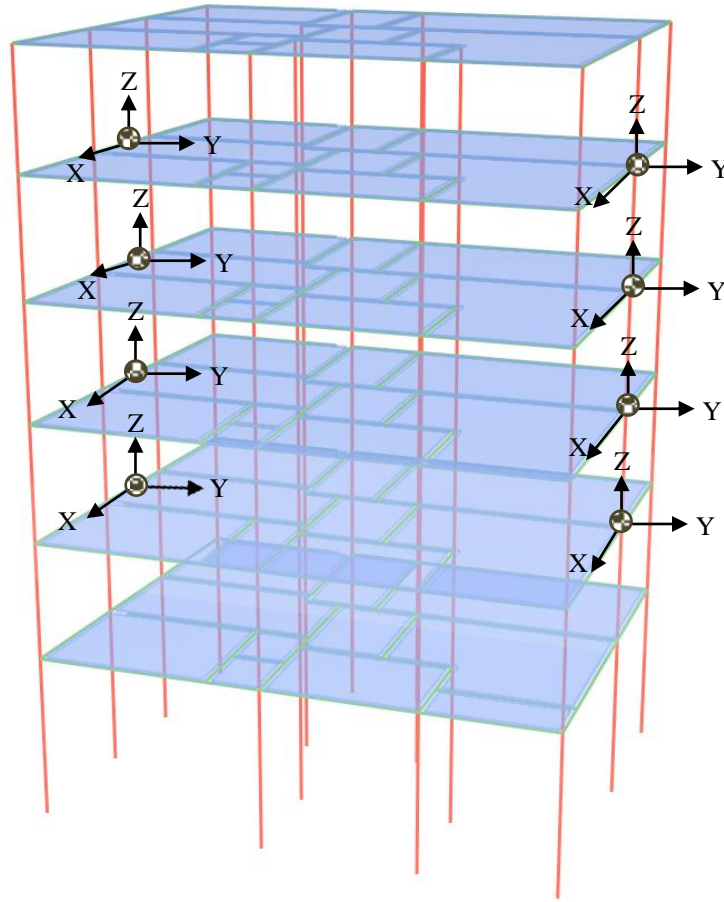
Mod	Sap2000 Frekans (Hz)	Modal Kütle Katılım Oranı (%)		
		UX	UY	RZ
1	2.498	82.8	0.00	29.4
2	3.022	0.00	80.1	12.5
3	3.488	0.51	1.91	40.0
4	7.407	11.29	0.00	5.05
5	8.924	0.00	11.1	1.91
6	10.25	0.00	0.25	4.3
7	12.87	2.95	0.00	1.72
8	15.08	0.47	2.84	0.48
9	15.83	0.00	0.47	0.00

Nümerik modal analiz sonucunda elde edilen modal kütle katılım oranları değerlendirildiğinde, birinci modun %82.8'lik kütle katılımı ile X yönünde öteleme modu, ikinci mod %80.1'lik kütle katılımı ile Y yönünde öteleme, üçüncü mod ise %40.0'lik kütle katılımı ile burulma modu olduğu sonucu elde edilmiştir.

5.9.2. Yan Sokak Apartmanı yapı tanılama çalışmaları

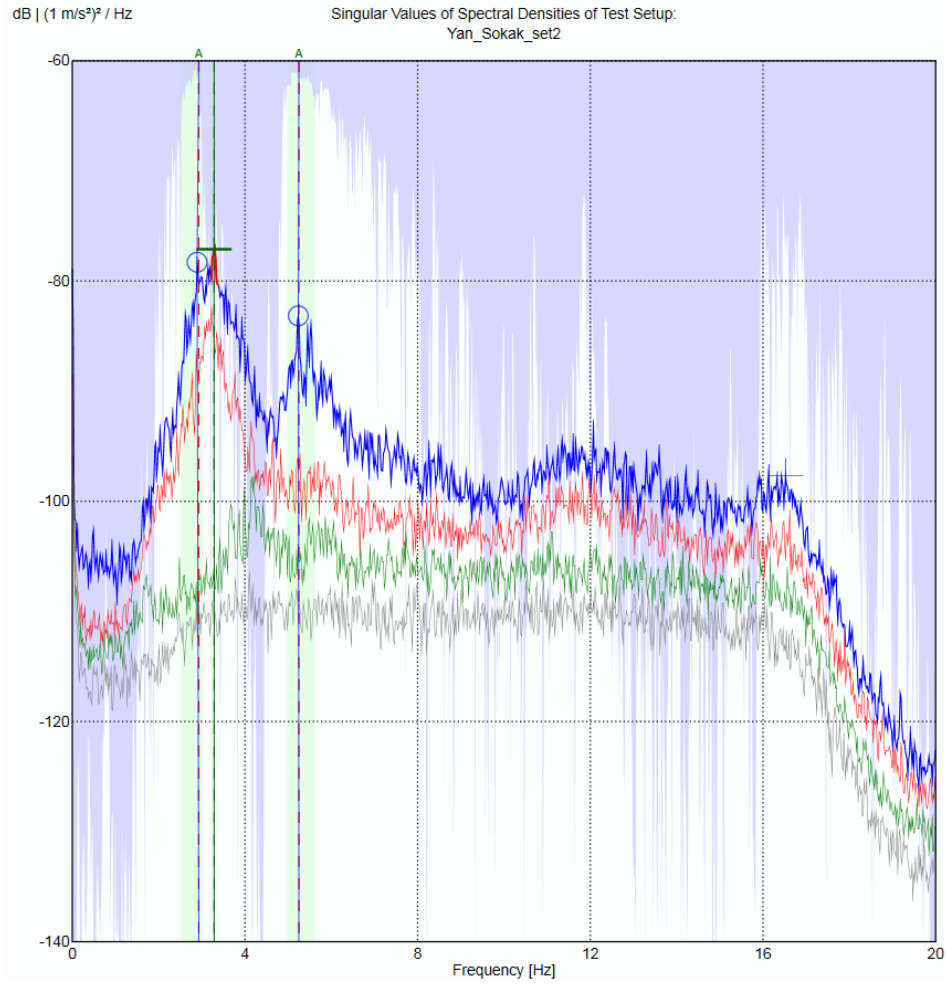
Nümerik yöntemle modal karakteristiklerin belirlenmesinin ardından deneysel yolla modal karakteristiklerin belirlenmesi işlemine geçilmiştir. İlk olarak binadan 30 dakika süre ile çevrel titreşim kaydı alınmıştır. Kayıt alırken ivmeölçerler binada uygun yapısal noktalar üstüne yerleştirilmiştir. Kullanılan ivmeölçerlerin binadaki yerleşim şekilleri ve yönelimleri üç boyutlu sonlu eleman yapı modeli üzerinde Şekil 5.40'ta gösterilmiştir.

Binadan 30 dakika süre ile alınan çevrel titreşim kayıtları beşer dakikalık altı adet sete bölünmüştür. Her bir sete Bölüm 5.1.'de belirtilen sinyal işleme teknikleri uygulanmıştır. İşlenen kayıtlar ARTEMIS programına aktarılmış ve binanın test modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan test modeli kullanılarak her bir set için Genişletilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (GFTAA) yöntemi ile binanın dinamik karakteristikleri belirlenmiştir. Tüm setlerin dinamik karakteristik sonuçları incelenmiş ve çevresel etkilerin en az olduğu set yapı tanılama işlemine kullanılmıştır.



Şekil 5.54. Yan Sokak Apartmanı ivme ölçüm cihazlarının konum ve yönelimlerinin üç boyutlu görünüşü

Yapı tanılama işlemi gerçekleştirilirken tüm binalarda Bölüm 5.1.'de belirtilen şart göz önüne alınarak X ve Y yönü için %70 kütle katılımı olan modlar dikkate alınmıştır. Binanın X yönünde %82.8'lik modal kütle katılımı ile birinci modunu, Y yönünde ise %80.1'lik modal kütle katılımı ile ikinci modunu incelemek yeterli olmuştur ancak diğer binalarda ilk 3 mod dikkate alındığı için bu binada da 3 mod incelenmiştir (Tablo 5.29). Bu bilgi ışığı altında yapı tanılama işleminde binanın ilk üç modu belirlenmiştir. ARTeMIS programında GFTAA yöntemi kullanılarak elde edilen Yan Sokak Apartmanı'na ait Spektral Yoğunluk Fonksiyonu Tekil Değerleri (SYFTD) Şekil 5.55'te verilmiştir.



Şekil 5.55. Yan Sokak Apartmanına ait Spektral Yoğunluk Fonksiyonu Tekil Değerleri

Yan Sokak Apartmanı'na ait SYFTD kullanılarak elde edilen doğal frekans ve sönüm oranı değerleri ise Tablo 5.30'da verilmiştir. Dikkate alınan ilk üç mod için deneysel frekans değerleri incelendiğinde, nümerik model sonucu elde edilen değerlerden daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Yani gerçek model sonlu eleman modeline oranla daha rijit bir davranış sergilemektedir.

Tablo 5.30. Yan sokak apartmanı deneysel yolla elde edilen frekans ve sönüm oranı değerleri

Mod	Deneysel Frekans (Hz)	Sönüm Oranı (%)
1	2.930	3.075
2	3.287	1.396
3	5.248	3.048

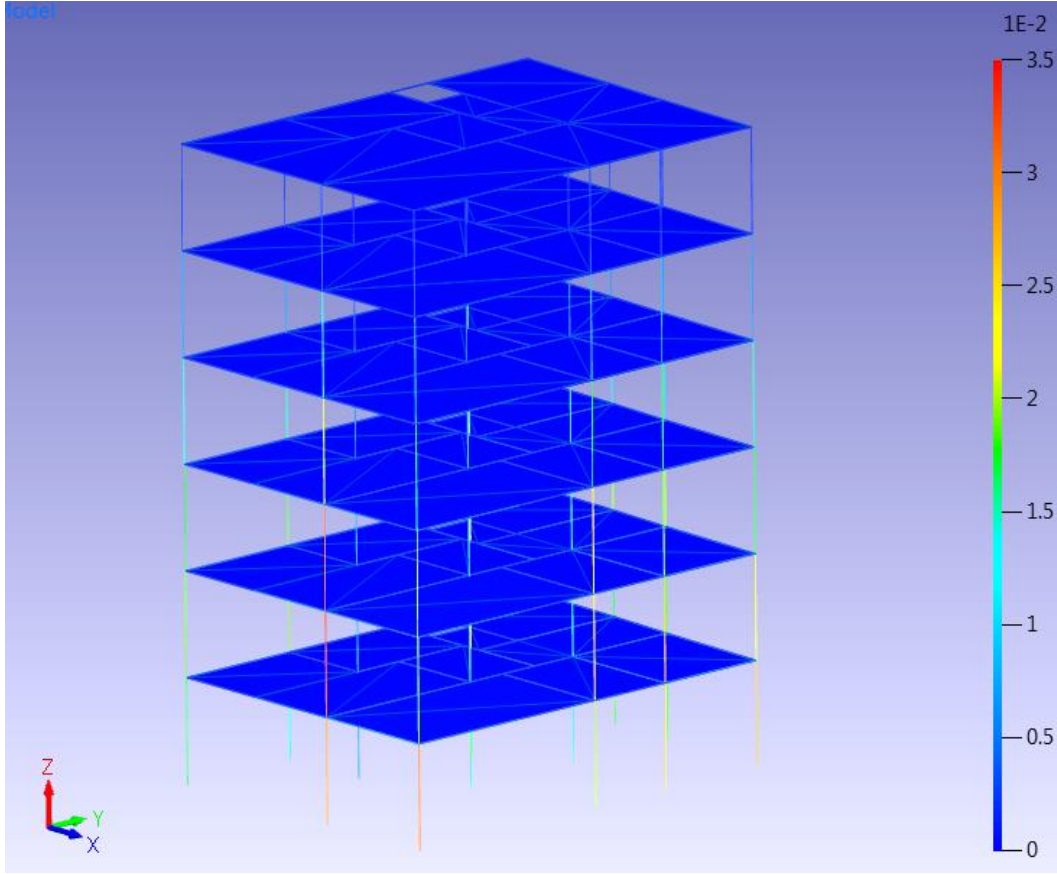
Deneysel yolla modal karakteristiklerin belirlenmesinin ardından deneysel ve nümerik model arasındaki farkı belirlemek için frekans ve mod şekilleri karşılaştırılmıştır. İki frekans değeri arasındaki fark deneysel sonuç dikkate alınarak % cinsinden (Denklem 4.1), mod şekilleri arasındaki korelasyon ise mod gerçekleşme kriteri (MAC) kullanılarak % cinsinden belirlenmiştir (Denklem 4.2). Yan Sokak Apartmanı'nın ilk 3 mod için Femtools programı kullanılarak elde edilen deneysel ve nümerik analiz sonuçlarının karşılaştırılması Tablo 5.31'de verilmiştir.

Tablo 5.31. Yan sokak apartmanı deneysel ve SE modelinden elde edilen frekanslar

Mod	Sap2000 (Hz)	Deneysel (Hz)	Fark (%)	MAC (%)
1	2.498	2.930	14.74	92.8
2	3.022	3.287	8.06	70.8
3	3.488	5.248	33.5	74.2

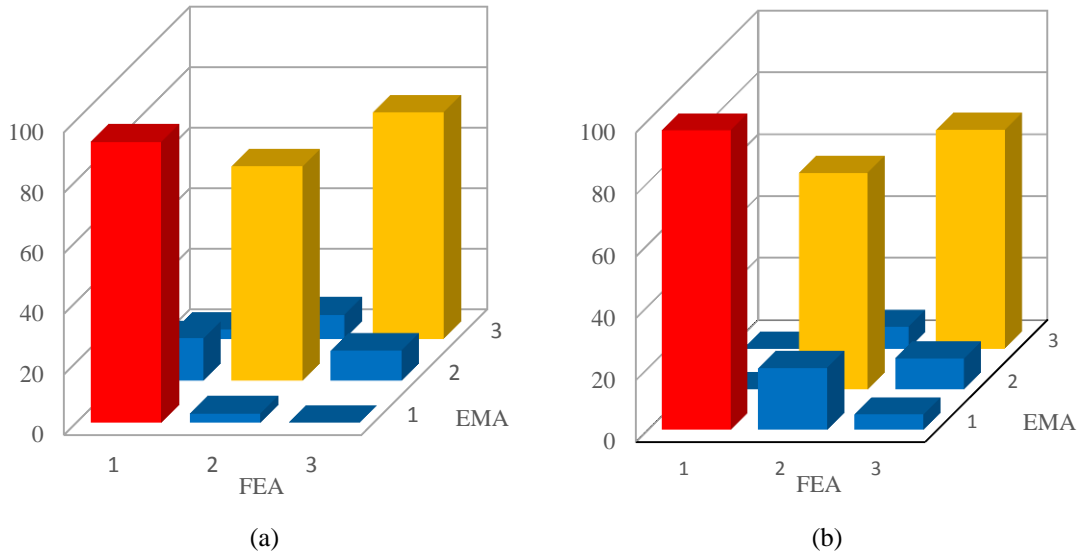
5.9.3. Yan Sokak Apartmanı model güncelleme çalışması

Binanın frekans ve mod şekillerinin karşılaştırılmasının ardından SE modelinin deneysel sonuçlara göre iyileştirilmesi yani model güncelleme çalışmalarına başlanmıştır. Tüm yapısal elemanların eğilme rijitlikleri güncelleme parametresi olarak seçilmiştir. Güncelleme cevabı olarak ise deneysel yolla elde edilen sonuç verileri yani frekans değerleri ve mod şekilleri seçilmiştir. Güncelleme parametrelerindeki değişimin cevap üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla normalize duyarlılık analizi yapılmıştır (Şekil 5.56). Yapılan duyarlılık analizine göre ilk üç kattaki kolon elemanların eğilme rijitliğindeki %1'lik değişim model güncelleme üzerinde (cevap parametresinde) % 1.5'lik değer ile en fazla etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.56. Yan Sokak Apartmanı yapı elemanlarının duyarlılık analizi

Binanın SE modeli, yapısal elemanların eğilme rijitlikleri ile binanın modal karakteristikleri arasındaki ilişki kullanılarak Femtools programında iteratif olarak güncellenmiştir. Güncelleme öncesi ve sonrası elde edilen MAC matrisleri Şekil 5.57’de, güncelleme sonucunda Sap2000 programından elde edilen binanın yeni frekans değerleri ve mod şekillerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması Tablo 5.32’de verilmiştir.



EMA: Deneysel modal analiz, FEA: Sonlu eleman analizi

Şekil 5.57. Yan Sokak Apartmanı model güncelleme öncesinde (a) ve sonrasında (b) elde edilen MAC matrisleri

Tablo 5.32. Yan sokak apartmanı güncelleme sonrası elde edilen frekanslar

Mod	Sap2000 (Hz)	Deneysel (Hz)	Fark (%)	MAC (%)
1	2.820	2.930	3.75	96.9
2	3.363	3.287	-2.30	70.0
3	3.566	5.248	32.0	70.7

Güncelleme çalışması ile kesit eğilme rijitliklerinin %35 oranında azaltılması ile frekans değerlerinde birinci ve üçüncü mod şeklinde bir iyileşme yakalanmıştır. Eğilme rijitliğindeki azalmanın dolgu duvarların modellenmesinde yapılan kabullerden ve binada gözle görülemeyen kesit rijitliği azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bundan sonraki aşamada %70 kütle katılımı sağlayan X ve Y yönündeki modlarla uyumlu performans analizi gerçekleştirilecektir (Tablo 5.29).

5.10. Model Güncelleme Çalışmalarından Elde Edilen Sonuçlar

Yapılan model güncelleme çalışmaları sonucunda tüm binaların frekans değerlerinde gerçek değerlere yaklaşık sonuçlar elde edilmiştir. Böylece gerçek model ile sonlu eleman modeli arasındaki davranış farkı azaltılmıştır. Mod şekillerinde iyileşme yakalanan binalarda ise sadece X veya sadece Y yönlerinde iyileşme meydana gelmiştir. Aynı anda hem X hem de Y yönündeki modlarda iyileşme yakalanamamıştır.

Mod şekillerinde elde edilen iyileşme maksimum %3 seviyesindedir. Durusoy, Hikmet Şahin, Hisar ve Yan Sokak Apartman'larının mod şekillerinde ise herhangi bir iyileşme yakalanamamıştır. Farklı güncelleme parametreleri ve elemanların teker teker veya gruplar halinde güncellenmesi ile mod şekillerindeki iyileşme oranının artacağı düşünülmektedir. Dolgu duvarların binanın dinamik davranışını (mod şekli ve frekans değerlerini) büyük oranda etkilediği görülmüştür.

BÖLÜM 6. TARTIŞMA

6.1. Giriş

Bu bölümde inceleme kapsamına alınan tüm binaların sonlu eleman modelleri güncellenmemiş ve güncellenmiş halde Türkiye Deprem Yönetmeliği 2007 Yedinci Bölüm’de verilen Doğrusal Elastik ve Doğrusal Elastik Olmayan Yöntem’lere göre performans değerlendirmesi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar 17 Ağustos 1999 Marmara Depremi sonucunda gözlenen performans sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

6.2. Performansa Dayalı Tasarım ve Değerlendirme

Performans, depreme karşı dayanıklı yapıların tasarımında yeni bir kavram değildir. Deprem Mühendisliği’nde deplasmana veya şekil değiştirmeye göre tasarım olarak da isimlendirilen Performansa Dayalı Tasarım kavramının temeli 1960’lı yıllara kadar uzanmaktadır [99,100]. Son yirmi yılda, özellikle 1994 Northridge ve 1995 Kobe depremleri ile ortaya çıkan can ve mal kayıplarından sonra tüm dünyada, performansa dayalı tasarım ve değerlendirmenin önemi anlaşılmıştır. Bu depremlerin neden olduğu büyük yıkımlar ve ekonomik kayıplar göz önünde bulundurularak, yapı sistemlerinin deprem etkileri altında performansa dayalı tasarım ve değerlendirmesi ile ilgili ilk adımlar atılmıştır.

Bu alanda yapılan en önemli ilk çalışma 1995 yılında ABD’de Kaliforniya Yapı Mühendisleri Birliği’nin yayınlamış olduğu Vision 2000 Raporu’dur [101]. Raporla doğrusal olmayan analiz yöntemlerine, bu yöntemlerin kullanılması ile ilgili avantaj ve dezavantajlara yer verilmiştir. Ayrıca deprem etki seviyeleri ve performans seviyeleri tanımlanmıştır. 1996 yılında, Applied Technology Council tarafından yayınlanan ATC 40 [102], 1997 yılında yayınlanan FEMA 273 [103] ve 2000 yılında yayınlanan FEMA 356’da [104] performansa dayalı tasarım kavramlarına yer verilmiştir. ATC 40, FEMA 273 ve FEMA 356’da tavsiye edilen yöntemlerde, yapı

dinamik davranışı birinci mod serbest titreşimi ile sınırlıdır. Eurocode 8’de, doğrusal olmayan statik ve dinamik analiz yöntemleri ayrıntılı bir şekilde sunulmuştur. Ayrıca yapıların performansa dayalı tasarım ve değerlendirme için performans tanımlamalarına ve elemanların modelleme parametrelerine yer verilmiştir [105]. Türkiye’de ise 17 Ağustos 1999 Marmara Depremi’nde yaşanan büyük can ve kayıplarının ardından 6 Mart 2007’de yürürlüğe giren Türkiye Deprem Yönetmeliği ile performansa dayalı tasarım ve değerlendirme uygulanmaya başlamıştır. Yönetmeliğin ilk 6 Bölümü’nde, önceki deprem yönetmeliklerinde de olduğu gibi, dayanıma göre tasarım ilkesi benimsenmiştir. Bu nedenle, ilk plastik kesitin oluşmasının ardından yapıda değişen dinamik karakteristikler, ilk 6 Bölüm’de göz önüne alınmamaktadır.

Yönetmeliğin 7. Bölümü’nde ise şekil değiştirmeye göre değerlendirme ilkesi göz önüne alınmıştır [53]. Amaç, verilen bir deprem için sünek davranışa ilişkin plastik şekil değiştirme istemleri ile gevrek davranışa ilişkin iç kuvvet istemlerinin hesaplanması ve yönetmelikçe tanımlanmış şekil değiştirme ve iç kuvvet kapasiteleri ile karşılaştırılarak, kesit ve bina düzeyinde yapısal performans değerlendirmesinin yapılabilmesidir [98], [106]. Yönetmeliğin Yedinci Bölümü’nde Doğrusal Elastik ve Doğrusal Elastik Olmayan Yöntemler kullanılarak performans değerlendirmesi yapılabilmektedir. Tez çalışmasının esas amaçlarından biri de yönetmelikteki bu yöntemlerin geliştirilmesidir.

Bu bölümde incelenen tüm binaların sonlu eleman modelleri güncellenmemiş ve güncellenmiş şekilde Türkiye Deprem Yönetmeliği 2007’de verilen, Doğrusal Elastik Yöntemler (Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi (EDYY), Mod Birleştirme Yöntemi (MBY)) ve Doğrusal Elastik Olmayan Yöntemler, (Artımsal Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi (AEDYY), ve Artımsal Mod Birleştirme (AMBY)) kullanılarak Probina Orion sürüm 2013’te performans analizi gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Probina Orion programında oluşturulan bina modelleri ile yapılan modal analiz sonuçlarının Sap2000 sonuçları ile örtüşmesi sağlanmıştır.

6.3. Ahmet Levent Sitesi A Blok Deprem Performans Analizi

Deprem sonrası Ahmet Levent Sitesi A Blok'un zemin katında bazı kolonların alt uçlarında mafsallaşma belirtileri belirlenmiştir. 160x20cm ebatındaki perdelerde çatlaklar meydana gelmiştir. Belirlenen hasar durumu göz önüne alınarak binanın deprem performans seviyesi Can Güvenliği olarak belirlenmiştir. Binanın SE modeli güncellenmemiş ve güncellenmiş halde Doğrusal Elastik (DE) ve Doğrusal Elastik Olmayan (DEO) Yöntemlere göre performans değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir.

6.3.1. Ahmet Levent Sitesi A Blok güncellenmemiş sonlu eleman modeli ile performans analizi

Ahmet Levent Sitesi A Blok'un deprem performansı Türkiye Deprem Yönetmeliği Yedinci Bölüm'de 7.4.13 numaralı maddede belirtilen eğilme etkisindeki betonarme elemanlarda çatlama kesite ait etkin eğilme rijitlikleri $(EI)_e$ kullanılarak belirlenmiştir. TDY 2007'ye göre kapsamlı bilgi düzeyi için Doğrusal Elastik Eşdeğer Deprem Yüğü ve Mod Birleştirme Yöntemleri'ne göre yapılan performans analizinden elde edilen sonuçlar Tablo 6.1'de verilmiştir.

Tablo 6.1. Ahmet Levent Sitesi A Blok güncellenmemiş SE modelinin DE yöntemle performans analizi

Mevcut Performans	EDYY		MBY	
	X Yönü	Y Yönü	X Yönü	Y Yönü
Can Güvenliği	Can Güvenliği	Can Güvenliği	Can Güvenliği	Hemen Kullanım

Ahmet Levent Sitesi Blok'un doğrusal elastik performans değerlendirmesi sonucunda X ve Y yönü performansı Can Güvenliği olarak belirlenmiştir yani gözlenen deprem performansı sağlanmıştır. İki doğrusal yöntemden mod birleştirme yönteminde Y yönü için Hemen Kullanım performans seviyesi elde edilmiştir. Fakat X yönü Can Güvenliği performansını sağladığı için genel performans değerlendirmesi Can Güvenliği olarak alınmıştır. Binanın doğrusal elastik olmayan performans değerlendirmesinde kapsamlı bilgi düzeyi için AEDYY ve AMBY'ye göre elde edilen sonuçlar Tablo 6.2 ve Tablo 6.3'te verilmiştir.

Tablo 6.2. Ahmet Levent Sitesi A Blok güncellenmemiş SE modelinin AEDYY ile performans analizi

Mevcut Performans	AEDYY			
	X Yönü (m)	Y Yönü (m)	X Yönü	Y Yönü
Can Güvenliği	0.0917	0.0735	Can Güvenliği	Hemen Kullanım

Tablo 6.3. Ahmet Levent Sitesi A Blok güncellenmemiş SE modelinin AMBY ile performans analizi

Mevcut Performans	AMBY			
	X Yönü (m)	Y Yönü (m)	X Yönü	Y Yönü
Can Güvenliği	0.0917	0.0735	Can Güvenliği	Hemen Kullanım

Ahmet Levent Sitesi A Blok'un doğrusal elastik olmayan yöntemlerle yapılan performans değerlendirmesi sonucunda X yönündeki performansının Can Güvenliği, Y yönündeki performansının ise Hemen Kullanım düzeyinde olduğu belirlenmiştir. Binanın genel performansı Can Güvenliği olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak Ahmet Levent Sitesi A Blok'un doğrusal elastik olmayan yöntemler ile performans değerlendirmesi mevcut performansı sağlamıştır. AEDYY ve AMBY sonucunda aynı yapı tepe noktası yerdeğiştirme istemi ve performans seviyesinin elde edildiği sonucuna varılmıştır.

6.3.2. Ahmet Levent Sitesi A Blok güncellenmiş sonlu eleman modeli ile performans analizi

Beşinci Bölüm'de sonlu eleman modeli güncellenen Ahmet Levent Sitesi A Blok'un bu başlık altında deprem performansı belirlenmiştir. TDY 2007'ye göre kapsamlı bilgi düzeyi için Doğrusal Elastik, Eşdeğer Deprem Yüğü ve Mod Birleştirme Yöntemleri'ne göre yapılan performans analizinden elde edilen sonuçlar Tablo 6.4'te verilmiştir.

Tablo 6.4. Ahmet Levent Sitesi A Blok güncellenmiş SE modelinin DE yöntemle performans analizi

Mevcut Performans	EDYY		MBY	
	X Yönü	Y Yönü	X Yönü	Y Yönü
Can Güvenliği	Göçme	Can Güvenliği	Göçme	Can Güvenliği

Ahmet Levent Sitesi A Blok güncellenmiş sonlu eleman modelinin doğrusal elastik yöntemlerle yapılan performans değerlendirmesi sonucunda X yönündeki performansının Göçme, Y yönündeki performansının ise Can Güvenliği düzeyinde olduğu belirlenmiştir. Genel performansın Göçme olduğu kabul edilmiştir. Gözlenen bina performansı elde edilememiştir.

Binanın doğrusal elastik olmayan performans değerlendirmesinde kapsamlı bilgi düzeyi için AEDY ve AMB yöntemleri kullanılarak elde edilen sonuçlar Tablo 6.5 ve Tablo 6.6'da verilmiştir.

Tablo 6.5. Ahmet Levent Sitesi A Blok güncellenmiş SE modelinin AEDYY ile performans analizi

Mevcut Performans	AEDYY			
	X Yönü (m)	Y Yönü (m)	X Yönü	Y Yönü
Can Güvenliği	0.0822	0.0651	Can Güvenliği	Can Güvenliği

Tablo 6.6. Ahmet Levent Sitesi A Blok güncellenmiş SE modelinin AMBY ile performans analizi

Mevcut Performans	AMBY			
	X Yönü (m)	Y Yönü (m)	X Yönü	Y Yönü
Can Güvenliği	0.0822	0.0651	Can Güvenliği	Can Güvenliği

Doğrusal elastik olmayan yöntemler sonucu binanın X ve Y yönündeki performans seviyesi Can Güvenliği olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak Ahmet Levent Sitesi A Blok'un doğrusal elastik olmayan performans değerlendirmesi sonucunda gözlenen deprem performansı elde edilmiştir. AEDYY ve AMBY sonucunda aynı yapı tepe noktası yerdeğiştirme istemi ve performans seviyesinin elde edildiği sonucuna varılmıştır.

6.4. Aydın Bak Sitesi 2. Blok Deprem Performans Analizi

Marmara Depremi sonrası Aydın Bak Sitesi 2. Blok'un tüm zemin kat kolonlarının sadece alt uçlarında mafsal oluşması suretiyle hasar oluşmuştur. Oluşan hasar durumu değerlendirildiğinde binanın gözlenen performans düzeyi Can Güvenliği olarak belirlenmiştir. Binanın SE modeli güncellenmemiş ve güncellenmiş halde doğrusal elastik ve doğrusal elastik olmayan yöntemlere göre performans değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir.

6.4.1. Aydın Bak Sitesi 2. Blok güncellenmemiş sonlu eleman modeli ile performans analizi

Aydın Bak Sitesi 2. Blok'un deprem performansı Türkiye Deprem Yönetmeliği Yedinci Bölüm'de 7.4.13 numaralı maddede belirtilen eğilme etkisindeki betonarme elemanlarda çatlama kesite ait etkin eğilme rijitlikleri $(EI)_e$ kullanılarak belirlenmiştir. TDY 2007'ye göre kapsamlı bilgi düzeyi için Probina Orion sürüm 2013'te EDYY ve MBY'ye göre yapılan performans analizinden elde edilen sonuçlar Tablo 6.7'de verilmiştir.

Tablo 6.7. Aydın Bak Sitesi 2. Blok güncellenmemiş SE modelinin DE yöntemle performans analizi

Mevcut Performans	EDYY		MBY	
	X Yönü	Y Yönü	X Yönü	Y Yönü
Can Güvenliği	Can Güvenliği	Göçme	Can Güvenliği	Göçme

Aydın Bak Sitesi 2. Blok'un doğrusal elastik performans değerlendirmesi sonucunda X yönü performansı Can Güvenliği, Y yönü performansı ise Göçme olarak belirlenmiştir. Binanın genel performansının Göçme olduğu kabul edilmiştir. Gözlenen deprem performansı sağlanamamıştır. EDYY ve MBY'den aynı sonuç elde edilmiştir.

Binanın doğrusal elastik olmayan performans değerlendirmesinde kapsamlı bilgi düzeyi için AEDYY ve AMBYY'ye göre elde edilen sonuçlar Tablo 6.8 ve Tablo 6.9'da verilmiştir.

Tablo 6.8. Aydın Bak Sitesi 2. Blok güncellenmemiş SE modelinin AEDYY ile performans analizi

Mevcut Performans	AEDYY			
	X Yönü (m)	Y Yönü (m)	X Yönü	Y Yönü
Can Güvenliği	0.102	0.0938	Can Güvenliği	Hemen Kullanım

Tablo 6.9. Aydın Bak Sitesi 2. Blok güncellenmemiş SE modelinin AMBY ile performans analizi

Mevcut Performans	AMBY			
	X Yönü (m)	Y Yönü (m)	X Yönü	Y Yönü
Can Güvenliği	0.102	0.0938	Can Güvenliği	Hemen Kullanım

Aydın Bak Sitesi 2. Blok'un doğrusal elastik olmayan yöntemlerle yapılan performans değerlendirmesi sonucunda X yönündeki performansının Can Güvenliği, Y yönündeki performansının ise Hemen Kullanım düzeyinde olduğu belirlenmiştir. Binanın genel performansı Can Güvenliği olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak Aydın Bak Sitesi 2. Blok'un doğrusal elastik olmayan yöntemler ile performans değerlendirmesi mevcut performansı sağlamıştır. AEDYY ve AMBY sonucunda aynı yapı tepe noktası yerdeğiştirme istemi ve performans seviyesinin elde edildiği sonucuna varılmıştır.

6.4.2. Aydın Bak Sitesi 2. Blok güncellenmiş sonlu eleman modeli ile performans analizi

Beşinci Bölüm'de sonlu eleman modeli güncellenen Aydın Bak Sitesi 2. Blok'un bu başlık altında deprem performansı belirlenmiştir. TDY 2007'ye göre kapsamlı bilgi düzeyi için EDYY ve MBY'ye göre yapılan performans analizinden elde edilen sonuçlar Tablo 6.10'da verilmiştir.

Tablo 6.10. Aydın Bak Sitesi 2. Blok güncellenmiş SE modelinin DE yöntemle performans analizi

Mevcut Performans	EDYY		MBY	
	X Yönü	Y Yönü	X Yönü	Y Yönü
Can Güvenliği	Göçme	Can Güvenliği	Göçme	Can Güvenliği

Aydın Bak Sitesi 2. Blok'un güncellenmiş sonlu eleman modelinin doğrusal elastik yöntemlerle yapılan performans değerlendirmesi sonucunda X yönündeki performansının Göçme, Y yönündeki performansının ise Can Güvenliği düzeyinde olduğu belirlenmiştir. Genel performansın Göçme olduğu kabul edilmiştir. Gözlenen bina performansı elde edilememiştir.

Binanın doğrusal elastik olmayan performans değerlendirmesinde kapsamlı bilgi düzeyi için AEDYY ve AMBY kullanılarak elde edilen sonuçlar Tablo 6.11 ve Tablo 6.12'de verilmiştir.

Tablo 6.11. Aydın Bak Sitesi 2. Blok güncellenmiş SE modelinin AEDYY ile performans analizi

Mevcut Performans	AEDYY			
	X Yönü (m)	Y Yönü (m)	X Yönü	Y Yönü
Can Güvenliği	0.0716	0.0932	Can Güvenliği	Can Güvenliği

Tablo 6.12. Aydın Bak Sitesi 2. Blok güncellenmiş SE modelinin AMBY ile performans analizi

Mevcut Performans	AMBY			
	X Yönü (m)	Y Yönü (m)	X Yönü	Y Yönü
Can Güvenliği	0.0716	0.0932	Can Güvenliği	Can Güvenliği

Doğrusal elastik olmayan yöntemler sonucu binanın X ve Y yönündeki performans seviyesi Can Güvenliği olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak Aydın Bak Sitesi 2. Blok'un doğrusal elastik olmayan performans değerlendirmesi sonucunda gözlenen deprem performansı elde edilmiştir. AEDYY ve AMBY sonucunda aynı yapı tepe noktası yerdeğiştirme istemi ve performans seviyesinin elde edildiği sonucuna varılmıştır.

6.5. Dayal İnşaat A Blok Deprem Performans Analizi

Marmara Depremi sonucu Dayal İnşaat A Blok'ta merdiven hasarı meydana gelmiştir. Taşıyıcı sistemde herhangi bir hasar oluşmamıştır. Oluşan hasar durumu değerlendirildiğinde binanın Hemen Kullanım performans düzeyinde olduğu tespit edilmiştir. Binanın sonlu eleman modeli güncellenmemiş ve güncellenmiş halde doğrusal elastik ve doğrusal elastik olmayan yöntemlere göre performans değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir.

6.5.1. Dayal İnşaat A Blok güncellenmemiş sonlu eleman modeli ile performans analizi

Dayal İnşaat A Blok'un deprem performansı Türkiye Deprem Yönetmeliği Yedinci Bölüm'de 7.4.13 numaralı maddede belirtilen eğilme etkisindeki betonarme elemanlarda çatlama kesite ait etkin eğilme rijitlikleri $(EI)_e$ kullanılarak belirlenmiştir. TDY 2007'ye göre kapsamlı bilgi düzeyi için Doğrusal Elastik Eşdeğer Deprem Yüğü ve Mod Birleştirme Yöntemleri'ne göre yapılan performans analizinden elde edilen sonuçlar Tablo 6.13'te verilmiştir.

Tablo 6.13. Dayal İnşaat A Blok güncellenmemiş SE modelinin DE yöntemle performans analizi

Mevcut Performans	EDYY		MBY	
	X Yönü	Y Yönü	X Yönü	Y Yönü
Hemen Kullanım	Can Güvenliği	Göçme	Can Güvenliği	Göçme

Dayal İnşaat A Blok'un doğrusal elastik performans değerlendirmesi sonucunda X yönü performansı Can Güvenliği, Y yönü performansı ise Göçme olarak belirlenmiştir. Binanın genel performansın Göçme olduğu kabul edilmiştir. Gözlenen deprem performansı sağlanamamıştır. EDYY ve MBY'den aynı sonuç elde edilmiştir. Binanın doğrusal elastik olmayan performans değerlendirmesinde kapsamlı bilgi düzeyi için AEDYY ve AMBY'ye göre elde edilen sonuçlar Tablo 6.14 ve Tablo 6.15'te verilmiştir.

Tablo 6.14. Dayal İnşaat A Blok güncellenmemiş SE modelinin AEDYY ile performans analizi

Mevcut Performans	AEDYY			
	X Yönü (m)	Y Yönü (m)	X Yönü	Y Yönü
Hemen Kullanım	0.0549	0.0549	Hemen Kullanım	Göçme

Tablo 6.15. Dayal İnşaat A Blok güncellenmemiş SE modelinin AMBY ile performans analizi

Mevcut Performans	AMBY			
	X Yönü (m)	Y Yönü (m)	X Yönü	Y Yönü
Hemen Kullanım	0.0549	0.0549	Hemen Kullanım	Göçme

Dayal İnşaat A Blok'un doğrusal elastik olmayan yöntemlerle yapılan performans değerlendirmesi sonucunda X yönündeki performansının Hemen Kullanım, Y yönündeki performansının ise Göçme düzeyinde olduğu belirlenmiştir. Binanın genel performansı Göçme olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak Dayal İnşaat A Blok'un doğrusal elastik olmayan yöntemler ile performans değerlendirmesi mevcut performansı sağlamamıştır. AEDYY ve AMBY sonucunda aynı yapı tepe noktası yerdeğiştirme istemi ve performans seviyesinin elde edildiği sonucuna varılmıştır.

6.5.2. Dayal İnşaat A Blok güncellenmiş sonlu eleman modeli ile performans analizi

Beşinci Bölüm'de sonlu eleman modeli güncellenen Dayal İnşaat A Blok'un bu başlık altında deprem performansı belirlenmiştir. TDY 2007'ye göre kapsamlı bilgi düzeyi için EDYY ve MBY'ye göre yapılan performans analizinden elde edilen sonuçlar Tablo 6.16'da verilmiştir.

Tablo 6.16. Dayal İnşaat A Blok güncellenmiş SE modelinin DE yöntemle performans analizi

Mevcut Performans	EDYY		MBY	
	X Yönü	Y Yönü	X Yönü	Y Yönü
Hemen Kullanım	Can Güvenliği	Göçme	Can Güvenliği	Göçme

Dayal İnşaat A Blok'un güncellenmiş sonlu eleman modelinin doğrusal elastik yöntemlerle yapılan performans değerlendirmesi sonucunda X yönündeki performansının Can Güvenliği, Y yönündeki performansının ise Göçme düzeyinde olduğu belirlenmiştir. Binanın genel performansın Göçme olduğu kabul edilmiştir. Gözlenen bina performansı elde edilememiştir.

Binanın doğrusal elastik olmayan performans değerlendirmesinde kapsamlı bilgi düzeyi için AEDYY ve AMBY kullanılarak elde edilen sonuçlar Tablo 6.17 ve Tablo 6.18'de verilmiştir.

Tablo 6.17. Dayal İnşaat A Blok güncellenmiş SE modelinin AEDYY ile performans analizi

Mevcut Performans	AEDYY			
	X Yönü (m)	Y Yönü (m)	X Yönü	Y Yönü
Hemen Kullanım	0.0279	0.0277	Hemen Kullanım	Hemen Kullanım

Tablo 6.18. Dayal İnşaat A Blok güncellenmiş SE modelinin AMBY ile performans analizi

Mevcut Performans	AMBY			
	X Yönü (m)	Y Yönü (m)	X Yönü	Y Yönü
Hemen Kullanım	0.0279	0.0277	Hemen Kullanım	Hemen Kullanım

Doğrusal elastik olmayan yöntemler sonucu binanın X ve Y yönündeki performans seviyesi Hemen Kullanım olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak Dayal İnşaat A Blok'un doğrusal elastik olmayan performans değerlendirmesi sonucunda gözlenen deprem performansı elde edilmiştir. AEDYY ve AMBY sonucunda aynı yapı tepe noktası yerdeğiştirme istemi ve performans seviyesinin elde edildiği sonucuna varılmıştır.

6.6. Durusoy Apartmanı Deprem Performans Analizi

Marmara Depremi'nde Durusoy Apartmanı'nda herhangi bir hasar oluşmamıştır ve bina halen kullanımdadır. Oluşan hasar durumu değerlendirildiğinde binanın Hemen Kullanım performans düzeyinde olduğu belirlenmiştir. Binanın sonlu eleman modeli güncellenmemiş ve güncellenmiş halde doğrusal elastik ve doğrusal elastik olmayan yöntemlere göre performans değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir.

6.6.1. Durusoy Apartmanı güncellenmemiş sonlu eleman modeli ile performans analizi

Durusoy Apartmanı'nın deprem performansı Türkiye Deprem Yönetmeliği Yedinci Bölüm'de 7.4.13 numaralı maddede belirtilen eğilme etkisindeki betonarme elemanlarda çatlama kesite ait etkin eğilme rijitlikleri $(EI)_e$ kullanılarak belirlenmiştir. TDY 2007'ye göre kapsamlı bilgi düzeyi için Doğrusal Elastik Eşdeğer Deprem Yüğü ve Mod Birleştirme Yöntemleri'ne göre yapılan performans analizinden elde edilen sonuçlar Tablo 6.19'da verilmiştir.

Tablo 6.19. Durusoy Apartmanı güncellenmemiş SE modelinin DE yöntemle performans analizi

Mevcut Performans	EDYY		MBY	
	X Yönü	Y Yönü	X Yönü	Y Yönü
Hemen Kullanım	Göçme	Göçme	Göçme	Göçme

Durusoy Apartmanı'nın doğrusal elastik performans değerlendirmesi sonucunda X ve Y yönü performansı Göçme olarak belirlenmiştir. Güncellenmemiş sonlu eleman modeli gözlenen deprem performansını sağlamamıştır. EDYY ve MBY'den aynı performans sonucu elde edilmiştir. Binanın doğrusal elastik olmayan performans değerlendirmesinde kapsamlı bilgi düzeyi için AEDYY ve AMBY'ye göre elde edilen sonuçlar Tablo 6.20 ve Tablo 6.21'de verilmiştir.

Tablo 6.20. Durusoy Apartmanı güncellenmemiş SE modelinin AEDYY ile performans analizi

Mevcut Performans	AEDYY			
	X Yönü (m)	Y Yönü (m)	X Yönü	Y Yönü
Hemen Kullanım	0.0809	0.0733	Hemen Kullanım	Hemen Kullanım

Tablo 6.21. Durusoy Apartmanı güncellenmemiş SE modelinin AMBY ile performans analizi

Mevcut Performans	AMBY			
	X Yönü (m)	Y Yönü (m)	X Yönü	Y Yönü
Hemen Kullanım	0.0809	0.0733	Hemen Kullanım	Hemen Kullanım

Durusoy Apartmanı'nın doğrusal elastik olmayan yöntemlerle yapılan performans değerlendirmesi sonucunda X ve Y yönündeki performansının Hemen Kullanım düzeyinde olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak Durusoy Apartmanı'nın doğrusal elastik olmayan yöntemler ile performans değerlendirmesi mevcut performansı sağlamamıştır. AEDYY ve AMBY sonucunda aynı yapı tepe noktası yerdeğiştirme istemi ve performans seviyesinin elde edildiği sonucuna varılmıştır.

6.6.2. Durusoy Apartmanı güncellenmiş sonlu eleman modeli ile performans analizi

Beşinci Bölüm'de sonlu eleman modeli güncellenen Durusoy Apartmanı'nın bu başlık altında deprem performansı belirlenmiştir. TDY 2007'ye göre kapsamlı bilgi düzeyi için EDYY ve MBY'ye göre yapılan performans analizinden elde edilen sonuçlar Tablo 6.22'de verilmiştir.

Tablo 6.22. Durusoy Apartmanı güncellenmiş SE modelinin DE yöntemle performans analizi

Mevcut Performans	EDYY		MBY	
	X Yönü	Y Yönü	X Yönü	Y Yönü
Hemen Kullanım	Göçme	Göçme	Göçme	Göçme

Durusoy Apartmanı'nın güncellenmiş sonlu eleman modelinin doğrusal elastik yöntemlerle yapılan performans değerlendirmesi sonucunda X ve Y yönündeki performansının Göçme düzeyinde olduğu belirlenmiştir. Analiz sonucunda gözlenen bina performansı elde edilememiştir.

Binanın doğrusal elastik olmayan performans değerlendirmesinde kapsamlı bilgi düzeyi için AEDYY ve AMBY kullanılarak elde edilen sonuçlar Tablo 6.23 ve Tablo 6.24'te verilmiştir.

Tablo 6.23. Durusoy Apartmanı güncellenmiş SE modelinin AEDYY ile performans analizi

Mevcut Performans	AEDYY			
	X Yönü (m)	Y Yönü (m)	X Yönü	Y Yönü
Hemen Kullanım	0.0627	0.0567	Hemen Kullanım	Hemen Kullanım

Tablo 6.24. Durusoy Apartmanı güncellenmiş SE modelinin AMBY ile performans analizi

Mevcut Performans	AMBY			
	X Yönü (m)	Y Yönü (m)	X Yönü	Y Yönü
Hemen Kullanım	0.0627	0.0567	Hemen Kullanım	Hemen Kullanım

Doğrusal elastik olmayan yöntemler sonucu binanın X ve Y yönündeki performans seviyesi Hemen Kullanım olarak belirlenmiştir. Durusoy Apartmanı'nın doğrusal elastik olmayan performans değerlendirmesi sonucunda gözlenen deprem performansı elde edilmiştir. AEDYY ve AMBY sonucunda aynı yapı tepe noktası yerdeğiştirme istemi ve performans seviyesinin elde edildiği sonucuna varılmıştır.

6.7. Hikmet Şahin Apartmanı Deprem Performans Analizi

Marmara Depremi'nde Hikmet Şahin Apartmanı'nda herhangi bir hasar oluşmamıştır. Yapılan değerlendirme sonucu binanın Hemen Kullanım performans düzeyinde olduğu belirlenmiştir. Binanın sonlu eleman modeli güncellenmemiş ve güncellenmiş halde doğrusal elastik ve doğrusal elastik olmayan yöntemlere göre performans değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir.

6.7.1. Hikmet Şahin Apartmanı güncellenmemiş sonlu eleman modeli ile performans analizi

Hikmet Şahin Apartmanı'nın deprem performansı Türkiye Deprem Yönetmeliği Yedinci Bölüm'de 7.4.13 numaralı maddede belirtilen eğilme etkisindeki betonarme elemanlarda çatlama kesite ait etkin eğilme rijitlikleri $(EI)_e$ kullanılarak belirlenmiştir. TDY 2007'ye göre kapsamlı bilgi düzeyi için Doğrusal Elastik Eşdeğer Deprem Yüğü ve Mod Birleştirme Yöntemleri'ne göre yapılan performans analizinden elde edilen sonuçlar Tablo 6.25'te verilmiştir.

Tablo 6.25. Hikmet Şahin Apartmanı güncellenmemiş SE modelinin DE yöntemle performans analizi

Mevcut Performans	EDYY		MBY	
	X Yönü	Y Yönü	X Yönü	Y Yönü
Hemen Kullanım	Can Güvenliği	Can Güvenliği	Can Güvenliği	Can Güvenliği

Hikmet Şahin Apartmanı'nın doğrusal elastik performans değerlendirmesi sonucunda X ve Y yönü performansı Can Güvenliği olarak belirlenmiştir. Güncellenmemiş sonlu eleman modeli gözlenen deprem performansını sağlamamıştır. EDYY ve MBY'den aynı performans sonucu elde edilmiştir. Binanın doğrusal elastik olmayan performans değerlendirmesinde kapsamlı bilgi düzeyi için AEDYY ve AMBY'ye göre elde edilen sonuçlar Tablo 6.26 ve Tablo 6.27'de verilmiştir.

Tablo 6.26. Hikmet Şahin Apartmanı güncellenmemiş SE modelinin AEDYY ile performans analizi

Mevcut Performans	AEDYY			
	X Yönü (m)	Y Yönü (m)	X Yönü	Y Yönü
Hemen Kullanım	0.0092	0.0528	Can Güvenliği	Hemen Kullanım

Tablo 6.27. Hikmet Şahin Apartmanı güncellenmemiş SE modelinin AMBY ile performans analizi

Mevcut Performans	AMBY			
	X Yönü (m)	Y Yönü (m)	X Yönü	Y Yönü
Hemen Kullanım	0.0092	0.0528	Can Güvenliği	Hemen Kullanım

Hikmet Şahin Apartmanı'nın doğrusal elastik olmayan yöntemlerle yapılan performans değerlendirmesi sonucunda X yönündeki performansının Can Güvenliği ve Y yönündeki performansının Hemen Kullanım düzeyinde olduğu belirlenmiştir. Binanın genel performansı Can güvenliği olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak Hikmet Şahin Apartmanı'nın doğrusal elastik olmayan yöntemler ile performans değerlendirmesi mevcut performansı sağlamamıştır. AEDYY ve AMBY sonucunda aynı yapı tepe noktası yerdeğiştirme istemi ve performans seviyesinin elde edildiği sonucuna varılmıştır.

6.7.2. Hikmet Şahin Apartmanı güncellenmiş sonlu eleman modeli ile performans analizi

Beşinci Bölüm'de sonlu eleman modeli güncellenen Hikmet Şahin Apartmanı'nın bu başlık altında deprem performansı belirlenmiştir. TDY 2007'ye göre kapsamlı bilgi düzeyi için EDYY ve MBY'ye göre yapılan performans analizinden elde edilen sonuçlar Tablo 6.28'de verilmiştir.

Tablo 6.28. Hikmet Şahin Apartmanı güncellenmiş SE modelinin DE yöntemle performans analizi

Mevcut Performans	EDYY		MBY	
	X Yönü	Y Yönü	X Yönü	Y Yönü
Hemen Kullanım	Can Güvenliği	Can Güvenliği	Can Güvenliği	Can Güvenliği

Hikmet Şahin Apartmanı'nın güncellenmiş sonlu eleman modelinin doğrusal elastik yöntemlerle yapılan performans değerlendirmesi sonucunda X ve Y yönündeki performansının Can Güvenliği düzeyinde olduğu belirlenmiştir. Analiz sonucunda gözlenen bina performansı elde edilememiştir.

Binanın doğrusal elastik olmayan performans değerlendirmesinde kapsamlı bilgi düzeyi için AEDYY ve AMBY kullanılarak elde edilen sonuçlar Tablo 6.29 ve Tablo 6.30'da verilmiştir.

Tablo 6.29. Hikmet Şahin Apartmanı güncellenmiş SE modelinin AEDYY ile performans analizi

Mevcut Performans	AEDYY			
	X Yönü (m)	Y Yönü (m)	X Yönü	Y Yönü
Hemen Kullanım	0.0106	0.0324	Hemen Kullanım	Hemen Kullanım

Tablo 6.30. Hikmet Şahin Apartmanı güncellenmiş SE modelinin AMBY ile performans analizi

Mevcut Performans	AMBY			
	X Yönü (m)	Y Yönü (m)	X Yönü	Y Yönü
Hemen Kullanım	0.0106	0.0324	Hemen Kullanım	Hemen Kullanım

Doğrusal elastik olmayan yöntemler sonucu binanın X ve Y yönündeki performans seviyesi Hemen Kullanım olarak belirlenmiştir. Hikmet Şahin Apartmanı'nın doğrusal elastik olmayan performans değerlendirmesi sonucunda gözlenen deprem performansı elde edilmiştir. AEDYY ve AMBY sonucunda aynı yapı tepe noktası yerdeğiştirme istemi ve performans seviyesinin elde edildiği sonucuna varılmıştır.

6.8. Hisar Apartmanı Deprem Performans Analizi

Marmara Depremi'nde Hisar Apartmanı'nda herhangi bir hasar oluşmamıştır. Yapılan değerlendirme sonucu binanın Hemen Kullanım performans düzeyinde olduğu belirlenmiştir. Binanın sonlu eleman modeli güncellenmemiş ve güncellenmiş halde doğrusal elastik ve doğrusal elastik olmayan yöntemlere göre performans değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir.

6.8.1. Hisar Apartmanı güncellenmemiş sonlu eleman modeli ile performans analizi

Hisar Apartmanı'nın deprem performansı Türkiye Deprem Yönetmeliği Yedinci Bölüm'de 7.4.13 numaralı maddede belirtilen eğilme etkisindeki betonarme elemanlarda çatlama kesite ait etkin eğilme rijitlikleri (EI)_e kullanılarak belirlenmiştir. TDY 2007'ye göre kapsamlı bilgi düzeyi için Doğrusal Elastik Eşdeğer Deprem Yüğü ve Mod Birleştirme Yöntemleri'ne göre yapılan performans analizinden elde edilen sonuçlar Tablo 6.31'de verilmiştir.

Tablo 6.31. Hisar Apartmanı güncellenmemiş SE modelinin DE yöntemle performans analizi

Mevcut Performans	EDYY		MBY	
	X Yönü	Y Yönü	X Yönü	Y Yönü
Hemen Kullanım	Can Güvenliği	Can Güvenliği	Can Güvenliği	Can Güvenliği

Hisar Apartmanı'nın doğrusal elastik performans değerlendirmesi sonucunda X ve Y yönü performansı Can Güvenliği olarak belirlenmiştir. Güncellenmemiş sonlu eleman modeli gözlenen deprem performansını sağlamamıştır. EDYY ve MBY'den aynı performans sonucu elde edilmiştir. Binanın doğrusal elastik olmayan performans değerlendirmesinde kapsamlı bilgi düzeyi için AEDYY ve AMBY'ye göre elde edilen sonuçlar Tablo 6.32 ve Tablo 6.33'te verilmiştir.

Tablo 6.32. Hisar Apartmanı güncellenmemiş SE modelinin AEDYY ile performans analizi

Mevcut Performans	AEDYY			
	X Yönü (m)	Y Yönü (m)	X Yönü	Y Yönü
Hemen Kullanım	0.129	0.0564	Can Güvenliği	Hemen Kullanım

Tablo 6.33. Hisar Apartmanı güncellenmemiş SE modelinin AMBY ile performans analizi

Mevcut Performans	AMBY			
	X Yönü (m)	Y Yönü (m)	X Yönü	Y Yönü
Hemen Kullanım	0.129	0.0564	Can Güvenliği	Hemen Kullanım

Hisar Apartmanı'nın doğrusal elastik olmayan yöntemlerle yapılan performans değerlendirmesi sonucunda X yönündeki performansının Can Güvenliği ve Y yönündeki performansının Hemen Kullanım düzeyinde olduğu belirlenmiştir. Binanın genel performansı Can güvenliği olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak Hisar Apartmanı'nın doğrusal elastik olmayan yöntemler ile performans değerlendirmesi gözlenen deprem performansını sağlamamıştır. AEDYY ve AMBY sonucunda aynı yapı tepe noktası yerdeğiştirme istemi ve performans seviyesinin elde edildiği sonucuna varılmıştır.

6.8.2. Hisar Apartmanı güncellenmiş sonlu eleman modeli ile performans analizi

Beşinci Bölüm'de sonlu eleman modeli güncellenen Hisar Apartmanı'nın bu başlık altında deprem performansı belirlenmiştir. TDY 2007'ye göre kapsamlı bilgi düzeyi için EDYY ve MBY'ye göre yapılan performans analizinden elde edilen sonuçlar Tablo 6.34'te verilmiştir.

Tablo 6.34. Hisar Apartmanı güncellenmiş SE modelinin DE yöntemle performans analizi

Mevcut Performans	EDYY		MBY	
	X Yönü	Y Yönü	X Yönü	Y Yönü
Hemen Kullanım	Can Güvenliği	Can Güvenliği	Can Güvenliği	Can Güvenliği

Hisar Apartmanı'nın güncellenmiş sonlu eleman modelinin doğrusal elastik yöntemlerle yapılan performans değerlendirmesi sonucunda X ve Y yönündeki performansının Can Güvenliği düzeyinde olduğu belirlenmiştir. Analiz sonucunda depremde gözlenen bina performansı elde edilememiştir.

Binanın doğrusal elastik olmayan performans değerlendirmesinde kapsamlı bilgi düzeyi için AEDYY ve AMBY kullanılarak elde edilen sonuçlar Tablo 6.35 ve Tablo 6.36'da verilmiştir.

Tablo 6.35. Hisar Apartmanı güncellenmiş SE modelinin AEDYY ile performans analizi

Mevcut Performans	AEDYY			
	X Yönü (m)	Y Yönü (m)	X Yönü	Y Yönü
Hemen Kullanım	0.0959	0.0401	Can Güvenliği	Hemen Kullanım

Tablo 6.36. Hisar Apartmanı güncellenmiş SE modelinin AMBY ile performans analizi

Mevcut Performans	AMBY			
	X Yönü (m)	Y Yönü (m)	X Yönü	Y Yönü
Hemen Kullanım	0.0959	0.0401	Can Güvenliği	Hemen Kullanım

Doğrusal elastik olmayan yöntemler sonucu binanın X yönündeki performansının Can Güvenliği, Y yönündeki performansının Hemen Kullanım düzeyinde olduğu belirlenmiştir. Binanın genel performansı Can güvenliği olarak belirlenmiştir. Hisar Apartmanı'nın doğrusal elastik olmayan performans değerlendirmesi sonucunda gözlenen deprem performansı elde edilememiştir. AEDYY ve AMBY sonucunda aynı yapı tepe noktası yerdeğiştirme istemi ve performans seviyesinin elde edildiği sonucuna varılmıştır.

6.9. SSK Hizmet Binası Deprem Performans Analizi

Marmara Depremi'nde SSK Hizmet Binası'nın B ve 6 akslarının kesişiminde yer alan S30 kolonunun üst ucunda, imalat hatası sonucu sıvanın dökülmesi sebebiyle hasar meydana gelmiştir (Şekil 5.46). Yapılan incelemeler sonucu binanın Hemen Kullanım performans düzeyinde olduğu kararına varılmıştır. Binanın SE modeli güncellenmemiş ve güncellenmiş halde doğrusal elastik ve doğrusal elastik olmayan yöntemlere göre performans değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir.

6.9.1. SSK Hizmet Binası güncellenmemiş sonlu eleman modeli ile performans analizi

SSK Hizmet Binası'nın deprem performansı Türkiye Deprem Yönetmeliği Yedinci Bölüm'de 7.4.13 numaralı maddede belirtilen eğilme etkisindeki betonarme elemanlarda çatlama kesite ait etkin eğilme rijitlikleri $(EI)_e$ kullanılarak belirlenmiştir. TDY 2007'ye göre kapsamlı bilgi düzeyi için Doğrusal Elastik Eşdeğer Deprem Yüğü ve Mod Birleştirme Yöntemleri'ne göre yapılan performans analizinden elde edilen sonuçlar Tablo 6.37'de verilmiştir.

Tablo 6.37. SSK Hizmet Binası güncellenmemiş SE modelinin DE yöntemle performans analizi

Mevcut Performans	EDYY		MBY	
	X Yönü	Y Yönü	X Yönü	Y Yönü
Hemen Kullanım	Can Güvenliği	Can Güvenliği	Can Güvenliği	Can Güvenliği

SSK Hizmet Binası'nın doğrusal elastik performans değerlendirmesi sonucunda X ve Y yönü performansı Can Güvenliği olarak belirlenmiştir. Güncellenmemiş sonlu eleman modeli gözlenen deprem performansını sağlamamıştır. EDYY ve MBY'den aynı performans sonucu elde edilmiştir. Binanın doğrusal elastik olmayan performans değerlendirmesinde kapsamlı bilgi düzeyi için AEDYY ve AMBY'ye göre elde edilen sonuçlar Tablo 6.38 ve Tablo 6.39'da verilmiştir.

Tablo 6.38. SSK Hizmet Binası güncellenmemiş SE modelinin AEDYY ile performans analizi

Mevcut Performans	AEDYY			
	X Yönü (m)	Y Yönü (m)	X Yönü	Y Yönü
Hemen Kullanım	0.0275	0.0280	Hemen Kullanım	Hemen Kullanım

Tablo 6.39. SSK Hizmet Binası güncellenmemiş SE modelinin AMBY ile performans analizi

Mevcut Performans	AMBY			
	X Yönü (m)	Y Yönü (m)	X Yönü	Y Yönü
Hemen Kullanım	0.0275	0.0280	Hemen Kullanım	Hemen Kullanım

SSK Hizmet Binası'nın doğrusal elastik olmayan yöntemlerle yapılan performans değerlendirmesi sonucunda X ve Y yönündeki performansının Hemen Kullanım düzeyinde olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak SSK Hizmet Binası'nın doğrusal elastik olmayan yöntemler ile performans değerlendirmesi mevcut performansı sağlamıştır. AEDYY ve AMBY sonucunda aynı yapı tepe noktası yerdeğiştirme istemi ve performans seviyesinin elde edildiği sonucuna varılmıştır.

6.9.2. SSK Hizmet Binası güncellenmiş sonlu eleman modeli ile performans analizi

Beşinci Bölüm'de sonlu eleman modeli güncellenen SSK Hizmet Binası'nın bu başlık altında deprem performansı belirlenmiştir. TDY 2007'ye göre kapsamlı bilgi düzeyi için EDYY ve MBY'ye göre yapılan performans analizinden elde edilen sonuçlar Tablo 6.40'ta verilmiştir.

Tablo 6.40. SSK Hizmet Binası güncellenmiş SE modelinin DE yöntemle performans analizi

Mevcut Performans	EDYY		MBY	
	X Yönü	Y Yönü	X Yönü	Y Yönü
Hemen Kullanım	Can Güvenliği	Can Güvenliği	Can Güvenliği	Can Güvenliği

SSK Hizmet Binası'nın güncellenmiş sonlu eleman modelinin doğrusal elastik yöntemlerle yapılan performans değerlendirmesi sonucunda X ve Y yönündeki performansının Can Güvenliği düzeyinde olduğu belirlenmiştir. Analiz sonucunda gözlenen bina performansı elde edilememiştir.

Binanın doğrusal elastik olmayan performans değerlendirmesinde kapsamlı bilgi düzeyi için AEDYY ve AMBY kullanılarak elde edilen sonuçlar Tablo 6.41 ve Tablo 6.42'de verilmiştir.

Tablo 6.41. SSK Hizmet Binası güncellenmiş SE modelinin AEDYY ile performans analizi

Mevcut Performans	AEDYY			
	X Yönü (m)	Y Yönü (m)	X Yönü	Y Yönü
Hemen Kullanım	0.0165	0.0152	Hemen Kullanım	Hemen Kullanım

Tablo 6.42. SSK Hizmet Binası güncellenmiş SE modelinin AMBY ile performans analizi

Mevcut Performans	AMBY			
	X Yönü (m)	Y Yönü (m)	X Yönü	Y Yönü
Hemen Kullanım	0.0165	0.0152	Hemen Kullanım	Hemen Kullanım

Doğrusal elastik olmayan yöntemler sonucu binanın X ve Y yönündeki performans seviyesi Hemen Kullanım olarak belirlenmiştir. SSK Hizmet Binası'nın doğrusal elastik olmayan performans değerlendirmesi sonucunda gözlenen deprem performansı elde edilmiştir. AEDYY ve AMBY sonucunda aynı yapı tepe noktası yerdeğiştirme istemi ve performans seviyesinin elde edildiği sonucuna varılmıştır.

6.10. Yan Sokak Apartmanı Deprem Performans Analizi

Marmara Depremi'nde Yan Sokak Apartmanı'nda herhangi bir hasar oluşmamıştır. Yapılan değerlendirme sonucu binanın Hemen Kullanım performans düzeyinde olduğu belirlenmiştir. Binanın sonlu eleman modeli güncellenmemiş ve güncellenmiş halde doğrusal elastik ve doğrusal elastik olmayan yöntemlere göre performans değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir.

6.10.1. Yan Sokak Apartmanı güncellenmemiş sonlu eleman modeli ile performans analizi

Yan Sokak Apartmanı'nın deprem performansı Türkiye Deprem Yönetmeliği Yedinci Bölüm'de 7.4.13 numaralı maddede belirtilen eğilme etkisindeki betonarme elemanlarda çatlama kesite ait etkin eğilme rijitlikleri (EI)_e kullanılarak belirlenmiştir. TDY 2007'ye göre kapsamlı bilgi düzeyi için Doğrusal Elastik Eşdeğer Deprem Yüğü ve Mod Birleştirme Yöntemleri'ne göre yapılan performans analizinden elde edilen sonuçlar Tablo 6.43'te verilmiştir.

Tablo 6.43. Yan Sokak Apartmanı güncellenmemiş SE modelinin DE yöntemle performans analizi

Mevcut Performans	EDYY		MBY	
	X Yönü	Y Yönü	X Yönü	Y Yönü
Hemen Kullanım	Hemen Kullanım	Hemen Kullanım	Hemen Kullanım	Hemen Kullanım

Yan Sokak Apartmanı'nın doğrusal elastik performans değerlendirmesi sonucunda X ve Y yönü performansı Hemen Kullanım olarak belirlenmiştir. Güncellenmemiş sonlu eleman modeli gözlenen deprem performansını sağlamıştır. EDYY ve MBY'den aynı performans sonucu elde edilmiştir. Binanın doğrusal elastik olmayan performans değerlendirmesinde kapsamlı bilgi düzeyi için AEDYY ve AMBY'ye göre elde edilen sonuçlar Tablo 6.44 ve Tablo 6.45'te verilmiştir.

Tablo 6.44. Yan Sokak Apartmanı güncellenmemiş SE modelinin AEDYY ile performans analizi

Mevcut Performans	AEDYY			
	X Yönü (m)	Y Yönü (m)	X Yönü	Y Yönü
Hemen Kullanım	0.0795	0.0576	Hemen Kullanım	Hemen Kullanım

Tablo 6.45. Yan Sokak Apartmanı güncellenmemiş SE modelinin AMBY ile performans analizi

Mevcut Performans	AMBY			
	X Yönü (m)	Y Yönü (m)	X Yönü	Y Yönü
Hemen Kullanım	0.0795	0.0576	Hemen Kullanım	Hemen Kullanım

Yan Sokak Apartmanı'nın doğrusal elastik olmayan yöntemlerle yapılan performans değerlendirmesi sonucunda X ve Y yönündeki performansının Hemen Kullanım düzeyinde olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak Yan Sokak Apartmanı'nın doğrusal elastik olmayan yöntemler ile performans değerlendirmesi mevcut performansı sağlamıştır. AEDYY ve AMBY sonucunda aynı yapı tepe noktası yerdeğiştirme istemi ve performans seviyesinin elde edildiği sonucuna varılmıştır.

6.10.2. Yan Sokak Apartmanı güncellenmiş sonlu eleman modeli ile performans analizi

Beşinci Bölüm'de sonlu eleman modeli güncellenen Yan Sokak Apartmanı'nın bu başlık altında deprem performansı belirlenmiştir. TDY 2007'ye göre kapsamlı bilgi düzeyi için EDYY ve MBY'ye göre yapılan performans analizinden elde edilen sonuçlar Tablo 6.46'da verilmiştir.

Tablo 6.46. Yan Sokak Apartmanı güncellenmiş SE modelinin DE yöntemle performans analizi

Mevcut Performans	EDYY		MBY	
	X Yönü	Y Yönü	X Yönü	Y Yönü
Hemen Kullanım	Hemen Kullanım	Hemen Kullanım	Hemen Kullanım	Hemen Kullanım

Yan Sokak Apartmanı'nın güncellenmiş sonlu eleman modelinin doğrusal elastik yöntemlerle yapılan performans değerlendirmesi sonucunda X ve Y yönündeki performansının Hemen Kullanım düzeyinde olduğu belirlenmiştir. Analiz sonucunda gözlenen bina performansı elde edilememiştir.

Binanın doğrusal elastik olmayan performans değerlendirmesinde kapsamlı bilgi düzeyi için AEDYY ve AMBY kullanılarak elde edilen sonuçlar Tablo 6.47 ve Tablo 6.48'de verilmiştir.

Tablo 6.47. Yan Sokak Apartmanı güncellenmiş SE modelinin AEDYY ile performans analizi

Mevcut Performans	AEDYY			
	X Yönü (m)	Y Yönü (m)	X Yönü	Y Yönü
Hemen Kullanım	0.0616	0.0504	Hemen Kullanım	Hemen Kullanım

Tablo 6.48. Yan Sokak Apartmanı güncellenmiş SE modelinin AMBY ile performans analizi

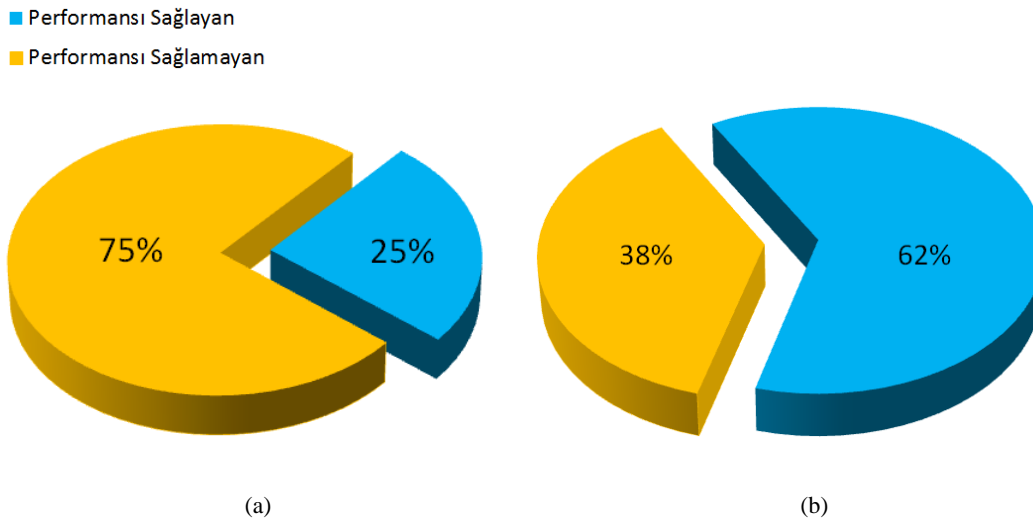
Mevcut Performans	AMBY			
	X Yönü (m)	Y Yönü (m)	X Yönü	Y Yönü
Hemen Kullanım	0.0616	0.0504	Hemen Kullanım	Hemen Kullanım

Doğrusal elastik olmayan yöntemler sonucu binanın X ve Y yönündeki performans seviyesi Hemen Kullanım olarak belirlenmiştir. Yan Sokak Apartmanı'nın doğrusal elastik olmayan performans değerlendirmesi sonucunda gözlenen deprem performansı elde edilmiştir. AEDYY ve AMBY sonucunda aynı yapı tepe noktası yerdeğiştirme istemi ve performans seviyesinin elde edildiği sonucuna varılmıştır.

6.11. Performans Değerlendirme Çalışmalarından Elde Edilen Sonuçlar

İnceleme kapsamına alınan tüm binaların depremde gözlenen performansı, güncelleme öncesi (TDY çatlama kesit eğilme rijitliği kullanılarak) ve sonrasında elde edilen performans değerlendirme sonuçları verilmiştir Tablo 6.49 ve Tablo 6.50’de verilmiştir. Sonlu eleman modeli güncellenmemiş ve güncellenmiş binaların Türkiye Deprem Yönetmeliği 2007’ye göre yapılan performans değerlendirmesi sonucunda her iki doğrusal elastik yöntemin (Eşdeğer Deprem Yüğü ve Mod Birleştirme Yöntemi) aynı performans sonucunu verdiği belirlenmiştir. Aynı şekilde her iki doğrusal elastik olmayan yöntemin (Artımsal Eşdeğer Deprem Yüğü ve Artımsal Mod Birleştirme Yöntemi) de aynı performans sonucunu verdiği belirlenmiştir. İnceleme kapsamına alınan binaların toplam yüksekliği 25m’yi ve kat sayısı 8’i aşmadığından yani bina davranışında birinci modun hakim olduğundan dolayı bu sonucun elde edildiği düşünülmektedir.

Sonlu eleman modeli güncellenmemiş binaların performans analizi sonucunda doğrusal elastik yöntemle performans değerlendirmesinde %37.5 başarı oranıyla (yalnızca üç binada) Marmara Depremi’nde gözlenen performans elde edilmiştir. Doğrusal elastik olmayan yöntemle performans değerlendirmesinde ise %50 başarı oranıyla (yalnızca dört binada) Marmara Depremi’nde gözlenen performans elde edilmiştir (Şekil 6.1).



Şekil 6.1. Sonlu eleman modeli güncellenmemiş binaların performans değerlendirme sonuçları
a) Doğrusal Elastik Yöntem b) Doğrusal Elastik Olmayan Yöntem

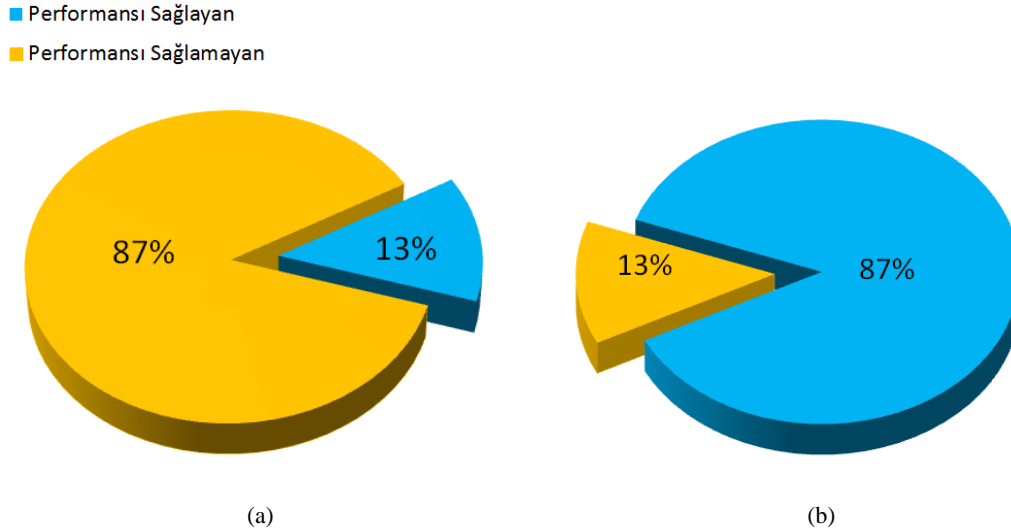
Tablo 6.49. Binaların atalet momentlerinin TDY'ye göre azaltılması ile elde edilen performans değerlendirme sonuçları

Bina Adı	Gözlenen Performans	Doğrusal Elastik Yöntem		AEDYY		AEDYY		AMBY		AMBY	
		X Yönü	Y Yönü	X Yönü (m)	Y Yönü (m)	X Yönü	Y Yönü	X Yönü (m)	Y Yönü (m)	X Yönü	Y Yönü
Ahmet Levent A Blok	Can güvenliği	CG	CG	0.0917	0.0735	CG	HK	0.0917	0.0735	CG	HK
Aydın Bak 2. Blok	Can güvenliği	CG	GÇ	0.1020	0.0938	CG	HK	0.102	0.0938	CG	HK
Dayal İnşaat A Blok	Hemen Kullanım	CG	GÇ	0.0549	0.0549	HK	GÇ	0.0549	0.0549	HK	GÇ
Durusoy Apartmanı	Hemen Kullanım	GÇ	GÇ	0.0809	0.0733	HK	HK	0.0809	0.0733	HK	HK
Hikmet Şahin Apart.	Hemen Kullanım	CG	CG	0.0092	0.0528	CG	HK	0.0092	0.0528	CG	HK
Hisar Apartmanı	Hemen Kullanım	CG	CG	0.129	0.0564	CG	HK	0.129	0.0564	CG	HK
SSK Hizmet Binası	Hemen Kullanım	CG	CG	0.0275	0.0280	HK	HK	0.0275	0.0280	HK	HK
Yan Sokak Apartmanı	Hemen Kullanım	HK	HK	0.0795	0.0576	HK	HK	0.0795	0.0576	HK	HK

Tablo 6.50. Sonlu eleman modeli güncellenmiş binaların performans değerlendirme sonuçları

Bina Adı	Gözlenen Performans	Doğrusal Elastik Yöntem		AEDYY		AEDYY		AMBY		AMBY	
		X Yönü	Y Yönü	X Yönü (m)	Y Yönü (m)	X Yönü	Y Yönü	X Yönü (m)	Y Yönü (m)	X Yönü	Y Yönü
Ahmet Levent A Blok	Can güvenliği	GÇ	CG	0.0822	0.0651	CG	CG	0.0822	0.0651	CG	CG
Aydın Bak 2. Blok	Can güvenliği	CG	GÇ	0.0716	0.0932	CG	CG	0.0716	0.0932	CG	HK
Dayal İnşaat A Blok	Hemen Kullanım	CG	GÇ	0.0279	0.0277	HK	HK	0.0279	0.0277	HK	HK
Durusoy Apartmanı	Hemen Kullanım	GÇ	GÇ	0.0627	0.0567	HK	HK	0.0627	0.0567	HK	HK
Hikmet Şahin Apart.	Hemen Kullanım	CG	CG	0.0106	0.0324	HK	HK	0.0106	0.0324	HK	HK
Hisar Apartmanı	Hemen Kullanım	CG	CG	0.0959	0.0401	HK	HK	0.0959	0.0401	HK	HK
SSK Hizmet Binası	Hemen Kullanım	CG	CG	0.0165	0.0152	HK	HK	0.0165	0.0152	HK	HK
Yan Sokak Apartmanı	Hemen Kullanım	HK	HK	0.0616	0.0504	HK	HK	0.0616	0.0504	HK	HK

Sonlu eleman modeli güncellenmiş binaların performans analizi sonucunda doğrusal elastik yöntemle performans değerlendirmesinde %12.5 başarı oranıyla (yalnızca bir binada) Marmara Depremi'nde gözlenen performans elde edilmiştir. Doğrusal elastik olmayan yöntemle performans değerlendirmesinde ise %87.5 başarı oranıyla (yedi binada) Marmara Depremi'nde gözlenen performans elde edilmiştir (Şekil 6.2).



Şekil 6.2. Sonlu eleman modeli güncellenmiş binaların performans değerlendirme sonuçları
a) Doğrusal Elastik Yöntem b) Doğrusal Elastik Olmayan Yöntem

Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde model güncelleme öncesinde ve sonrasında doğrusal elastik yöntemler kullanılarak fazla %25 oranla mevcut deprem performansı elde edilmiştir. Bu sonuca dayanarak doğrusal elastik yöntemlerin mevcut performans durumunu tam olarak yansıtamadığı kabul edilmiştir. Doğrusal elastik olmayan yöntemlerin ise güncelleme öncesinde %62.5, güncelleme çalışmaları sonrasında ise %87.5 oranla mevcut deprem performansı elde edilmiştir. Bu sonuca dayanarak doğrusal elastik olmayan yöntemlerin doğrusal elastik yöntemlere oranla daha başarılı sonuç verdiği tespit edilmiştir. Ayrıca sonlu eleman modeli güncellemesi tekniği ile doğrusal elastik olmayan yöntemleri kullanarak mevcut duruma daha yakın sonuçların elde edildiği belirlenmiştir.

BÖLÜM 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan tez çalışmasında, Türkiye Deprem Yönetmeliği 2007’de önerilen Doğrusal Elastik ve Doğrusal Elastik Olmayan performans değerlendirme yöntemlerinin deprem sonrası gözlenen performanslar ile ne derece uyumlu sonuç verdiği irdelenmiştir. Bu amaçla 17 Ağustos 1999 Marmara depremini geçirmiş, bugüne kadar yapısal anlamda müdahale edilmemiş, mühendislik hizmeti almış, statik ve mimari proje paftaları bulunan, depremde az veya orta hasar almış sekiz adet bina incelenmiştir. İnceleme kapsamına alınan binaların sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. Sonlu eleman modellemesinde yapılan hatalar, tam olarak bilinmeyen malzeme ve yapı davranışı gibi belirsizlikleri en aza indirmek, yani gerçek davranışı en iyi yansıtan sonlu eleman modellerini oluşturmak, amacıyla tüm binalara model güncelleme çalışmaları yapılmıştır. Model güncelleme çalışmasında Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile elde edilen modal karakteristikler referans olarak alınmıştır. Deneysel modal karakteristikler referans alınarak sonlu eleman modelleri güncellenen binaların deprem performansları Türkiye Deprem Yönetmeliği 2007 Yedinci Bölüm’de önerilen farklı performans değerlendirme yöntemleri ile değerlendirilmiştir. Çalışmanın ilk adımında Deneysel Modal Analiz ve Sonlu Eleman Modeli Güncelleme aşamalarını kuvvetlendirmek amacıyla iki katlı X ve Y yönünde tek açıklıklı betonarme test binası inşa edilmiştir. Deneysel Modal Analiz’de yapılabilecek hataları en aza indirmek amacıyla dokuz farklı yerleşim deneyerek en uygun ivmeölçer konumlandırmasına karar verilmiştir. En uygun ivmeölçer konumlandırmasının belirlenmesinin ardından model güncelleme çalışmaları yapılmıştır. Yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar referans alınarak tez kapsamında incelenen sekiz adet bina detaylı olarak incelenmiştir. Yapılan tüm çalışmalar sonucunda elde edilen sonuç ve öneriler aşağıda sıralanmıştır;

- Bina üzerinde her kata uygun şekilde konumlandırılan ikişer adet ivmeölçer ile (X ve Y eksenli ölçüm yapan) binanın dinamik karakteristiklerini belirlemek mümkündür.
- Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile yapıda herhangi bir tahribat oluşturmadan, düşük deneysel maliyet ile basit ve karmaşık yapıların dinamik karakteristiklerini belirlemek mümkündür.
- Planda düzenli ve simetrik binalar (laboratuvar veya test binaları) için oluşturulan sonlu eleman modelleri gerçek modelin davranışını yüksek oranda yansıtmaktadır. Ancak belirli ölçüde düzensizliği bulunan binaların sonlu eleman modelleri gerçek modellerin davranışını tam anlamıyla yansıtmaması söz konusu olabilmektedir.
- Betonarme karkas binaların Spektral Yoğunluk Fonksiyonu Tekil Değerleri grafiğinde frekans değerleri, dolgu duvarlı binaların frekanslarından daha belirgin şekilde görülmektedir. Bu sonuç karkas binalarda sönümün daha az olduğunu ve taşıyıcı olmayan yapı elemanlarının (dolgu duvarların) titreşim enerjisini sönümlediğini göstermektedir.
- Dolgu duvarların taşıyıcı özelliği olmamasına karşın sönüm ve ağırlık etkisiyle sistemin rijitliğini ve dinamik davranışını etkilediği ve oluşturulan sonlu eleman modellerinde kesinlikle dikkate alınması gerektiği belirlenmiştir. Dolgu duvarların sonlu eleman modellemesinde dikkate alınması Yönetmelik'te tavsiye edilebilir.
- Sonlu Eleman Modeli Güncelle çalışmalarında tüm sistem için eğilme rijitliği kullanılarak frekans değerlerinde uyumlu sonuçlar elde edilmiştir, ancak mod şekillerinde aynı başarıyı yakalamak mümkün olmamıştır. Farklı güncelleme parametreleri ve elemanların teker teker veya gruplar halinde güncellenmesi ile mod şekillerindeki iyileşme oranının artacağı düşünülmektedir.

- Sonlu eleman modeli güncellenmemiş ve güncellenmiş binaların Türkiye Deprem Yönetmeliği'ndeki Doğrusal Elastik Yöntemler ile yapılan performans değerlendirmesinde en fazla %37.5 oranla gözlenen deprem performansı yakalanmıştır. Doğrusal Elastik Performans Değerlendirme Yöntemlerinin deprem performansını belirlemede başarılı olmadığı belirlenmiştir.
- Doğrusal elastik olmayan yöntemler ile yapılan performans değerlendirmesinde ise %87.5 oranla binaların gözlenen deprem performansı yakalanmıştır. Doğrusal Elastik Olmayan Performans Değerlendirme Yöntemlerinin gerçek performansı belirlenmede daha başarılı olduğu belirlenmiştir.
- Sonlu eleman modeli güncellenmiş binaların Doğrusal Elastik Olmayan Performans değerlendirme sonuçları binaların depremde gözlenen performans sonuçlarına oldukça yakındır. TDY 2007'ye göre rijitliği azaltılmış binaların deprem performansı bazı binalarda uygunluk göstermektedir. Ancak model güncelleme yapılan binalarda daha yüksek oranla mevcut performansı yakalamak mümkündür.
- Sonlu eleman modelleri mevcut durumu tam olarak yansıtmamaktadır. Nümerik modellerin, güncelleme yapıldıktan sonra statik ve dinamik analizlerde kullanılması önerilmektedir. Türkiye Deprem Yönetmeliği Yedinci Bölüm'de binalardan bilgi toplanması ile ilgili verilen koşullara binaların sonlu eleman modellerinin kalibre edilmesi şartı getirilmelidir.

KAYNAKLAR

- [1] EYKHOFF, P., System identification: parameter and state estimation. Chichester, England: Wiley, 1974.
- [2] LJUNG, L., System identification toolbox, Matlab. 1986.
- [3] LJUNG, L., System identification: theory for the user, 21st ed. Dewey: Prentice Hall PTR, p. 384,1987.
- [4] SODERSTROM, T.S., STOICA, P.G., System identification. New York: Prentice Hall, 1989.
- [5] LJUNG, L., GLAD, T., Modeling of dynamic systems, 1st ed. Prentice Hall, 1994.
- [6] OVERSCHEE, P. Van, DE MOOR, B., Subspace identification for linear systems, 1 st Ed. Norwell, USA: Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [7] EWINS, D.J., Modal testing: theory and practice. New York: John Wiley & Sons, 1995.
- [8] MAIA, N.M.M., SILVA, J. M.M., Theoretical and experimental modal analysis. England: Research Studies Press LTD., 1997.
- [9] HE, J., FU, Z.F., Modal analysis, 1st Ed. Great Britain: Butterwoth-Heinemann, 2001.
- [10] DOEBLING, S.W., FARRAR, C.R., PRIME, M.B., SHEVITZ, D.W., Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: a literature review, Los Alamos, New Mexico, 1996.
- [11] SOHN, H., FARRAR, C.R., HEMEZ, F.M., SHUNK, D.D., STINEMATES, D.W., NADLER, B.R., A review of structural health monitoring literature: 1996–2001, 2004.
- [12] BRINCKER, R., ANDERSEN, P., Ambient response analysis modal analysis for large structures, Sixth International Congress On Sound And Vibration, 1999.

- [13] BRINCKER, R., ZHANG, L., ANDERSEN, P., Output-only modal analysis by frequency domain decomposition, Proceedings of Isma25, 2000.
- [14] BRINCKER, R., ANDERSEN, P., MOLLER, N., Output only modal testing of a car body subject to engine excitation, Proceedings of SPIE: The International Society for Optical Engineering, 2000.
- [15] PARLOO, E., Application of frequency-domain system identification techniques in the field of operational modal analysis, Vrije Universiteit, 2003.
- [16] ŞAFAK, E., Yapı titreşimlerinin izlenmesi: nedir, neden yapılır, nasıl yapılır ve ne elde edilir, Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, October, pp. 16–20, 2007.
- [17] SEVİM, B., BAYRAKTAR, A., ALTUNIŞIK, A.C., ADANUR, S., AKKÖSE, M., Determination of water level effects on the dynamic characteristics of a prototype arch dam model using ambient vibration testing, *Experimental Techniques*, vol. 36, pp. 72–82, January 2012.
- [18] FRISWELL, M.I., MOTTERSHEAD, J.E., Finite element model updating in structural dynamics. New York: Kluwer Academic Publisher, 1995.
- [19] MAIA, N.M.M., SILVA, J.M.M., HE, J., Theoretical and experimental modal analysis. Somerset, England: Research Studies Press LTD., 468s, 1997.
- [20] DASCOTTE, E., Validation and updating of ansys finite element models using experimental modal data, Proceedings International ANSYS Users Conference, Pittsburgh, 2006.
- [21] PAVIC, A., HARTLEY, M. J., WALDRON, P., Updating of the analytical models of two footbridges based on modal testing of full-scale structures, Proceedings of Isma23, Volume 3, pp. 1111–1118, 1998.
- [22] DASCOTTE, E., Applications of finite element model updating using experimental modal data, *Sound and Vibration Magazine*, June 1991.
- [23] DOEBLING, S.W., HEMEZ, F.M., BARLOW, M.S., PETERSON, L.D., FARHAT, C., Damage detection in a suspended scale model truss via model update, IMAC XI - 11th International Modal Analysis Conference, 1993.
- [24] DASCOTTE, E., STROBBE, J., Updating finite element models using frf correlation functions, IMAC XVII - 17th International Modal Analysis Conference, pp. 1–6, 1999.
- [25] WEBER, B., PAULTRE, P., Damage identification in a truss tower by regularized model updating, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, vol. 136, issue. 3, pp. 307–316, 2010.

- [26] VENTURA, C.E., BRINCKER, R., DASCOTTE, E., ANDERSEN, P., Fem updating of the heritage court building structure, IMAC XIX - 19th International Modal Analysis Conference - Future Directions in Structural Dynamics, 2001.
- [27] VENTURA, C.E., LORD, J., SIMPSON, R.D., Effective use of ambient vibration measurements for modal updating of a 48 storey building in vancouver , canada, IMAC-XXII: Conference & Exposition on Structural Dynamics - Linking Test to Design, 2004.
- [28] SEVİM, B., ALTUNISIK, A.C., BAYRAKTAR, A., Earthquake behavior of berke arch dam using ambient vibration test results, Journal of Performance of Constructed Facilities, pp. 780–792, 2012.
- [29] RAD, S.Z., Methods for updating numerical models in structural dynamics, doctor of philosophy, University of London, 1997.
- [30] LORD, J.F., VENTURA, C.E., DASCOTTE, E., BRINCKER, R., ANDERSEN, P., Fem updating using ambient vibration data from a 48 storey building in vancouver british colombia canada, The 32nd International Congress And Exposition On Noise Control Engineering, 2003.
- [31] BAKIR, P.G., ŞAFAK, E., EKŞİOĞLU, E.M., Gerçek zamanlı sistem tanıma teknikleri ve sonlu eleman modeli güncelleme yöntemleriyle mevcut binalarda hasar belirlenmesi, 107M573 Nolu Tübitak Projesi, 2011.
- [32] JAISHI, B., REN, W., Structural finite element model updating using ambient vibration test results, Journal of Structural Engineering, ASCE, vol. 131, issue 4, pp. 617–628, 2005.
- [33] BAYRAKTAR, A., TÜRKER, T., ÖZCAN, M., AKKÖSE, M., ADANUR, S., ATEŞ, Ş., Yapısal hasarların deneysel ve operasyonel modal analiz yöntemleriyle belirlenmesi proje no : 106m038, 2009.
- [34] RAMOS, L. F., DE ROECK, G., LOURENÇO, P. B., CAMPOS-COSTA, a., Damage identification on arched masonry structures using ambient and random impact vibrations, Engineering Structures, vol. 32, issue 1, pp. 146–162, January 2010.
- [35] BAYRAKTAR, A., ALTUNİŞİK, A. C., SEVİM, B., TÜRKER, T., Modal testing , finite-element model updating , and dynamic analysis of an arch type steel footbridge, Journal of Performance of Constructed Facilities, vol. 23, issue 2, pp. 81–89, 2009.
- [36] KUTANIS, M., Statik itme analizi yöntemlerinin performanslarının değerlendirilmesi, Yapısal Onarım ve Güçlendirme Sempozyumu, Pamukkale-DENİZLİ, 2006.

- [37] GÜLKAN, P., SÖZEN, M., Inelastic response of reinforced concrete structures to earthquake motions, *ACI Journal*, vol. 71, issue 21, pp. 604–610, 1974.
- [38] SHIBATA, A., SÖZEN, M., Substitute-structure method for design in R/C, *Journal of The Structural Division, ASCE*, vol. 102, pp. 1–18, 1976.
- [39] PRIESTLY, M.J.N., Myths and fallacies, in earthquake engineering-conflicts between design and reality, *NZ National Society for Earthquake Engineering*, vol. 26, pp. 329–341, 1995.
- [40] PRIESTLY, M. J. N., KOWALSKY, M. J., Direct displacement-based seismic design of concrete buildings, *Nz National Society for Earthquake Engineering*, vol. 33, pp. 421–444, 2000.
- [41] PRIESTLY, M. J. N., Myths and fallacies, in earthquake engineering. Pavia, Italy: The Mallet Milne Lecture, *IUSS Press*, 2003.
- [42] SAIIDI, M., SÖZEN, M. A., Simple nonlinear seismic response of r/c structures, *Journal of Structural Division, ASCE*, vol. 107, pp. 937–952, 1981.
- [43] FAJFAR, P., FISCHHINGER, M., N2-a method for non-linear seismic analysis of regular buildings, *Proceedings, 9th World Conference on Earthquake Engineering*, 1988.
- [44] LAWSON R.S., VANCE, V., KARWINKLER, H., Nonlinear static push-over analysis- why, when and how?, *Proceeding 5th US Conference on Earthquake Engineering*, pp. 283–292, 1994.
- [45] A.S., M., W.K., T., 3-d push-over analysis for eccentric buildings, *Proceedings of the 11th European Conference on Earthquake Engineering*, pp. 2985–292, 1995.
- [46] TSO, W. ., A.S., M., Damage assessment of eccentric multistory buildings using 3-d pushover analysis, *Proceedings of Eleventh World Conference on Earthquake Engineering*, 1996.
- [47] KILAR, V., FAJFAR, P., Simple push-over analysis of asymmetric buildings, *Earthquake Eng. Stuct. Dyn.*, vol. 26, pp. 233–249, 1997.
- [48] SASAKI, K. K., FREEMAN, S. A., PARET, T. F., Multi-mode pushover procedure (mmp) — a method to identify the effects of higher modes in a pushover analysis, *Proceedings of 6th US National Conference on Earthquake Engineering*, Paper No. 271, 1998.
- [49] KIM, S. D., HONG, W. K., JU, Y. ., A modified dynamic inelastic analysis of tall buildings considering the change of dynamic characteristics, *Journal of The Structural Design of Tall Buildings*, vol. 8, issue 1, pp. 57–73, 1999.

- [50] ANTONIOU, S., ROVITHAKIS, A.R.P., Development and verification of a fully adaptive pushover procedure, Proceedings Twelfth European Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 822, London, 2002.
- [51] ANTONIOU, S., PINHO, R., Development and verification of a displacement-based adaptive pushover procedure, Journal of Earthquake Engineering, vol. 8, issue 5, pp. 643–661, 2004.
- [52] PINHO, R., CASAROTTI, C., ANTONIOU, S., A comparison of single-run pushover analysis techniques for seismic assessment of bridges, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol. 36, issue 10, pp. 1347–1362, 2007.
- [53] BAYINDIRLIK VE İSKAN BAKANLIĞI, Deprem bölgelerinde yapılacak yapılar hakkında yönetmelik, Ankara, 2007.
- [54] BAYRAKTAR, A., TÜRKER, T., ALTUNIŞIK, A. C., SEVİM, B., ÖZCAN, M., Binaların dinamik parametrelerinin operasyonel modal analiz yöntemiyle belirlenmesi, İMO Teknik Dergi, pp. 5185–5205, 2010.
- [55] M. PETYTT, Introduction to finite element vibration analysis. Cambridge: Cambridge University Pres., 1990.
- [56] GOLINVAL, G. K. J., Experimental modal analysis, Gaetan Kerschen Report.
- [57] KAYA, H., Experimental modal analysis of a steel grid frame, Middle East Technical University, 2004.
- [58] SCHWARZ, B. J., RICHARDSON, M. H., Experimental modal analysis, CSI Reliability Week, Orlando, FL, 1999.
- [59] BAYRAKTAR, A., TÜRKER, T., Deneysel modal analiz yöntemi ile düzlem çerçevelerin dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi, Deprem Sempozyumu, pp. 1035–1041, 2005.
- [60] AVITABILE, M., Modal space - in our own little world, lecture notes, 2006.
- [61] ZHANG, L., An overview of operational modal analysis : major development and issues, Proceedings of the 1st International Operational Modal Analysis Conference (IOMAC), Copenhagen, Denmark, 2005.
- [62] BRINCKER, R., ZHANG, L., ANDERSEN, P., Output-only modal analysis by frequency domain decomposition, Proceedings of the ISMA25 Noise and Vibration Engineering, Leuven, Belgium, 2000.
- [63] BEYEN, K., Structural identification for post-earthquake safety analysis of the Fatih Mosque after the 17 August 1999 Kocaeli Earthquake, Engineering Structures, 30(8), pp. 2165–2184, 2007.

- [64] LIU, S. C., YAO, J. T. P., Structural identification concept, ASCE Journal of The Structural Division, vol. 104, issue ST12, pp. 1845–1858, 1978.
- [65] BEYEN, K., ERDIK, M., Two dimensional nonlinear site response analysis of adapazari plain and predictions inferered from aftershocks of the Kocaeli Earthquake, 17 Eugust 1999, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol. 24, issue 3, pp. 261–279, 2004.
- [66] KAMMER, D. C., Sensor placement for on-orbit modal identification and correlation of large space structures, Proc., American Control Conf., IEEE, pp. 2984–2990, 1990.
- [67] YAO, L., SETHARES, W. A., KAMMER, D. C., Sensor placement for on-orbit modal identification of large space structure via a genetic algorithm, Int. Conf. on Systems Engineering, IEEE, pp. 332–335, 1992.
- [68] LAORY, I., HADJ ALI, N. B., TRINH, T. N., SMITH, I. F. C., Measurement system configuration for damage identification of continuously monitored structures, Journal of Bridge Engineering, ASCE, 2012.
- [69] MINWOO CHANG, S. M., SHAMIM N., P., Optimal sensor placement for modal identification of bridge systems considering number of sensing nodes, 19(6), ASCE, 2014.
- [70] BEYEN, K., KUTANIS, M., TANÖZ, H. Ö., BAŞKAN, D., Yapı sağlığı izleme ve yapı tanı çalışmaları için akıllı aktarma protokollü kablosuz sensör ağı, Yedinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul, 2007.
- [71] AREL, Deprem İzleme Sımulatorleri, <http://www.areldeprem.com.tr/>, Erişim Tarihi: 20.11.2014.
- [72] VENTURA, C.E., Why output-only modal testing is a desirable tool for a wide range of practical applications, Proceedings of the 21st International Modal Analysis Conference (IMAC). Kissimmee, Florida, 2003.
- [73] ZHANG, L., An overview of major developments and issues in modal identification, Proceedings of the 22nd International Modal Analysis Conference (IMAC), Detroit, Michigan, 2004.
- [74] SVIBS, Artemis, ambient response testing and modal identification software, ARTeMIS modal, sürüm 3.0., 2013.
- [75] ÇALIK, İ., BAYRAKTAR, A., TÜRKER, T., Tarihi yığma yapıların dinamik karakteristiklerine resterasyon etkisinin çevresel titreşim yöntemleriyle belirlenmesi: rize merkez büyük gülbahar camisi örneği, 2. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, issue 25–27 Eylül, 2013.

- [76] JACOBSEN, N.J., ANDERSEN, P., BRINCKER, R., Using enhanced frequency domain decomposition as a robust technique to harmonic excitation in operational modal analysis, Proceedings of the 23rd International Seminar on Modal Analysis, ISMA, Lueven, Belgium, 2006.
- [77] CSI, Computers and Structures, Sap2000 sürüm 15.1.0. Berkeley University.
- [78] CHEN, G., FE model validation for structural dynamics, Doctor of Philosophy University of London, 2001.
- [79] DOEBLING, S. W., FARRAR, C.R., PRIME, M.B., A summary review of vibration-based damage identification methods, The Shock and Vibration Digest, vol. 30, issue 2, pp. 91–105, 1998.
- [80] HEARN, G., SHIM, H., Integration of bridge management systems and nondestructive evaluations, Journal of Infrastructure System, vol. 4, issue 2, pp. 49–55, 1998.
- [81] HAWK, H., SMALL, E., The bridgit bridge management system, Structural Engineering International, vol. 8, issue 4, pp. 309–314, 1998.
- [82] BEYEN, K., Mevcud yapılar , nümerik modellerinin güvenilirliği ve analiz sonuçlarına etkileri, 2. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, Hatay, 2013.
- [83] BAKIR, P. G., Mevcut binalarda hasar belirlenmesi ve sonlu eleman modeli güncelleme tekniği, Yedinci Ulusal Deprem Müh. Konferansı, İstanbul, 2011.
- [84] TÜRKER, T., Çevresel titreşim verileri kullanılarak yapıların hasar durumlarının tespiti ve değerlendirilmesi, Doktora tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, 2011.
- [85] ALLEMANG, R. J., The modal assurance criterion, Sound and Vibration, vol. 1, August, pp. 14–21, 2003.
- [86] FEMTOOLS, Femtools model updating user's guide. Belgium, 2014.
- [87] LARSSON, A., ABRAHAMSSON, T., On the parameter identifiability and test data informativeness in finite element model error localization. In The Proceedings of IMAC 18, 2000.
- [88] KIM, G., PARK, Y., An automated parameter selection procedure for updating finite element model, IMAC-XXII: Conference & Exposition on Structural Dynamics - Linking Test to Design, 2004.
- [89] GLADWELL, G.M.L., ISMAIL, F., Parameter selection strategies in finite element model updating, Journal of Vibration and Acoustics, ASME, vol. 119, January, 1997.

- [90] ÇELİKLİ, S., Sonlu elemanlar metodu ile yapıların model güncelleme özelliğinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ondokuzmayıs Üniversitesi, 2006.
- [91] TEUGHEL, A., ROECK, G.D., Damage assessment of the Z4 bridge by FE model updating, Key Engineering Materials, vol. 245, 2003.
- [92] VANHONACKER, P., The use of modal parameters of mechanical structures in sensitivity analysis, system synthesis and system identification methods, PhD. Dissertation, Mechanical Engineering Department, K.U. Leuven, 1980.
- [93] MOTTERSHEAD, J.E., FRISWELL, M. I., Model updating in structural dynamics: a survey, J Sound Vib, vol. 167, issue 2, pp. 347–375, 1993.
- [94] IMREGUN, M., VISSER, W.J., A review of model updating techniques, The Shock Vib Dig, vol. 23, issue 1, pp. 9–20, 1991.
- [95] DDS, Dynamic Design Solutions, Femtools versiyon 3.7. 2014.
- [96] GOOGLE, Google earth, sürüm 7.1.2.2041, Ekim, 2014.
- [97] PROTA, Yazılım Bilişim ve Mühendislik, Probina orion sürüm 2013. Ankara, 2013.
- [98] KUTANIS, M., BEYEN, K., YILMAZ, M.T., BAL, İ.E., Performansa dayalı tasarım ve değerlendirme yöntemlerinin deprem sonrası türkiye ' de gözlenen yapı performansları ile karşılaştırılarak geliştirilmesi, Proje no: 108m303, 2011.
- [99] KUTANIS, M., Yapı ve deprem mühendisliğinde performans yaklaşımı-1, İMO Sakarya Bülteni, Adapazarı, Sayı 3, 2007.
- [100] KUTANIS, M., Yapı ve deprem mühendisliğinde performans yaklaşımı-2, İMO Sakarya Bülteni, Adapazarı, Sayı 4, 2007.
- [101] SEAOC, Structural Engineers Association of California, Performance based seismic engineering of buildings, Sacramento, California, 1995.
- [102] ATC, Applied Technology Council, Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings report ATC-40, Redwood City, California, 1996.
- [103] BSCC, The Building Seismic Safety Council, Nehr p guidelines for the seismic rehabilitation of buildings, Washington, D.C., 1997.
- [104] ASCE, American Society of Civil Engineers, Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings, Washington, D.C., 2000.

- [105] EUROCODE, European Committee, Eurocode 8: design of structures for earthquake resistance, 2004.
- [106] KUTANIS, M., BEYEN, K., BAL, İ. E., Binaların gözlenen deprem performanslarının hesaplanmasında mevcut yöntemlerin tutarlılığı, Yedinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, June 2011.

ÖZGEÇMİŞ

Elif BORU 07.02.1985 tarihinde Sakarya'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Sakarya'da tamamladı. 2003 yılında Sakarya Anadolu Lisesi'nden mezun oldu. Aynı yıl başladığı Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 2006 yılında mezun oldu. 2006-2008 yılları arasında Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Bilim Dalı'nda Yüksek Lisansını tamamladı. Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde 2006 yılından beri araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır. Elif BORU evli ve bir çocuk annesidir.