



**ÇOK KATLI BETONARME YAPILARIN YAPIM
KALİTESİ KONTROLÜNÜN OPERASYONEL
MODAL ANALİZ YÖNTEMİ İLE
DEĞERLENDİRİLMESİ**

Gökçe Kaan SAVAŞ

**Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Dilek OKUYUCU**

**2020
Her hakkı saklıdır.**



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ÇOK KATLI BETONARME YAPILARIN YAPIM KALİTESİ
KONTROLÜNÜN OPERASYONEL MODAL ANALİZ YÖNTEMİ İLE
DEĞERLENDİRİLMESİ**

Gökçe Kaan SAVAŞ

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Dilek OKUYUCU

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Erzurum

2020

Her hakkı saklıdır

T.C.
ERZURUM TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEZ ONAY FORMU

**ÇOK KATLI BETONARME YAPILARIN YAPIM KALİTESİ
KONTROLÜNÜN OPERASYONEL MODAL ANALİZ YÖNTEMİ İLE
DEĞERLENDİRİLMESİ**

Dr. Öğr. Üyesi Dilek OKUYUCU danışmanlığında, Gökçe Kaan SAVAŞ tarafından hazırlanan bu çalışma 04 / 06 / 2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **Oy birliği ile** kabul edilmiştir.

Başkan	: Prof. Dr. İlker KAZAZ	İmza	:
Üye	: Doç. Dr. Oğuz Akın DÜZGÜN	İmza	:
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Dilek OKUYUCU	İmza	:

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum

Prof. Dr. Arzu GÖRMEZ
Enstitü Müdürü

*Bu tez çalışması tarafından nolu proje ile desteklenmiştir.

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki tüm bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

04 / 06 / 2020

Gökçe Kaan SAVAŞ

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÇOK KATLI BETONARME YAPILARIN YAPIM KALİTESİ KONTROLÜNÜN OPERASYONEL MODAL ANALİZ YÖNTEMİ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

Gökçe Kaan SAVAŞ

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Dilek OKUYUCU

Anadolu coğrafyası sismik olarak dünyanın en aktif bölgelerinden birisidir. Birbirine çok yakın zaman aralıklarında coğrafyanın birçok farklı noktasında sürekli olarak depremler meydana gelmektedir. Bu durum mevcut yapı stokunun kalitesini ilgilendirdiği kadar yeni yapılan binaların yapım kalitesinin de irdelenmesi gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Bu tez çalışması kapsamında; söz konusu yapım kalitesi kontrolünün betonarme yapılar için sadece malzeme dayanımları üzerinden değil, dinamik davranış parametreleri üzerinden yapılabilirliği araştırılmıştır.

Teze konu olan araştırmada; tip proje üzerinden lojman binası olarak inşa edilen iki adet betonarme yapı üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Taşıyıcı sistem imalatı yeni tamamlanmış çok katlı betonarme iki yapı için tahribatsız malzeme dayanım deneyleri yapılmış, sonlu eleman modelleri geliştirilmiş ve operasyonel modal analiz yöntemi ile yapılara ait dinamik karakteristikler deneysel olarak yerinde elde edilmiştir. Elde edilen dinamik davranış parametreleri iki yapı için kıyaslanarak sahadaki imalat kalitesi bakımından çıkarımlar yapılmıştır. Geliştirilen sonlu eleman modeli operasyonel modal analiz sonuçları dikkate alınarak kalibre edilmiş ve bu model üzerinden hesaplanan periyot değeri ile statik proje raporunda sunulan veri kıyaslanmıştır. Çalışma sonucunda, sahada imal edilen yapı hâkim periyodunun statik projede hesaplanan değerden %40 daha küçük olduğu ve operasyonel modal analiz uygulamasının betonarme çerçeve türü yapılarda bir yapım kalitesi kontrolü yöntemi olarak değerlendirilebileceği sonuçlarına ulaşılmıştır.

2020, 139 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Operasyonel Modal Analiz, Çok Katlı Betonarme Yapılar, Dinamik Parametreler, Yapım Kalitesi Kontrolü, Tahribatsız Yöntemlerle Değerlendirme

ABSTRACT

MS. Thesis

EVALUATION OF CONSTRUCTION QUALITY CONTROL OF MULTI- STOREY REINFORCED CONCRETE STRUCTURES BY OPERATIONAL MODAL ANALYSIS

Gökçe Kaan SAVAŞ

Erzurum Technical University
Gradute School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Dilek OKUYUCU

Anatolian land is one of the most active seismically active regions in the world. Earthquakes occur continuously at many different points of the geography at very close intervals. This situation revealed the necessity of examining the construction quality of the existing buildings as well as the construction quality of the newly constructed buildings. Within the concept of the herein thesis study; The feasibility of the construction quality control in question was investigated not only on material strengths but also on dynamic behavior parameters for reinforced concrete structures.

In the research, being the subject of the thesis; the study has been carried out on two reinforced concrete structures built as a lodging building over the type project. Non-destructive material strength tests have been carried out for two newly completed multi-storey reinforced concrete structures, the finite element models have been developed and dynamic characteristics of the structures have been obtained experimentally with the operational modal analysis method. The experimetally defined in-situ dynamic behavior parameters were compared for the two structures and inferences were made in terms of manufacturing quality in the field. The developed finite element model was calibrated by taking into account the experimental modal analysis results and the period value calculated on this model was compared with the data presented in the static project report. It was concluded that the building dominant period produced in the field is 40% lower than the value calculated in the static project and that the operational modal analysis application can be evaluated as a construction quality control method in reinforced concrete frame type buildings.

2020, 139 Page

Keywords: Operational Modal Analysis, Multi Storey Reinforceed Concrete Structures, Dynamics Parameters, Construction Quality Control, Non-destructive Investgation

TEŞEKKÜR

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

Erzurum Teknik Üniversitesi lojmanlarında deneysel çalışmalar için gerekli izinleri sağlayan Erzurum Teknik Üniversitesi Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanı Sayın Ali ÇELİK ve nezdinde tüm Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığı çalışanlarına teşekkürü borç bilirim.

Çalışmam sırasında bana yardımlarını esirgemeyen, görüş ve bilgilerini benimle paylaşan değerli ekip arkadaşlarım Burak GEDİK, Muhammet ŞAHİN, Ahmet Yasir KANBUR, Meliha YILMAZ ve Sabri AYDEMİR' e teşekkür ederim.

Öğrenim hayatım boyunca bana her türlü desteği veren annem, babam ve abim Barış TİNGELDİ başta olmak üzere tüm aileme müteşekkir olduğumu belirtmek isterim. Bu çalışmanın, yeni çalışmalara ışık tutmasını ve cennet vatanı Türkiye'mize faydalı olmasını dilerim.

Gökçe Kaan SAVAŞ
Haziran 2020

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iviii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	6
2.1 Tahribatsız Yöntemlerle Beton Dayanımın Belirlenmesine İlişkin Çalışmalar.....	6
2.2. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile Betonarme Binalarda Dinamik Davranış Parametrelerinin Elde Edilmesine İlişkin Çalışmalar	9
2.3. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile Betonarme Binalarda Hasar Tespitine İlişkin Çalışmalar	14
3. MATERYAL ve YÖNTEM	19
3.1. İncelenen Binaların Tanıtılması	19
3.2. Binalarda Kullanılan Beton Malzeme Dayanımının Belirlenmesi.....	22
3.2.1. Schmidt sertlik çekici deneyi ile dayanım belirleme	25
3.2.2. Ultra ses deneyi ile beton dayanım belirleme	27
3.2.3. Laboratuvar ortamında beton basınç dayanımı belirleme	28
3.3. Modal Analiz.....	28
3.3.1. Teorik modal analize esas sonlu eleman modelinin hazırlanması	30
3.3.2. Deneyisel Modal Analiz.....	40
3.3.3. Dinamik karakteristiklerin elde edilme yöntemi.....	43
3.3.4. Deneyisel modal analiz uygulamasında kullanılan cihazlar	44
3.3.5. OMA için ortam titreşimleri kayıtlarının alınması.....	53
3.3.6. Deneyisel dinamik davranış parametrelerin elde edilmesi.....	65
3.3.7. Sonlu eleman model iyileştirme yöntemleri	69
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	71
4.1. Beton Malzeme Dayanım Sonuçları	71
4.1.1. Schmidt sertlik çekici deney sonuçları.....	71
4.1.2. Ultra ses deney sonuçları	72
4.1.3. Beton laboratuvarı kırım sonuçları.....	73
4.1.4. Beton malzeme dayanım deneyleri özeti	74
4.2. Operasyonel Modal Analiz Sonuçları	75

4.2.1. Mod şekilleri ve modal frekanslar.....	75
4.2.2.Mod şekillerine ilişkin tutarlılık kontrolleri.....	82
4.3. STA4CAD Teorik Modal Analiz Verisi	85
4.4. SAP2000 Yazılımı ile Hazırlanan Sonlu Eleman Modelleri Üzerinde Hesaplanan Teorik Modal Analiz Sonuçları.....	85
4.5. Sonlu Eleman Modelinin Güncellenmesi.....	97
5. SONUÇ ve ÖNERİLER	104
KAYNAKLAR	107
EKLER.....	119
EK-1	119
ÖZGEÇMİŞ.....	122



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
°	Derece
a	İvme
C	Santigrat
c	Sönüm
cm	Santimetre
dB	Desibel
F	Kuvvet
g	Yerçekimi ivmesi
H_T	Toplam bina yüksekliği
Hz	Hertz
kg	Kilogram
kN	Kilo Newton
m	Kütle
m	Metre
MPa	Mega Pascal
n_s	Toplam kat sayısı
N	Newton
R	Schmidt Sertlik Çekici tepme katsayısı
t	Zaman

Kısaltmalar

BA	Betonarme
CAD	Computer Aided Design
ÇSDS	Çok Serbestlik Dereceli Sistemler
DBYBHY	Deprem Bölgesinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik
EFDD	Enhanced Frequency Domain Decomposition
ETÜ	Erzurum Teknik Üniversitesi
FDD	Frequency Domain Decomposition
GFTAA	Geliştirilmiş Frekans Tanım Aralığında Ayırıştırma
GPS	Global Positioning System
MAC	Modal Assurance Criterion
MGK	Modal Güvenlik Kriteri
OMA	Operasyonel Modal Analiz
RYTEİE	Riskli Yapıların Tespit Edilmesine İlişkin Esaslar
SAP	Structural Analysis Program
T.C.	Türkiye Cumhuriyeti
TS	Türk Standartları
TSDS	Tek Serbestlik Dereceli Sistemler

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1 ETÜ Lojmanlarının Erzurum Haritasındaki Konumu (Anonim, 2013).....	19
Şekil 3.2. Erzurum İli Deprem Bölgeleri Haritasında Çalışma Sahasının Gösterimi (Anonim, 2019).....	20
Şekil 3.3. TBDY 2018'e Göre Erzurum Deprem Haritası (Anonim, 2019)	20
Şekil 3.4. Binaların Normal Kat Kolon Aplikasyon Planı	21
Şekil 3.5. Tahribatsız Muayene Yapılacak Taşıyıcı Elemanların Gösterimi	24
Şekil 3.6. Proceq L Tipi Schmidt Sertlik Çekici.....	25
Şekil 3.7. Schmidt Sertlik Çekicine Ait Kalibrasyon Eğrileri	26
Şekil 3.8. Schmidt Sertlik Çekici Cihazı İle Yapı Taşıyıcı Elemanlarının Muayenesi ..	26
Şekil 3.9. Ultra Ses Cihazı İle Yapı Taşıyıcı Elemanlarının Muayenesi	27
Şekil 3.10. Diğer Mühendisliklerde Modal Analiz Uygulamaları (Anonim, 2019)	29
Şekil 3.11. Sonlu Eleman Model Oluşturulurken Temel Alınan Aplikasyon Planı	31
Şekil 3.12. Malzeme Mekanik Özelliklerinin SAP2000 Programına Tanıtılması	33
Şekil 3.13. Tasarımda Belirlenen Kesit Boyutlarının Sisteme Girilmesi.....	33
Şekil 3.14. Kolon ve Kirişlerin Sisteme Girilmesi.....	34
Şekil 3.15. Perdelerin Alan Eleman Yöntemi İle Sisteme Girilmesi	34
Şekil 3.16. Sisteme Döşemelerin Girilmesi	35
Şekil 3.17. Dolgu Duvar Elemanlarının Sisteme Dâhil Edilmesi	35
Şekil 3.18. Döşeme yüklerinin kirişlere yük aktarım mekanizması ile girilmesi	36
Şekil 3.19. Katlara Diyafram Atılması.....	36
Şekil 3.20. Modal Analize Esas Alınacak Yüklerin Sisteme Tanıtılması.....	37
Şekil 3.21. Dolgu Durumuna Göre Yatay Yük Deplasmanı (Kaplan,2008).....	38
Şekil 3.22. Deprem Yönetmeliklerinde Bahsi Geçen B1 Yapı Düzensizliği.....	38
Şekil 3.23. Deprem Yönetmeliklerinde Bahsi Geçen B2 Yapı Düzensizliği.....	39
Şekil 3.24. Kısa Kolon Etkisi (Anonim, 2019)	39
Şekil 3.25. Deneysel Modal Analiz Algoritması	41
Şekil 3.26. OMA Algoritması	42
Şekil 3.27. OMA İçin Akış Şeması.....	42
Şekil 3.28. Örnek Bir Sarsma Tablası (Şahin vd., 2017)	45
Şekil 3.29. Yaygın olarak kullanılan çekiç türü (Birinci, 2010)	45
Şekil 3.30. E-Quake İvmeölçerler ve Modülleri (Anonim, 2019)	47

Şekil 3.31. Ultra Hassas 3 Eksenli İvmeölçer	49
Şekil 3.32. İvmeölçerlerin Veri Toplama Sistemine Bağlantı Kablosu	49
Şekil 3.33. Ultra Hassa Tek Eksenli İvmeölçer (Anonim, 2019).....	50
Şekil 3.34. İvmeölçerlerin Veri Toplama Sistemine Bağlantı Kabloları	50
Şekil 3.35. 16 Kanallı Taşınabilir Dinamik Veri Toplama Sistemi (Anonim, 2019)	51
Şekil 3.36. TESTBOX2010 Dinamik Veri Toplama / Yapısal Sağlık Takibi Cihazı.....	52
Şekil 3.37. Kış Mevsiminde 8. Bloktaki Titreşim Ölçüm Dönemine Ait Görsel I.....	56
Şekil 3.38. Kış Mevsiminde 8. Bloktaki Titreşim Ölçüm Dönemine Ait Görsel II.....	56
Şekil 3.39. 8. Blok İçin Yapılan İkinci Ölçümdeki Bina Durumu I.....	57
Şekil 3.40. 8. Blok İçin Yapılan İkinci Ölçümdeki Bina Durumu II	57
Şekil 3.41. E-Quake Cihazlarının Binada Belirlenen Noktalara Sabitlenmesi	58
Şekil 3.42. İvmeölçerlerin Binada Belirlenen Noktalara Sabitlenmesi.....	58
Şekil 3.43. 8. Blok Kablosuz Ölçüme Ait Cihaz Yerleşim Şeması	59
Şekil 3.44. 8. Blok Kablolu Ölçüme Ait Ölçüm Şeması.....	59
Şekil 3.45. 8.Blok İçin Bina Krokisi Örneği (Ölçüler cm cinsindendir).....	60
Şekil 3.46. Cihazların Zemine Sabitlenmesi	61
Şekil 3.47. Kablolu Ölçüm Sistemine Ait Cihazların Sabitlenmesi.....	61
Şekil 3.48. İvmeölçerlerin Kablo Bağlantılarının Yapılması ve Sisteme Tanıtılması	61
Şekil 3.49. Cihazların Temizlenmesi ve Bir Sonraki Ölçüm İçin Hazırlanması	62
Şekil 3.50. Cihaz İçlerindeki Ölçüm Sonrası Verilerin Toplanması.....	62
Şekil 3.51. Kablolu Ölçümde Kurulan Veri Toplama Ünitesi	63
Şekil 3.52. Birinci Ölçüm Tarihinde 9. Blok İmalat Durumu I	63
Şekil 3.53. Birinci Ölçüm Tarihinde 9. Blok İmalat Durumu II.....	64
Şekil 3.54. 9. Blok İçin Yapılan İkinci Ölçümdeki Bina Durumlu.....	64
Şekil 3.55. Artemis Modal Pro Yazılımında Model Geometrisinin Oluşturulması	66
Şekil 3.56. Artemis Modal Yazılımına Titreşim Kayıt Dosyalarının Tanıtılması	66
Şekil 3.57. Artemis Modal Yazılımında Modele Titreşim Kayıtlarının Uygulanması ...	67
Şekil 3.58. Artemis Modal Pro Yazılımında Analiz Sonucu Dinamik Davranış Parametrelerin Eldesi	68
Şekil 3.59. Örnek Modal Güvence Kriteri Matrisi.....	68
Şekil 4.1. Kablolu Ölçüm Sistem Kurulumu	81
Şekil 4.2. Kablolu Ölçümlerde Titreşim Kayıtlarında Oluşan Sıkıntılar	81
Şekil 4.3. Kablolu Ölçüme Ait Ölçüm Şeması	82
Şekil 4.4. Yarı Tuğla Duvarlı Binalar İçin MGK Kontrolü (9. ve 8. blok).....	83

Şekil 4.5. Tuğla Duvar Örülü Binalar İçin MGK Kontrolü (9.ve 8. blok)	83
Şekil 4.6. 8. Blok İçin Yapılan Kablolu Ölçüme Ait MGK Kontrolü	83
Şekil 4.7. Dolgu Duvarlar İle Kiriş Arasındaki Boşluğun Kaldırılması	92
Şekil 4.8. Bina Tasarımında Kullanılan Spektral İvme Grafiği	102



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Bina Tasarımında Tercih Edilen Malzemelerin Teknik Bilgileri	32
Çizelge 3.2. Frekans ve Zaman Tanım Alanlarına Dayalı Yöntemler (Yetkin, 2016) ...	44
Çizelge 3.3. E-Quake-ACC-23 Cihazına Ait Teknik Detaylar	48
Çizelge 3.4. SENSEBOX 70x3 Ultra Hassas Sismik İvmeölçer Teknik Bilgiler.....	50
Çizelge 3.5. SENSEBOX 7021 Ultra Hassas Sismik İvmeölçer Teknik Bilgiler.....	51
Çizelge 3.6. Dinamik Veri Toplama Cihazına Ait Teknik Detaylar.....	53
Çizelge 3.7. Ölçümde Kullanılan İvmeölçer Cihazların Kodları	55
Çizelge 4.1. Binaların Schmidt Sertlik Çekici Deney Sonuçları	72
Çizelge 4.2. 8. Blok Ultra Ses Deney Sonuçları	73
Çizelge 4.3. 8. Blok Beton Numune Kırım Sonuçları.....	73
Çizelge 4.4. 9. Blok Beton Numune Kırım Sonuçları.....	74
Çizelge 4.5. Malzeme Dayanımının Tespitine Ait Özet Bilgiler	74
Çizelge 4.6. Binalar Yarı Tuğla Duvar Örülü Halde İken Alınan OMA Sonuçları.....	76
Çizelge 4.7. Binalar Tuğla Duvar Örülü Halde İken Alınan OMA Sonuçları.....	77
Çizelge 4.8. Bina Tuğla Duvar Örülü Halde İken 8. Bloкта Alınan Kablolı OMA Sonuçları	78
Çizelge 4.9. Binaların Yapım Aşamalarına Göre OMA Sonuçları.....	79
Çizelge 4.10. 8. Blok İçin Alınan Kablolı ve Kablosuz Ölçümlere Ait Modal Analiz Sonuçları	81
Çizelge 4.11. Yarı Tuğla Duvarlı Ölçümde 8. Blok İçin MGK Kontrolünün Çizelge Dökümü.....	83
Çizelge 4.12. Yarı Tuğla Duvarlı Ölçümde 9. Blok İçin MGK Kontrolünün Çizelge Dökümü.....	84
Çizelge 4.13. Tuğla Duvarlı Ölçümde 8. Blok İçin MGK Kontrolü Çizelge Dökümü ..	84
Çizelge 4.14. Tuğla Duvarlı Ölçümde 9. Blok İçin MAC Kontrolü Çizelge Dökümü...	84
Çizelge 4.15. Tuğla Duvarlı Ölçümde 8. Blok Kablolı Ölçüm İçin MAC Kontrolünün Çizelge Dökümü	84
Çizelge 4.16. STA4CAD Yazılımında Hesaplanan Teorik Modal Analiz Sonuçları	85
Çizelge 4.17. SAP2000 Model Kodları	86
Çizelge 4.18. A1 Modeli: Ankastre Temel ve B.A Perde-Çerçeve Sistemin Modal Analiz Sonuçları	86
Çizelge 4.19. A1 Modeli: Ankastre Temel ve Perde-Çerçeve Sistem Mod Şekilleri	87

Çizelge 4.20. A2 Modeli: Radye Temel ve Perde-Çerçeve Sistemin Modal Analiz	
Sonuçları	87
Çizelge 4.21. A2 Modeli: Radye Temel ve Perde-Çerçeve Sistemin Mod Şekilleri	88
Çizelge 4.22. B1 Modeli: Ankastre Temel, Perde-Çerçeve ve Dolgu Duvar Sistemin	
Modal Analiz Sonuçları	89
Çizelge 4.23. B1 Modeli: Ankastre Temel, Perde-Çerçeve ve Dolgu Duvar Sistemin	
Mod Şekilleri.....	89
Çizelge 4.24. B1 Modeli: Ankastre Temel, Perde-Çerçeve ve Dolgu Duvar Sistemin g +	
0,3q Modal Analiz Sonuçları	89
Çizelge 4.25. B2 Modeli: Radye Temel, Perde-Çerçeve ve Dolgu Duvar Sistemin Modal	
Analiz Sonuçları.....	90
Çizelge 4.26. B2 Modeli: Radye Temel, Perde-Çerçeve ve Dolgu Duvar Sistemin Mod	
Şekilleri	90
Çizelge 4.27. B2 Modeli: Radye Temel, Perde-Çerçeve ve Dolgu Duvar Sistemin g +	
0,3q Modal Analiz Sonuçları	91
Çizelge 4.28. İncelenen Çerçevelerin Detayları (Okuyucu, 2011)	92
Çizelge 4.29. Çerçeve Serilerinin Dolgu Duvar Kodları (Okuyucu, 2011)	93
Çizelge 4.30. Çerçeve Serilerine Uygulanan Deneylerin Sonuçları (Okuyucu, 2011) ...	93
Çizelge 4.31. C1 Modeli: Ankastre Temel, B.A Perde-Çerçeve ve Yarı Dolgu Duvar	
Sistemin Modal Analiz Sonuçları	94
Çizelge 4.32. C1 Modeli: Ankastre Temel, B.A Perde-Çerçeve ve Yarı Dolgu Duvar	
Sistemin Mod Şekilleri.....	94
Çizelge 4.33. C2 Modeli: Radye Temel, B.A Perde-Çerçeve ve Yarı Dolgu Duvar	
Sistemin Modal Analiz Sonuçları	95
Çizelge 4.34. C2 Modeli: Radye Temel, B.A Perde-Çerçeve ve Yarı Dolgu Duvar	
Sistemin Mod Şekilleri.....	95
Çizelge 4.35. STA4CAD ve SAP2000 Yazılımlarında Hesaplanan Modal Analiz	
Sonuçları	96
Çizelge 4.36. Dolgu Duvarın Kirişlere Yük Olarak Etki Ettirildiği A1 Modeli: Ankastre	
Temelli Çerçeve Sistemin Modal Analiz Sonuçları.....	97
Çizelge 4.37. Dolgu Duvarın Kirişlere Yük Olarak Etki Ettirildiği A2 Modeli: Radye	
Temelli Çerçeve Sistemin Modal Analiz Sonuçları.....	97
Çizelge 4.38. Deneysel ve Teorik Çalışmalarda Dolgu Duvar Aşamalarına Göre Modal	
Analiz Sonuçları.....	98

Çizelge 4.39. C30 Beton ve $E=2000$ MPa Tuğla Duvar Mekanik Özelliklerine Göre Model Güncelleme Sonuçlarının Karşılaştırılması	99
Çizelge 4.40. C30 Beton ve $E=8000$ MPa Boşluklu Tuğla Duvar Mekanik Özelliklerine Göre Model Güncelleme Sonuçlarının Karşılaştırılması	100
Çizelge 4.41. Kalibre Edilmiş B2 Model Üzerinde Hesaplanan Teorik Modal Analiz, Tasarıma Esas Modele Göre Modal Analiz Kıyaslaması	101
Çizelge 4.42. İncelenen Modellerde Periyot Değerlerine Karşılık Gelen Spektral İvme Değerleri.....	103



1. GİRİŞ

Topraklarının %90'ından fazlası, nüfusunun tamamına yakını deprem tehlikesi altında olan ülkemizde yapıların deprem davranışının, yapısal güvenliği tesis edebilecek şekilde olması esastır (TÜİK, 2012). Bu açıdan değerlendirildiğinde, 1992 Erzincan Depremi ülkemiz için birçok konuda farkındalığın oluşmasına sebep olmuştur. 13 Mart 1992 tarihinde Erzincan ilinde meydana gelen yıkıcı yer sarsıntıları, yüzlerce insanımızın hayatını kaybetmesine yol açarken binlerce binanın çökmesine neden olmuştur (Şengezer, 1993). Bu sonuçlar ülkemizde depreme dayanıklı yapı tasarımına ilişkin teknik mevzuatın güncellenmesi zarureti gündeme getirmiş ve bu alanda önemli çalışmalar yapılmaya başlanmıştır.

1999 Kocaeli-Gölcük depremleri ile birlikte teknik mevzuat güncelleme çalışmaları hızlanmış ve süreç 2018 yılında yayımlanan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nin oluşturulmasına kadar gelmiştir. T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından yayınlanan son yönetmelik içerdiği konular itibarıyla (sismik yalıtım, yapı sağlık izlemesi, performans dayalı tasarım, vb.) yenilikçi bir yasal mevzuat olarak değerlendirilmektedir (TBDY, 2018). Bu gelişmelerin sonucu olarak yasal mevzuatlar; bina üretiminde ve servis ömründeki binalarda, güvenliği ve uygulama pratiklerini belirli bir standarda ulaştırmayı amaçlamıştır.

Günümüz koşullarında bir yapı, imalata başlangıcından kullanım ömrünün başlangıcına kadar oldukça fazla sürede, farklı meslek gruplarından birçok çalışan ve yüzlerce iş kalemini barındırmaktadır. Bütün bu organizasyonun temelini mimari tasarım ve betonarme projelendirme oluşturmaktadır. Betonarme bina tasarımında mühendislik hizmetlerini en çok kapsayan alan ise binadaki felaket senaryolarının öngörülmesi ve buna uygun yapılan tasarımlardır. Şüphesiz ki; ülkemiz topraklarının büyük bölümünde felaket senaryosu olarak akla ilk gelen etki depremdir. Depremler ve yapıları yatay yönde harekete maruz bırakacak etkilerin büyük çoğunluğu dinamik kuvvetler olarak adlandırılmaktadır. Binaya etki edecek dinamik kuvvetlere karşı alınacak önlemler ancak binanın dinamik karakteristiklerin bilinmesi ile mümkündür.

Mod şekilleri, modal frekanslar ve sönüm özellikleri; yapıların deprem davranışının incelenmesinde kullanılan dinamik davranış parametreleridir (Bayraktar vd, 2010). Bu parametreler her bir yapı için karakteristiktir. Projelendirme aşamasında;

dinamik davranış parametrelerinin teorik olarak eldesi; homojen malzeme, elemanlar arası mükemmel mesnetlenme, sonsuz rijitlik kabulleri gibi birçok kabul gerektiren bir süreçtir. Bununla beraber betonarme bina yapım aşamaları da projede öngörülen malzeme kalitesinin tutturulamaması, imalat hataları, öngörülemeyen insani müdahaleler gibi birçok belirsizliği, riski içermektedir. Projelendirme aşamasında oluşturulan yapısal model üzerinden teorik olarak hesaplanan dinamik davranış parametreleri, deprem yüklerinin hesaplamasında kullanılmaktadır. Çok daha basit bir ifadeyle, yapıya etki etmesi muhtemel deprem yüklerinin hesabında yapının periyodu belirleyici rol üstlenmektedir. Bu nedenle, dinamik davranış parametrelerin mümkün olduğu kadar doğru bir şekilde hesaplanması dinamik yüklere karşı alınacak önlemler açısından oldukça önemlidir. Bu aşamada, tasarım öncesi yapısal analize esas sonlu eleman modeli oluşturulurken yapılan kabuller oldukça önemlidir. Örneğin, ülkemiz modelleme pratiğinde betonarme yapılarda çerçeve açıklıklarını kapatan dolgu duvarların yapısal davranışa olan katkısı ihmal edilmektedir. Dolgu duvarlar, sadece ağırlıkları ile modele yansıtılmaktadır; taşıyıcı eleman olarak değerlendirilmemektedir. Bununla birlikte, dolgu duvarların rijitlikleri ile yapısal davranışa önemli ölçüde katkı sağladıkları deneysel olarak ispatlanmıştır (Okuyucu, 2011). Bu noktadan hareketle; yapısal eleman olarak kabul edilmeyen dolgu duvarların, sistem rijitliğine olan katkısının teorik hesaplamalarda dikkate alınması gerektiği de ifade edilmektedir. Birçok ülkenin depreme dayanıklı tasarıma ilişkin mevzuatı (İsrail (SI-413, 1995), Fransa (AFPS-90, 1990), Cezayir (Algerian Seismic Code, 1988), Avrupa Birliği (European Committee of Standardization, 2003), Filipin (NSCP, 1992)) betonarme çerçeve sistemlerle beraber imal edilen dolgu duvar blokların, binanın yapısal performansına etkilerinin dikkate alınmasını tavsiye etmektedir. (Kaplan, 2008).

Yapısal modelleme ve analiz çalışmalarında yukarıda bahsi geçen kabuller ile basitleştirme yollarına gidilmektedir. Bu kabullerle birlikte oluşacak hataların proje güvenliğini etkilememesi için, yapısal güvenlik kavramı dâhilinde yük ve malzeme katsayıları kullanılmaktadır. Bu husus, dünya genelinde ve ülkemizde kabul gören ve uygulanan bir yaklaşımdır (TS-500, 2000). Yapıya etki edebilecek yükler çarpan kullanılarak artırılırken, malzeme dayanımları ise bölen kullanılarak azaltılıp hesaplarda bu şekilde dikkate alınmaktadır.

Mimari tasarım ve statik projelendirme; tüm tasarım faktörleri ve dinamik yükler göz önünde bulundurularak tamamlanır. Bu aşamada binanın, teknik olarak yük kombinasyonları adı verilen tüm senaryolara hazır olduğu varsayılır bir proje ile fiziki uygulamalara geçilir.

Uygulamada, betonarme yapıların imalatında kat kolonlarının dökümü tamamlandıktan sonra, kiriş ve döşeme donatısı yerleştirilir ve monolitik olarak dökümleri yapılır. Bu durumda önceden dökülmüş birimler ile sonradan dökülen birimler arasında yeterli tutunma olmayabilir ki; buna soğuk derz oluşumu adı verilmektedir. Soğuk derz oluşumu, malzeme kalitesi sorunları, işçilik yetersizliği, denetlenmemiş uygulama pratikleri gibi unsurlar binanın yapım kalitesini etkiler ve bu durum sahada oluşan dinamik davranış parametrelerini doğrudan etkileyerek, teorik olarak öngörülen değerlerden farklı değerler oluşması şeklinde sonuçlar doğurabilir. Bu sebeple hesapta öngörülen deprem yükleri gerçekte farklı düzeylerde yapıyı zorlayabilir.

Betonarme binaların imalat aşamalarında karşı karşıya kaldıkları yukarıda bahsi geçen durumların proje aşamasında öngörülen dinamik davranış parametrelerine etkilerinin mutlaka araştırılması ve yapım tekniklerinin irdelenmesi gerekmektedir. Bu ihtiyacın temel gerekçesi, projelendirme aşamasında mümkün olan en doğru yaklaşımla dinamik davranış parametrelerinin belirlenmesi ve buna bağlı olarak tasarıma esas deprem yüklerinin daha güvenilir bir şekilde hesaplanabilmesine imkân sağlayan yöntemlerin geliştirilmesidir.

Mevcut bir yapının dinamik davranış parametreleri operasyonel modal analiz (OMA) yöntemi ile yerinde belirlenebilmektedir. OMA, doğal ortam titreşimlerine yapının verdiği tepkilerin ölçülmesi ve bu verinin işlenerek modal davranış parametrelerinin elde edilmesi ilkesine dayanmaktadır (Bayraktar vd, 2010). Mevcut bir yapının, yerinde dinamik davranış parametrelerinin belirlenmesi genel olarak birkaç çalışmada kullanılabilir:

- Teorik ve deneysel (gerçekleşen) modal davranış parametreleri kıyaslanarak proje hesap değerlerinin doğruluğu irdelenebilir
- Deneysel mod şekillerine bakılarak yapım kalitesi / hasar durumu hakkında değerlendirme yapılabilir

- Mevcut bir yapının, yapısal güvenliğinin incelenmesi çalışmasında deneysel (gerçekleşen) modal davranış parametrelerinin yakalandığı sayısal modeller kullanılarak daha güvenilir analiz ve değerlendirme çalışmaları yapılabilir

OMA uygulaması titreşim kayıt sistemleri ve analiz yazılımı gerektiren bir çalışmadır. Literatürde, dünya genelinde pek çok uygulamasına rastlamak mümkündür (Çelik ve Aykan, 2004) (Demirtaş ve Bayraktar, 2019). Ancak, ülkemizde OMA tekniği kullanılarak yapılan çalışmaların ulusal dizinde nispeten kısıtlı sayıda olduğu bilinmektedir (Kömür vd, 2015) (Dönmez ve Karakan, 2009) (Boru ve Kutanis, 2015). Bununla birlikte OMA yöntemi, yapı sağlığı takibi ve hasar tespitine ilişkin uygulamaları ile yeni yeni ele alınmaktadır (Yanık vd, 2018). OMA uygulamasının yapı üzerinde gerçekleştirilen tahribatsız bir dinamik kimliklendirme yöntemi olduğunun altı çizilmelidir.

Bu tez çalışması kapsamında, OMA uygulaması kullanılarak imalatı devam eden betonarme yapılarda yapım kalitesi kontrolü yapılmasına yönelik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışma materyali olan mevcut betonarme binaların projelendirme aşamasında hesaplanan teorik modal analiz sonuçları ile OMA uygulaması neticesinde elde edilen dinamik davranış parametrelerinin karşılaştırılması yapılarak; aşağıda sıralanan amaçlara ulaşılması hedeflenmiştir:

- Aynı statik proje üzerinden yapılan iki betonarme bina üzerinde OMA çalışması gerçekleştirerek elde edilecek veri üzerinden yapım pratiklerini ve kalitesini değerlendirmek.
- Yapıların deneysel (gerçekleşen) modal davranış parametreleri üzerinden proje hesap değerleri ile kıyaslamak.
- Proje yapım kalitesi kontrolü çalışmasında OMA uygulamasının bir argüman olarak önerilip önerilemeyeceğini irdelemek.

Bu amaçlara yönelik olarak, Erzurum ili şehir merkezinde 2018 yılında imalatına başlanmış olan garaj + 4 katlı 2 adet betonarme bina üzerinde çalışma yapılması planlanmıştır. Çalışmaya karar verildiği dönemde; binaların ana taşıyıcı sistem imatları tamamlanmış durumda olup dolgu duvar vb. imatlar farklı aşamalarda. Söz konusu binalar tip proje kullanılarak; aynı yüklenici tarafından yan yana (~10 m aralıkla) imal edilen yapılardır. Tez çalışmasının ilk aşamasında yapıların ait olduğu kurumdan gerekli yasal izinler alınmış ve yapı mimari, statik projeleri, statik hesap raporları, beton malzeme

1. GİRİŞ

test sonuçları temin edilmiştir. İkinci aşamada; SAP2000 yazılımı kullanılarak binaların yapısal analize esas sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Üçüncü aşamada beton kalitesini, belirlemek amacıyla ultra ses yöntemi ve Schmidt sertlik çekici uygulaması gibi tahribatsız yöntemler uygulanarak yapı imalatında kullanılan beton basınç dayanımlarının yerinde tespiti çalışmaları yapılmıştır. Tez çalışmasının en kapsamlı araştırma bölümü ise yapıların OMA yöntemi ile dinamik davranış parametrelerinin elde edilmesi olmuştur. Bu çalışma sonrasında teorik ve OMA sonuçlarının birlikte değerlendirilmesi yapılmıştır.

Takip eden bölümlerde tez konusuna ilişkin kaynak özetleri, araştırmada kullanılan materyal ve yöntem, çalışma neticesinde elde edilen bulgular, sonuçlar ve genel değerlendirme detaylı olarak sunulmaktadır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Bu tez çalışması kapsamında tahribatsız deneysel yöntemler kullanılarak 2 adet tip proje dâhilinde inşa edilmiş çok katlı betonarme yapıların dinamik davranış parametrelerinin yerinde incelenmesi yoluna gidilmiştir. OMA tekniği ile ortam titreşimi kayıtları kullanılarak dinamik davranış parametrelerinin elde edilmesi, Schmidt test çekici ve ultra ses yöntemleri ile beton kalitesinin tespiti gibi çalışmalar tez kapsamında gerçekleştirilen tahribatsız deneysel uygulamalardır. Bunlara ek olarak, betonarme yapının sonlu eleman modelinin oluşturulması ve deneysel olarak elde edilen verinin yapısal analizler kullanılarak değerlendirilmesi çalışmaları ile araştırma sonuca ulaştırılmaya çalışılmıştır.

Yukarıda sıralanan çalışmalar yapılmak suretiyle, araştırmanın uygulama aşamasına geçmeden önce teorik alt yapısının oluşturulması ve deneysel sürecin doğru bir şekilde planlanabilmesi için kapsamlı bir literatür taraması yapılmıştır. Bu tarama neticesinde oluşturulan çalışma özetleri başlıklar halinde aşağıda sunulmaktadır.

2.1 Tahribatsız Yöntemlerle Beton Dayanımın Belirlenmesine İlişkin Çalışmalar

Tez çalışmaları kapsamında mevcut binalarda betonarme taşıyıcı sistem imalatında kullanılan beton dayanımını belirlemek için tahribatsız metot olarak ultra ses ve Schmidt sertlik çekici yöntemleri kullanılmıştır. Bu yöntemler; hâlihazırda çalışan ve gerçek boyutlardaki taşıyıcı elemanlara uygulanarak, imalat sonrasında kazandıkları dayanımlar tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu çalışma, tezin temel amacı olan yapım kalitesi kontrolüne ilişkin birinci basamak uygulamayı içermektedir. Bu konuda gerekli teorik alt yapıyı oluşturmak adına yapılan literatür taraması neticesinde erişilen çalışma özetleri aşağıda sunulmuştur.

Leshchinsky (1992), yaptığı çalışmada tahribatsız yöntemlerle beton dayanımın belirlenmesinde istatistiksel kontrol problemlerini irdelemiştir. Leshchinsky bu çalışmada tahribatsız metotların beton dayanımına ilişkin verdiği sonuçların güvenilirliğinin ve doğruluğunun, basınç dayanım testi gibi tahribatlı metotların verdiği güvenilirlik ve doğruluğa eşdeğer düzeyde olması gerekliliğini araştırmıştır.

Kheder (1999), yapmış olduğu çalışmada; iki farklı tahribatsız muayene yöntemi olan Schmidt Sertlik Çekici ve Ultra Ses yöntemlerini birlikte kullanarak beton dayanımını belirlemek adına matematiksel bağıntılar geliştirmiştir. Bu çalışma için 103 farklı karışım oranındaki, 7-90 gün arasında değişen yaşlardaki betonlara deneyler yapılmıştır.

Qasrawi (2000), yapmış olduğu çalışmada Schmidt Sertlik Çekici ve Ultra Ses yöntemlerinden oluşan tahribatsız metotların korelasyonu ile beton dayanımının basit ve güvenilir şekilde tespiti üzerine çalışmıştır. Çalışmasında üretmiş olduğu abaklar ve grafikler ile dayanım tahminlerinde %95 oranında başarı sağlamıştır.

Naffa vd. (2002), yapmış oldukları çalışmada betonda kimyasal hasarların oluşturduğu etkileri tahribatsız metotlardan olan Ultra Ses Yöntemi ile belirlemeye çalışmıştır. Çalışmada betonun dış kabuk kısmını kimyasal çözeltilere maruz bırakarak oluşan etkileri yüksek frekanslı ultra ses cihazları ile tespit etmeyi başarmışlardır.

Erdal vd. (2003), yapmış oldukları çalışmada, beton kalite kontrol çalışmalarında kullanılan ileri teknoloji yöntemleri incelemişlerdir. Sertleşmiş beton üzerinde tahribatsız test metotlarından Schmidt Sertlik Çekici, Ultra Ses deneyi ve diğer tahribatsız muayene yöntemleri ile yapmış oldukları deney sonuçlarını, yine incelenen yapıdan alınan karotlara uygulanmış basınç dayanımı test sonuçları ile kıyaslamışlardır.

Ergün ve Kürklü (2005), yapmış oldukları çalışmada mevcut betonarme yapılarda beton dayanımını tahribatlı ve tahribatsız metotlarla araştırmışlardır. Çalışmada gerçek yapı elemanlarına, Schmidt Sertlik Çekici ve Ultra Ses yöntemleri de dâhil olmak üzere birkaç tahribatsız metot uygulanarak dayanım belirleme çalışmalarından sonra yapı elemanlarından alınan karotlarla binada tahribatlı bir şekilde de dayanım belirleme çalışmaları yapılmıştır.

Başka (2006), yapmış olduğu çalışmada, sertleşmiş beton üzerinde yapılan tahribatlı ve tahribatsız muayene yöntemlerini irdelemiştir. Çalışmanın çıkış noktası olarak laboratuvar ortamındaki numune dayanım sonuçlarının, gerçek yapının kazanmış olduğu beton dayanımından daha büyük değerlerde olması şeklinde düşünülmüştür. Bu çalışmada beton malzemesi tahribatsız şekilde araştırılmış olup, ultra ses ve Schmidt Sertlik Çekici muayene yöntemlerinin arasındaki korelasyon irdelenmiştir.

Aydın vd. (2010), yapmış oldukları çalışmada Schmidt Sertlik Çekici deneyi ve beton basınç deneyi arasındaki ilişkiyi belirlemiştir. Deney için 28-90 gün arasında çeşitli yaşlarda olacak şekilde standart küp numuneler üretilmiş ve ek olarak gerçek yapılardan da karotlar alınmıştır. Schmidt Sertlik Çekici ve beton basınç deneylerinin uygulanmasının ardından bahsi geçen iki deney arasındaki ilişki, korelasyon eğrileri kurularak tespit edilmiştir.

Breysse (2012), yapmış olduğu çalışmada sahada dökümü yapılmış betonun gerçek dayanımını belirlemek için tahribatsız muayene yöntemlerinin neden ve nasıl kullanılacağı araştırmıştır. Çalışma a.) Mevcut yapıların derinlemesine analizi, b.) Daha önce yapılan laboratuvar çalışmalarını bir arada toplayıp, bir bilgi havuzu oluşturulması, c.) Tasarlanan sentetik simülasyonların geliştirilmesi ve analizi, şeklinde 3 ana unsurda incelenmiştir. Çalışmalarının sonucunda ise dayanım tahminlerindeki sapmaları; model hatalarından daha çok ölçüm hatalarının etkilediğini belirlemiştir.

Bingöl (2013) yapmış olduğu çalışmada beton basınç dayanım değerlerinin korelasyonu sağlanmış tahribatsız metotlarla belirlenmesi amacıyla deneysel çalışmalar yapmıştır. Çalışmada 15x15x15cm boyutunda 101 küp beton deney elemanı imal edilmiştir. Deney için üretilen beton küp bloklara 7 ve 28 gün beton yaşlarında tahribatsız muayene yöntemleri olan Schmidt Çekici ve Ultra Ses yöntemleri ile dayanım tespitleri yapılmıştır. Tahribatsız yöntemlerden sonra beton numuneler basınç dayanımı testine tabii tutulmuştur. Ultra ses dalga hızı, Schmidt geri tepme değeri ve basınç dayanımı arasında çoklu regresyon analizi yapılarak yeni formülasyonlar ve abak elde edilmiştir. Tahribatsız metotlar numune yaşı 90 ve 180 günlük iken tekrarlanmış ve abak değerleri kontrol edilmiştir. Çalışma sonucunda ise tahribatsız metotların, beton dayanımın tespitinde %85 oranında doğruluk oranına sahip olduğu görülmüştür.

Çakıroğlu vd. (2014), yapmış oldukları çalışmada, çelik lif katkılı beton numunelerinin, tahribatsız metotlar olan Schmidt Çekici ve Ultra Ses yöntemleri ile elde edilmiş dayanımlarını kullanarak, uyarlanabilir sinirsel ağlar ile basınç dayanım tahminindeki parametreleri optimize etme üzerine çalışmışlardır. Bu çalışmalarını gerçekleştirmek adına 4 çeşit geometrik yapıda ve karışım oranında çelik lif katkılı, 15x15x15cm beton blok boyutlarında, 18 tane ve katkısız olacak şekilde de 6 tane beton deney elemanı üretmişlerdir. 7 ve 28 beton yaşındaki numuneler üzerinde tahribatsız

deneyler yapıldıktan sonra basınç dayanımı testleri yapılmış ve uyarlanabilir sinir ağları çıktıları ile kıyaslanmıştır.

Güçlüer vd. (2017), yapmış oldukları çalışmada farklı ocaklardan temin edilmiş farklı özellikteki agregalar ile üretilmiş beton numuneleri üzerinde tahribatsız deneyler yapmışlardır. 7, 28, 90 ve 180 günlük numuneler üzerinde yapılan deneylerde, tahribatsız metotlar olan Schmidt Sertlik Çekici ve Ultra Ses yöntemleri ile beton numunelerin dayanımları tespit edilmiştir. Çalışmanın sonunda Schmidt Çekici ve Ultra Ses yöntemi arasındaki ilişkiler irdelendikten sonra, tahribatlı deneyler de gerçekleştirilmiş ve tahribatlı ve tahribatsız yöntemlerin de kıyasları yapılmıştır.

Literatürde erişilebilen çalışmaların, *genel olarak*, mevcut betonarme yapılarda Schmidt Sertlik Çekici ve Ultra Ses yöntemlerinin beton dayanım tayininde kullanımını önerdiklerini ifade etmek mümkündür.

2.2. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile Betonarme Binalarda Dinamik Davranış Parametrelerinin Elde Edilmesine İlişkin Çalışmalar

Deneysel modal analiz, kaynağı belirli titreşimlerle veya ortam titreşimleri ile herhangi bir yapının, makine elemanının ve daha birçok nesnenin dinamik davranış parametrelerinin tespiti şeklinde yorumlanabilir. Birçok disiplinde çok geniş kapsamlı araştırmaların temelini oluşturan deneysel modal analiz çalışmalarının tarihçesi 1940'lara kadar dayanmaktadır. Deneysel modal analiz yöntemi öncelikli olarak otomotiv, makine, uzay, havacılık vb. alanlarda yapılan çalışmalarda kullanılmıştır.

Lewis ve Wrisley (1950), Massachusetts Institute of Technology'de yapmış oldukları çalışmada karmaşık yapılarda, özellikle modern uçak üretimlerinde matematiksel modellerden ziyade deneysel modal parametrelerin artan önemine vurgu yapmışlar ve uçaklarda aerodinamik ve dayanım artırma yollarını deneysel modal analiz çalışmalarıyla araştırmışlardır. Laboratuvarlarda 24 adet sarsıcı ile yaptıkları çalışmaları matematiksel modellerle kıyaslamışlardır.

Rieger (1986), yapmış olduğu çalışmada; türbin temellerinde, çelik boru sistemlerinde ve makine elemanlarında, kendi ortam titreşimlerinin oluşturduğu etki ile

modal analiz çalışmalarını yapmış ve analiz sonuçları ile sonlu eleman modelinin sonuçları arasındaki ilişkileri araştırmıştır.

Çelik ve Aykan (2004), yapmış oldukları çalışmada tank namlularının; her türlü arazi şartlarında, seyir halinde ve hareketli hedeflerde en iyi sonucu vermesi için OMA çalışmaları ile optimizasyonunu araştırmışlardır. Sonuç olarak çalışma tank gibi ağır bir sistemin OMA ile doğal frekanslarının bulunmasını, stabilizasyon ve arazi şartları altında namlu ucu deplasmanlarının elde edilmesini ve salınımları azaltıcı önlemleri içermektedir.

Gelişen deneysel modal analiz araştırmaları ile 1970'li yıllarda inşaat yapılarının da gerçek dinamik davranışları belirlenebilir parametreler şeklinde sunulmaya başlanmıştır.

Pavic vd. (1998), yapmış oldukları çalışmada İngiltere'de bulunan iki adet yaya geçidinin deneysel modal analiz yöntemi ile modal parametrelerini elde etmişlerdir. Yapı için geliştirilen sonlu eleman modelinin sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırılıp deneysel parametrelere göre model güncelleme çalışmaları yapılmıştır.

Cunha vd. (2004), yapmış oldukları çalışmada; Portekiz, Lizbon'da bulunan Vasco Da Gama Köprüsü'nde, ortam titreşimleri kullanarak köprüye ait dinamik davranış parametrelerini belirlemeye çalışmışlardır. Bu çalışmalar esnasında dinamik karakteristikleri belirlerken Frekans Alanında Ayırıştırma ve Stokastik Altalan Belirleme yöntemlerini kullanıp elde edilen sonuçları kıyaslamışlardır.

El-Borgi vd. (2004) yapmış oldukları çalışmada, Tunus-Msaken otoyolundaki 8 açıklıklı betonarme bir köprü olan Boujnah Köprüsünün dinamik karakteristiklerini analitik ve deneysel yöntemlerle belirlemişlerdir. Deneysel çalışmalarında ortam titreşimleri yöntemini kullanarak deneysel modal parametreler elde edilmiştir. Bununla birlikte yapının SAP2000 yapı analiz programı ile deneye esas sonlu eleman modeli oluşturulup deneysel ve analitik çalışmaların kıyası yapılmıştır. Sonlu eleman modeli güncelleştirme çalışmaları ile araştırma tamamlanmıştır.

Choi vd. (2010), yapmış oldukları çalışmada, Güney Kore'de bulunan Ulchin nükleer enerji santralinin dinamik davranış parametrelerini çevresel titreşim kaynakları kullanarak tespit etmişlerdir. Bu çalışma kapsamında yapılan deneylerle doğal frekanslar ve bunlara karşılık gelen mod şekillerine ve ayrıca sönüm oranlarına ulaşılmıştır. Bu

çalıma sayesinde sonlu eleman modelinde betonun elastisite modülü ve dayanımı yeniden güncellenirken çalışmada nükleer santral için belirli periyotlarla yapısal bütünlük araştırmaları yapılması gerekliliği tespit edilmiştir.

Foti vd. (2012), yapmış oldukları çalışmalarda İtalya’da bulunan tarihi bir kulede, ortam titreşimi tabanlı çalışma ile yapıya ait dinamik parametreleri, deneysel olarak elde etmişlerdir. Çalışma kapsamında incelenen yapının kendi fizyolojisinden ötürü ortam titreşimleri kaydı, yapının yalnızca tek cephesinden alınabilmiştir. Devamında yapıya ait sonlu eleman modeli, deneysel sonuçlar ışığında güncellenmiştir.

Grosel vd. (2014) yapmış oldukları çalışmada, farklı imalat türlerindeki (çelik, betonarme vs.) inşaat yapılarının dinamik davranışlarını, operasyonel ve klasik modal analiz yöntemleriyle ve aynı zamanda farklı sinyal işleme teknikleriyle değerlendirme altına almışlardır.

Endüstriyel üretimi nispeten daha kolay ve fabrikasyon bir malzeme olan beton ile üretilen betonarme yapılar, Türkiye’de ve diğer birçok ülkede yapı stokunun büyük bir yüzdesinde hâkimiyet kurmuştur. Literatürde yer alan ilgili çalışmaların kronolojik ilerleyişine bakıldığında yapı stokundaki bu değişimin etkisiyle, binalar üzerinde yapılan deneylerde de odağın betonarme yapılara kaymış olduğu görölmektedir. Yapılarda ortam titreşimine verilen tepkilerin ölçölmesi esasına dayalı olarak yapılan OMA yöntemi, zaman içinde betonarme yapıların geçirdiği süreçlerdeki bilinmeyenlerin aydınlatılması adına kullanılmaya başlanmıştır. Literatür araştırmalarının bu kısmında çok katlı betonarme yapılar için oluşturulan dizin sunulmuştur.

Ventura vd. (2001) yapmış oldukları çalışmada Kanada’da bulunan Heritage Court Tower adındaki 15 katlı perde çekirdekli betonarme bir yapıda ortam titreşimleri altındaki davranışları belirlemeye çalışmışlardır. Çalışmalara esas alınacak sonlu eleman modeli binanın tasarım dokümanlarından faydalanarak FEMtools programında yapılmış olup teorik modal parametreler elde edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen modal parametreler analitik modelle kıyaslanmıştır. Devamında deneysel çalışmaların ışığında analitik model güncellenmiştir.

Ventura vd. (2004), yapmış oldukları çalışmada o dönemde Vancouver'daki en yüksek bina olma özelliğini taşıyan One Wall Center Kulesinde yapılan deneysel ve analitik çalışmalara genel bir bakış sunmuşlardır. 48 katlı olan betonarme binada dinamik

davranış parametrelerini belirlemek için ortam titreşimi tabanlı OMA yöntemini kullanmışlardır. Binanın geometrik yapısı ve özel birkaç yapısal bileşeni, binanın sonlu eleman modelinin oluşturulmasını güçleştirmişse de en nihayetinde binaya ait temel yanal ve burulma frekanslarını ve bunlara karşılık gelen sönüm oranlarının tespiti yapılmıştır.

Li vd. (2004) yapmış oldukları çalışmada; Güney Çin’de bulunan 63 katlı ve yaklaşık 200 m yüksekliği ile inşa edildiği zamanda Çin’in en yüksek betonarme binası olan Guangdong Uluslararası Binasının dinamik davranışının tam ölçekli ölçümlerinden elde edilen seçilmiş sonuçları açıklamışlardır. Bu çalışma kapsamında ek olarak dikdörtgen düşey en kesitteki binalarda rüzgâr etkilerini çok geniş parametrelerde incelemiştir.

Wu ve Li, (2004) yapmış oldukları çalışmada; 310 m yüksekliğindeki betonarme çekirdekli Nanjing TV Tower’ın sonlu eleman modelinin yüksek duyarlılığa getirilmesi amacıyla güncellenmesi için ortam titreşimleri ile yapının dinamik davranış parametrelerini belirlemişlerdir. Farklı matematiksel modeller içeren çözümlerle en yüksek hassasiyette bir sonlu eleman modelinin üretimi, çalışma kapsamında tamamlanmış olup Ağırlıklı En Küçük Kareler Yöntemine dayalı sonlu eleman modeli, Nanjing TV Tower için en etkili yöntem olduğu belirlenmiştir.

Ventura ve Thibert (2007), yapmış oldukları çalışmada Kanada, Vancouver’da bulunan 32 katlı betonarme bir bina üzerinde, bina yapım süreçlerinin farklı aşamalarındaki çevresel titreşim tabanlı dinamik davranış parametrelerini belirlemeye çalışmışlardır. Bu çalışmada çok katlı binanın dinamik karakteristikleri olan; mod şekilleri ve periyotları, Frekans Tanım Alanı Yöntemiyle elde edilmiştir.

Thibert vd. (2007) yapmış oldukları çalışmada Kanada, Vancouver’da bulunan 46 katlı betonarme perde çekirdekli bir bina üzerinde, ortam titreşimi tabanlı dinamik parametrelerin belirlenmesini, zemin perspektifinde ele almışlardır. Yapı zemin etkileşimi dikkate alınarak elde edilen deneyler sonucunda binanın mod şekilleri, doğal frekansları ve sönüm oranları elde edilmiştir.

Zhou ve Yi, (2008) yapmış oldukları çalışmada, Çin’in Shenzhen şehrinde bulunan 86m yüksekliğindeki betonarme çekirdek perdeli Ruihua binasında, ortam titreşimi tabanlı dinamik davranış parametreleri belirleme deneyleri yapmışlardır. Bina mimarisi, katlar arası hava koridorları ve genişletilmiş oturma alanı ile farklılık

gösteren, birbirine bağlı iki kule yapısından oluşmaktadır. Binaya ait numerik sonlu eleman modelleri oluşturulup, binanın teorik modal parametreleri hesaplandıktan sonra bina üzerinde çevresel titreşim ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonunda doğal frekanslar karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda bağlı kule yapılarının frekans değerleri diğer ülkelerdeki yüksek bina yönetmeliklerinin beklentilerine göre daha yüksek çıktığı görülmüştür. Ek olarak binada bulunan katlar arası havalandırma kanallarının mod şekillerinde etkisinin olduğu görülmüştür.

Bayraktar vd. (2010) farklı yapım aşamalarında bulunan üç adet betonarme bina üzerinde yapmış oldukları çalışmada, bina imalat aşamalarına göre dinamik davranış parametrelerinin değişimlerini göstermek istemişlerdir. Bu amaçla matematiksel modellerle üç yapıya ait birinci doğal frekanslar hesaplanmıştı ve deneysel verilerle kıyaslanmıştır. Sonucunda ise deneysel frekansların her bina için teorik frekanslardan daha büyük değerlerde olduğu görülmüştür.

Bayraktar vd. (2010) yapmış oldukları çalışmada mevcut bir betonarme binada deneysel olarak belirlenen dinamik özellikleri göz önünde bulundurarak binadaki patlama etkilerini değerlendirmeyi amaçlamışlardır. Çalışma üç aşamadan oluşmaktadır: patlatma titreşim özelliklerinin ölçümü, denetlenen binanın teorik modal analizi ve modal test kullanılarak dinamik özelliklerin ortam titreşimleri ile deneysel olarak doğrulanması. Çalışmada, zemindeki sismik dalga iletimleri “jeofon” ile ölçülerek sert toprak zeminde sismik dalga iletimi de gözlemlenmiştir.

Shi vd. (2012) yapmış oldukları çalışmada, Çin’in Şangay Şehrinde bulunan 492 m yüksekliğinde ve 101 katlı olan, betonarme-çelik sistemi ile inşa edilen Dünya Finansal Merkezinin dinamik davranış parametrelerinin güncellemesini yapmışlardır. Çalışma kapsamında zorlanmış titreşim ve ortam titreşimi baz alınarak elde edilen titreşim verileri farklı modal tanımlama teknikleri ile analiz edilmiştir.

Boru ve Kutanis (2015), yapmış oldukları çalışmada 1975 Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmeliğe tabii olarak inşa edilmiş 6 katlı betonarme bir yapıdan ortam titreşimleri alarak modal parametrelerin deneysel hesaplarını yapmışlardır. Bununla birlikte yapılan analitik modellerden elde edilen teorik modal parametreler, deneysel modal parametrelerle de kıyaslanarak sonlu eleman modeli güncellenmiştir.

Zhang vd. (2017), yapmış oldukları çalışmada çok katlı ve geniş sahalarda ortam titreşimi tabanlı OMA araştırmaları yapmışlardır. Bu çalışma ile birlikte geniş sahalarda sınırlı sayıda cihazlarla ölçüm almak için çoklu kurulum (referans sensör) metodunu kullanmışlardır. Çalışma kapsamında ivmeölçer cihazlarının kurulum yerlerinin, referans cihaz sayısının ve konumunun belirlenmesi için en optimal sensör kurulumunu araştırmışlardır.

Asgarian ve McClure (2017), Kanada’da yapmış oldukları çalışmada; 4 katlı betonarme bir yapıda, OMA yöntemi ile ulusal bina yapım mevzuatında bahsi geçen yapısal olmayan bina bileşenlerinin, yapının deprem performansına etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada ortam titreşimleri kullanılarak katlar arası öteleme miktarları, OMA yöntemi ile hesaplanmış olup binaya ait dinamik davranış parametreleri elde edilmiştir. Çalışmada, yapısal olmayan bina bileşenlerinin deprem performansları için ulusal mevzuata iyileştirme önerilerinde bulunmuşlardır.

Zhu vd. (2018), yapmış oldukları çalışmada 8 katlı betonarme bir yapıda ortam titreşimleri kullanarak OMA yöntemi ile dinamik davranış parametrelerini belirlemişlerdir. Çalışmada her kat için ayrı ayrı kurulumlar yapılarak senkronize olmamış ortam titreşim kayıtları almışlardır. Modal tanımlama, asenkron veri için Bayesian frekans alanı yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiş ve global mod şekli, en küçük kare yöntemi kullanılarak birleştirilmiştir. Aynı zamanda eş zamansız verilere dayalı olarak tanımlanan modal parametreler, eşzamanlı verilere dayalı olarak tanımlananlarla karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

Tahribatsız bir yöntem olan OMA’nın sadece betonarme yapılarda değil farklı malzemeler (yığma, çelik, vb.) kullanılarak imal edilen yeni yapılara ek olarak tarihi yapılar için de muhtelif amaçlar doğrultusunda kullanıldığı ifade edilmelidir. Ancak, bu uygulamalar tez kapsamı dışında olduğundan ilgili literatüre burada yer verilmemiştir.

2.3. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile Betonarme Binalarda Hasar Tespitine İlişkin Çalışmalar

Literatürde erişim sağlanabilen çalışmalardan elde edilen çıkarımlarla; OMA yönteminin, mevcut yapıların dinamik davranış parametrelerini yerinde belirlemede sıkça kullanılan, etkili yöntemlerden biri olduğu rahatlıkla söylenebilir. Bu yöntem ile yerinde

(*in-situ*) ölçülen dinamik davranış parametreleri, tüm inşaat yapıları için oldukça önemli teknik bir veridir. Deprem bölgelerindeki yapılarda, yüksek yapılarda, büyük hacimli ulaştırma yapılarında (köprü, viyadük vs.) ve diğer türlerdeki tüm inşaat yapılarında sismik analizler, yapı sağlığı izlemesi gibi çalışmalar ancak dinamik davranış parametrelerinin tayini ve takibi ile yapılabilmektedir.

Bahsi geçen yapı türlerinin bir kısmında, örneğin yüksek yapılarda, dinamik etmenler sürekli olarak bina üzerindeki etkilerini göstermektedir. Bu duruma karşı her ne kadar tasarım mühendisleri önlem alıyor olsalar da betonarme malzemenin tasarlanan dayanımı vermesi birçok parametreye bağlıdır. Bu sebeple bu tür önemli binalarda, dinamik parametre bilgilerinin belirli periyotlarla güncellenmesi ve varsa hasar tespitlerinin yapılması gerekmektedir. Literatürde bu konunun yapı sağlığı izlemesi adı altında da irdelendiği görülmüştür. Aşağıda betonarme binalar için yapılan literatür taraması bilgileri sunulmuştur.

Bayraktar vd. (2009) yapmış oldukları 106M038 numaralı TÜBİTAK projesinde yapı sistemlerinde meydana gelen hasarların, yapının dinamik davranış parametrelerinde meydana gelen değişimler ile tespitini araştırmışlardır. Çalışma kapsamında dinamik davranış parametreleri OMA yöntemi ile tespit edilmiştir. Bu çalışma kapsamında ½ ölçeğinde; çelik kolon, tek katlı betonarme yapı ve üç katlı betonarme yapı inşa edilmiştir. Yapıların sonlu eleman modellerinin de güncellenmesi adına her aşamada OMA çalışmaları yapılmıştır. Analitik model, ½ ölçekli çelik kolon ve ½ ölçekli betonarme yapı sistemleri ile gerçekleştirilmiş deneyler sonucunda elde edilen değerlendirmede; kolon model için hasarın yeri, miktarı ve yapı davranışına etkisi yeterli doğrulukla belirlenebilirken, çerçeve sistemler için mevcut algoritmaların etkin sonuç vermediği ve daha gelişmiş algoritmalar kullanılması gerektiği ortaya çıkmıştır.

Bakır vd. (2011) yapmış oldukları 107M573 numaralı TÜBİTAK projesinde; beş katlı betonarme bir okul binası için; on yedi adet ivmeölçer ve bir adet veri toplama sistemi ile üç yıl boyunca yapı sağlığı izlemesi yapmışlardır. Proje boyunca bina üzerinde birçok dinamik davranış parametresi belirleme yöntemleri uygulanmış ve sonuçları kıyaslanmıştır. Ek olarak çalışmalar için ANSYS programında kapsamlı bir sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Ayrıca çalışma kapsamında üç farklı paket program geliştirilmiş olup AUTOM adında, ivmeölçer yerleşim problemini en optimum düzeyde çözen program bunlara örnek olarak gösterilebilir.

Soyoz vd. (2013) yapmış oldukları çalışmada; 6 katlı betonarme bir binada, sismik güçlendirme uygulamasının binanın modal özelliklerine olan etkilerini, ortam titreşimi tabanlı ölçümlerle incelemişlerdir. Betonarme binanın güçlendirilme çalışmalarından önce, çalışma esnasında ve güçlendirilme çalışmalarının sonunda ortam titreşimi kayıtları alınmıştır. Güçlendirme adı altında binada kolonlarda en kesit artırma ve yeni taşıyıcı duvarlar ekleme yoluna gidilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda binanın modal frekanslarında yaklaşık olarak %96'lık bir artış gözlemlenmiştir.

López vd. (2017) yapmış oldukları çalışmada, Şili'de bulunan; deprem ve tsunamiler tarafından oluşturulan sismik ve hidrodinamik etkilerden kaynaklanan önemli deformasyon ve hasarlara açık on dört katlı yüksek betonarme bir binanın yapısal sağlık değerlendirmesini araştırmışlardır. Çalışmada bina için tahribatsız yöntemlerle malzeme deneyleri, ortam titreşimleri ile dinamik davranış parametrelerini tanımlamak için OMA çalışmaları ve nümerik analizler yapılmıştır. Bu çalışma kapsamındaki yapısal değerlendirmenin amacı; olası bir tsunami felaketinde binada bulunanları tahliye edebilecek düzeyde bir yapısal kapasitenin varlığını araştırmaktır.

Gargaro vd. (2017), yapmış oldukları çalışmada, İtalya'da son dönemlerde meydana gelmiş L'Aquila (2009) ve Amatrice (2016) depremlerinden sonra hastane türü binaların sağlığını uzaktan takip edip yapısal işlevin ortam titreşimi analiziyle anlık tespitini araştırmışlardır. Bu çalışma, meydana gelebilecek doğal afetler sonrasında, "Akıllı Sağlık Tesisi" şeklinde oluşturulmuş hastane binalarının; yapısal işlevlerini uzaktan tespit edip geri kalan yönetimsel ve diğer alt organizasyonları harekete geçirebilecek bir kontrol-yönetim ağının oluşturulmasını tavsiye etmiştir. Ayrıca bu çalışmada tıbbi cihazların doğal afet sırasında ve sonrasında en güvenli ve doğru kalibrasyonda çalışmaları için de öneriler sunulmuştur.

Gara vd. (2017) yapmış oldukları çalışmada, 2016'da Orta İtalya'da meydana gelen depremde Orta-Doğu İtalya'da bulunan Camerino kasabasındaki 1960'larda yapılmış bir okul yapısını incelemişlerdir. Bahsi geçen okul, depremde hasar görmüş ve sonrasında okul binasına yük dağıtıcı sönümleyiciler bulunduran bir iskele ile güçlendirme çalışmaları yapılmıştır. Güçlendirme sonrasında binanın dinamik davranış parametreleri ortam titreşimleri ile belirlenmiştir. Çalışmalar sonucunda bina ivmeölçerlerle izlenmiştir. Bu izlenme esnasında meydana gelen artçı deprem dalgalarının etkileri ile modal davranışın yeniden güncellenmesi yoluna gidilmiştir.

Çalışmanın sonunda yapıya ait güncel bir sonlu eleman modeli oluşturularak çalışma sonuçlandırılmıştır.

Altunışık vd. (2018) yapmış oldukları çalışmada laboratuvar ortamında $\frac{1}{2}$ oranında iki açıklıklı iki katlı betonarme bir çerçeve üretmişlerdir. Üretilen bu çerçeveye ait dinamik davranış parametreleri ortam titreşimi tabanlı olarak OMA yöntemiyle elde edilmiştir. Sonrasında yapı kolon-kiriş birleşimleri hasarlı hale getirilerek yeniden modal analizleri yapılmıştır. Sonrasında yapı karbon fiber ile güçlendirilip dinamik davranış parametreleri yeniden elde edilmiştir. Çalışmada yapının hasar tespitleri ve güçlendirme sonrasında dayanımlarının ne kadarını kazandığının tespitleri yapılmaya çalışılmıştır.

Tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda; tip proje ile üretilmiş iki adet çok katlı betonarme binanın, yapım kalitesi ve uygulama pratikleri açısından kalite kontrolleri yapılmıştır. Çalışmalar, tip proje ile imal edilen betonarme binaların mimari ve statik raporlarından elde edinilen statik ve dinamik tasarım bilgilerinin irdelenmesi ile başlamıştır. Daha sonrasında yüklenici firma tarafından belirlenen beton dayanımlarının, gerçek yapıda ne durumda oldukları tahribatsız metotlarla araştırılmıştır. Binalara ait tasarım değerleri ve mimari projeler ile tez çalışmasına esas alınacak sonlu eleman modeli, SAP2000 yazılımı ile oluşturulmuştur. Sonrasında yapılan araştırmanın temelini oluşturan OMA çalışmalarına başlanmıştır ve yöntem bahsi geçen binaların farklı yapım aşamalarında uygulanmış ve binalar için belirlenen deneysel dinamik davranış parametreleri ile binanın yapım kalitesi ve uygulama pratikleri araştırılmıştır.

Tez kapsamında yapılan çalışmalarda kullanılan bilimsel yöntemlerin ve yaklaşımların, çok katlı betonarme bina materyali perspektifinde araştırılması ile oluşturulan literatür dizininde görüldüğü üzere; OMA yöntemi betonarme binalarda meydana gelen yapısal değişiklikleri; araştırmacılara kolaylıkla sunabilmektedir. OMA yönteminin yapısal araştırmalardaki bahsi geçen kolaylığı sunması, bu tez çalışmasının çıkış noktası olarak görülmüştür. İmalatı henüz bitmiş inceleme yapıları, servis ömürlerine başlamadan önce yapım kalite kontrolü amaçlı deneylere tabii tutulmuştur. Bu durum; binada beklenen modal davranıştan farklı bir davranış görüldüğünde, sorunun bina imalatındaki ve uygulama pratiklerindeki yetersizlikleri ortaya çıkarabileceğini göstermektedir.

Erişilebilen literatürdeki çalışmalar belirli bir servis ömrünü tamamlamış bulunan, çevresel etkilere çok uzun yıllar maruz kalmış binaların, dinamik davranışlarının güncellenmesi adına veya kültürel, ekonomik ve önem katsayısı yüksek binaların yapısal sağlıklarının irdelenmesi üzerine yoğunlaşmış durumdadır. Bu noktada tez kapsamında deneysel çalışma olarak yapılan, imalatı henüz bitmiş betonarme yapılarda, yapım ve uygulama pratiklerinin kontrolü, bu çalışmayı literatürdeki diğer çalışmalardan ayıran temel unsur olarak öne çıkmaktadır.



3. MATERYAL ve YÖNTEM

Tez çalışmasının bu kısmında betonarme çerçeve-perde taşıyıcı sistemli, 5 katlı iki adet betonarme binanın OMA yöntemiyle dinamik davranış parametrelerinin tespit edilmesine yönelik yapılan çalışmalar ve takip edilen yöntemler hakkında bilgiler sunulmuştur.

3.1. İncelenen Binaların Tanıtılması

Tez kapsamında materyal olarak Erzurum İli, Yakutiye İlçesi, İstasyon Mahallesi, 2 Ada, 37 Parselde bulunan Erzurum Teknik Üniversitesi (ETÜ)’ne ait lojmanların 8. ve 9. bloklarının değerlendirilmesine karar verilmiş ve yasal izinler alınarak çalışma gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.1’de çalışma yapılan alan coğrafik olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.1. ETÜ Lojmanlarının Erzurum Haritasındaki Konumu (Anonim, 2013)

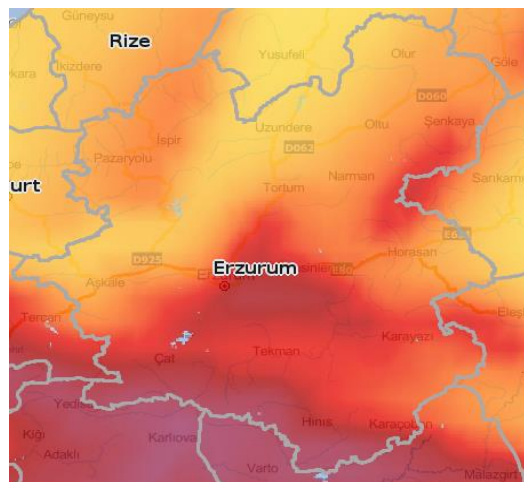
Binanın projelendirildiği dönemde geçerli olan deprem yönetmeliğine göre inşaat sahası Erzurum’un kuzeydoğusunda, II. derece deprem bölgesinde bulunmaktadır (DBYBHY,2007). Şekil 3.2’de görüldüğü üzere inşaat sahası; aktif fay hatlarına, şehir merkezine oranla nispeten daha uzak konumdadır.



Yüklenici firma tarafından binaların inşa edileceği sahada zemin sınıfı belirleme çalışmaları 2007 yılında yürürlüğe girmiş deprem yönetmeliği (DBYBHY-2007) esaslarına göre yapılmıştır. Zemin etüt raporundan elde edilen sonuçlara göre;

- Zeminin, C sınıfı zeminlere ait mekanik özelliklere sahip olduğu görülmüştür.
- Zeminin, yükseklik profili ve mekanik özellikleri bilgisi ile Z2 yerel zemin sınıfında olduğu görülmüştür.
- Zemine ait yatak katsayısı 30.000 kN/m^3 olarak belirlendiği görülmüştür (Anonim, 2013).

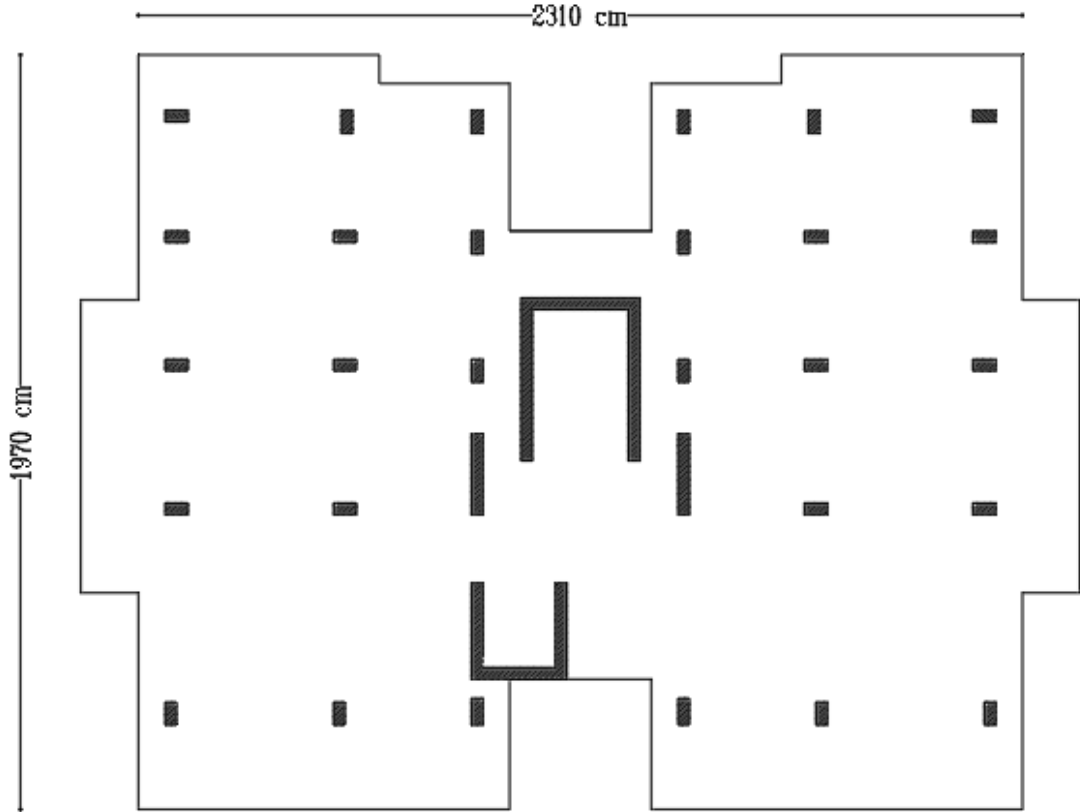
Ek olarak Ocak 2019’da yürürlüğe giren Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine göre Erzurum için belirlenen yeni deprem tehlike haritası da Şekil 3.3’te gösterilmiştir (TBDY, 2018).



Şekil 3.3. TBDY 2018'e Göre Erzurum Deprem Haritası (Anonim, 2019)

Yürürlüğe giren yeni deprem yönetmeliği ile birlikte güncellenen deprem haritasında görüldüğü üzere Erzurum'da da deprem riskinin arttığı gözlemlenmektedir (Anonim, 2019). Ek olarak yenilenen deprem yönetmeliğinde zemin sınıflarının tespit çalışmaları da değişiklikler göstermektedir. Spesifik yapılar için gerekli durumlarda sahaya özel çözümler dahi önerilmektedir (TBDY, 2018).

Tez kapsamında incelenen çok katlı betonarme binalar; mimari ve statik olarak tek tip projeden imal edilmiştir. Binaların oturma alanları 18x23 metre olacak şekilde tasarlanmıştır. Binalar için, mimari tasarım aşamasında taşıyıcı sistem, betonarme perdeli - çerçeve sistem ve temel sistemi ise radye temel türü olarak seçilmiştir. Binaların mimari tasarımından sonra statik projelendirilmesi, yüklenici firma tarafından STA4CAD yazılımı ile yapılmıştır. Yine betonarme binaların deprem tasarımına esas alınacak dinamik davranış parametre analizleri de STA4CAD yazılımı ile yapılmış olup binaya ait dinamik davranış parametreleri (frekans, mod şekli ve sönüm oranı) statik hesap raporunda belirtilmiştir. Şekil 3.4'te normal kat kolon aplikasyon planı görülmektedir. Bodrum katı bulunmayan ve giriş katı kapalı garaj alanı olarak tasarlanan binalarda; garaj katından sonra ağır çıkmalar mevcuttur.



Şekil 3.4. Binaların Normal Kat Kolon Aplikasyon Planı

Çalışmada incelenen betonarme binalar için mimari tasarım aşamasında kat yükseklikleri, 325 cm olarak tasarlanmıştır. Binalarda; 1 garaj katı, 4 normal kat ve 1 çatı katı ile toplamda 6 kat bulunmaktadır. İncelenen betonarme binalar için tasarım C25 beton ve S420 donatı ölçütleri üzerinden devam etmiştir. Bununla birlikte proje başlangıcında, garaja araç girişini kolaylaştırmak adına baş ve son akslardaki kolonlar 90° döndürülmüştür.

Tez çalışmaları boyunca binaların bulunduğu saha inşaat halinde olup binalar farklı yapım aşamalarında iken dinamik davranış parametrelerinin belirlenmesi amacıyla yapısal titreşim ölçümleri alınmıştır. Şöyle ki; ilk ölçüm alınacağı zaman Erzurum bölgesinde kış mevsimi yaşanmaktaydı ve binalarda dolgu duvar imalatı sadece ilk 3 katta tamamlanmıştı. Ardından yapılan ikinci ölçümde Erzurum'da ilkbahar-yaz mevsimleri yaşanmakta ve binalarda ince işçilikler başlamış durumdaydı. Tez kapsamında farklı yapım aşamalarında gerçekleştirilen OMA çalışmaları sayesinde tez çalışmasına yeni bir perspektif eklendiği düşünülmüştür.

3.2. Binalarda Kullanılan Beton Malzeme Dayanımının Belirlenmesi

Bu bölümde, daha önce detaylıca bilgileri verilen ve tez kapsamında incelenen çok katlı betonarme yapılardaki, beton malzemeler için sahada kazanılmış mevcut dayanımlarının saptanması adına yapılan çalışmalara ilişkin bilgi sunulmaktadır. Nispeten daha yoğun olarak kullanılan yapı malzemesinin beton olması ve malzeme içyapısının kabul edilenin aksine aslında heterojen olması sebebiyle dayanım araştırmaları beton üzerinde yoğunlaşmıştır.

Tez için belirlenen araştırma konusunda yapılan çalışmalar için en doğru sonucu elde edebilmek adına, teorik ve deneysel çalışmaların ortak noktası olan malzeme bilgilerinin mümkün olduğu kadar doğru şekilde bilinmesi gerekmektedir. Teorik olarak, yüklenici firmadan elde edinilen statik raporda, kullanılacak malzemenin beton için C25, donatı için S420 olduğu ifade edilmektedir. Tez kapsamında yapılan çalışmalarda, deneysel modal analiz yönteminin, ortam titreşimi etkilerine yapının gösterdiği tepkinin ölçülmesi esasına dayanan kısmı olan OMA yöntemi seçilmiştir. OMA çalışmalarının nihayetinde, yapı için gerçekleşmiş olan dinamik davranış parametrelerinin (doğal frekanslar, mod şekilleri ve sönüm oranları) tespitinin yapılması amaçlanmaktadır.

Deneysel olarak dinamik davranış parametrelerinin elde edilmesi ile birlikte, tezin amaçlarına yönelik değerlendirmeler yapılmış olacaktır.

Dinamik davranış parametrelerinin eldesi ile birlikte; yapım kalitesi kontrolü, teorik olarak kurgulanan modal davranış ile sahada gerçekleşen modal davranış arasındaki ilişkinin teknik olarak incelenebilmesi için yapıların sonlu eleman modelinin oluşturulması gerekmiştir. Zira çalışma başlangıcında elde sadece statik rapor bulunmaktadır; yapısal analize esas sonlu eleman modelinin SAP2000 ortamında yeniden oluşturulması gerekli görülmüş ve bu çalışma yapılmıştır. Yapısal davranışın sonlu eleman modeli üzerinde incelenmesi sürecinde, modelin hesaplamalarda deneysel modal davranış parametrelerini verecek şekilde güncellenmesi gerekebilecektir (SAP2000, 2020).

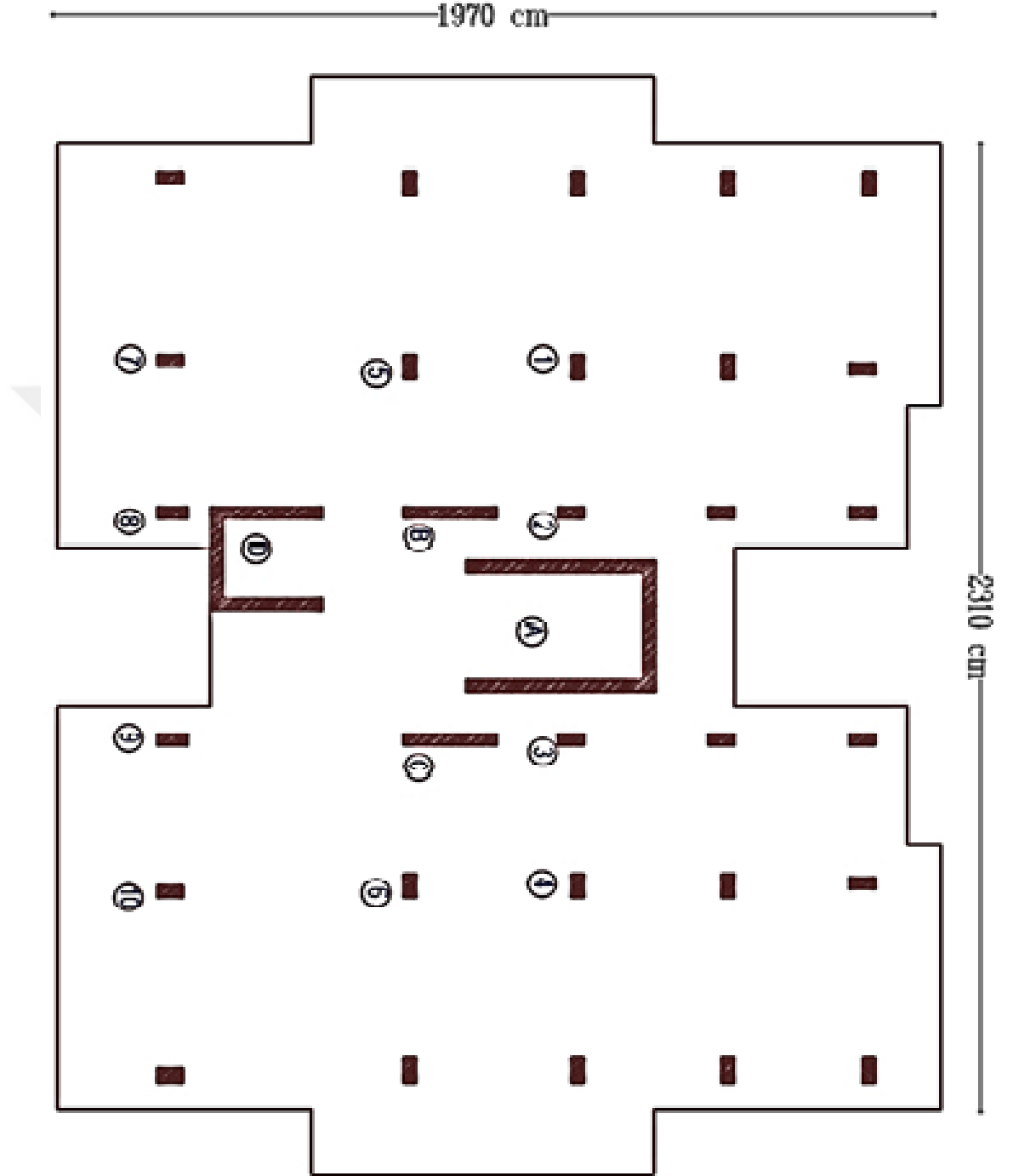
Sonlu eleman modelinin güncellenmesinde önemli bir ölçüt olan malzeme dayanımının tahribatsız bir şekilde belirlenmesi; aynı zamanda yapım kalitesi ve uygulama pratiği kontrolü amaçlarına yönelik önemli bir çalışma olduğu ifade edilmelidir. Bu maksatla incelenen betonarme binalarda, imalat sonrasındaki gerçekleşmiş dayanımların tespiti için düşey taşıyıcı elemanlar üzerinde “Tahribatsız Yöntemler” olan Schmidt Sertlik Çekici ve Ultra Ses Deneyleri uygulanmıştır. Bununla birlikte, yapının tüm imalat aşamalarında, yapı denetim kontrolünde sahada dökülen taze betondan alınan numunelerin laboratuvar ortamında tahribatlı olarak yapılan basınç dayanım testlerinin sonuçları da karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir.

Schmidt Sertlik Çekici ve Ultra Ses deney sonuçlarının anlamlandırılabilmesi için belirli bir istatistiğin oluşturulması gerekmektedir. Bu konuda 6306 sayılı kanunun uygulama yönetmeliğinin Ek-2 bölümünde sunulan Riskli Yapıların Tespit Edilmesine İlişkin Esaslar (RYTEİE), yapılacak olan tahribatsız deneylere bazı standartlar getirmektedir (RYTEİE, 2019).

Riskli yapılar yönetmeliğinin tahribatsız muayene yöntemlerinin yönergelerine uygun olarak incelenen tip proje ile imal edilmiş 2 binada; her katta düşey taşıyıcı eleman olarak 28 adet kolon 4 adet perde elemanı bulunmaktadır. Binalar aynı yüklenici tarafından inşa edilmek üzere ihale edilmiştir. Düşeyde, taşıyıcı sistem sürekli; üst katlarda kolon ya da perdelerde kesinti ya da kesit değişikliği söz konusu değildir. İstatiksel olarak normal dağılımı elde etmek adına her bir katta 10 adet kolona ve mevcut

3. MATERYAL ve YÖNTEM

perdelerin tamamına tahribatsız yöntemlerle deneyler yapılmıştır. Deneyler yapılırken Şekil 3.5’de gösterilen deneysel ölçüm şemasına bağlı kalınmıştır.



Şekil 3.5. Tahribatsız Muayene Yapılacak Taşıyıcı Elemanların Gösterimi

3.2.1. Schmidt sertlik çekici deneyi ile dayanım belirleme

Schmidt Sertlik Çekici, beton dayanımını yüzey sertliklerine göre belirleyen ve tahribatsız sonuç veren bir deney aletidir. Aynı zamanda deney yapılan beton birim için betonun düzgün dağılımını kontrol etmek içinde kullanılmaktadır (Erdal vd., 2003).

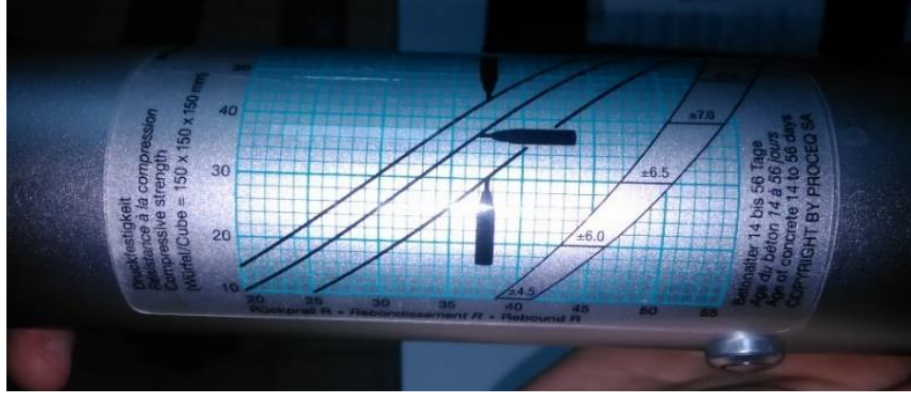
Schmidt Sertlik Çekicinin çalışma prensibi; sürekli aynı büyüklükte kuvvet üreten bir mekanizmanın, deneyin uygulandığı yüzeyde oluşturduğu tepki kuvvetini ifade eden bir R tepme katsayısı üretmesi esasına dayanır. Bu tepme katsayısı cihazın kendi mekanizmasına göre bir kalibrasyona tabii tutulur ve nihayetinde beton dayanımına ulaşılır. Genelde bu kalibrasyon eğrileri cihaz üzerinde bulunmaktadır.

Deneyin uygulanma sırasında dikkat edilmesi gereken hassas noktalar bulunmaktadır. Öncelikle Schmidt Sertlik Çekici ile deney yapılacak elemanların yüzeyleri pürüzsüz, temiz ve kuru olması gerekmektedir. Beton esasında heterojen bir malzeme olduğu için deney yapılan elemana ait dayanım tahminini yapmak için çekiç ile yüzeye birkaç vuruş yapılmalıdır. Çünkü çekicinin vuruş yaptığı yüzeye o vuruşta iri bir agregaya denk gelme ihtimali kaçınılmaz bir durumdur. Cihazdaki kalibrasyon, vuruş yönüne göre değiştiği için okumaların dikkatli yapılması gerekmektedir. Ek olarak vuruş yönü ister yatay ister dikey olsun, çekiç yüzeye hep dik olmalıdır. Cihazlar hassas oldukları için belirli aralıklarla kalibrasyonları kontrol edilmelidir (Baradan vd., 2012).

Tez kapsamında Şekil 3.6’da gösterilen Proceq L Tipi Schmidt Sertlik Çekici kullanılmıştır. Okunan R tepme katsayıları yine cihaz üzerinde bulunan ve Şekil 3.7’de gösterilen kalibrasyon eğrileri ile dayanıma çevrilmiştir.



Şekil 3.6. Proceq L Tipi Schmidt Sertlik Çekici



Şekil 3.7. Schmidt Sertlik Çekicisine Ait Kalibrasyon Eğrileri

Tez kapsamında araştırma yapılan betonarme binalarda dayanım tespiti deneyleri ilkbahar döneminde yapılmıştır. Deney yapılacak yüzeyler, öncesinde temizlenmiştir. Schmidt sertlik çekici uygulamasında, bahsi geçen diğer tüm teknik hususlara da dikkat edilmiştir. Şekil 3.8’de görüldüğü üzere betonarme elemanların yüzeylerinde nihai R tepme katsayısına karar verilirken birden fazla vuruş yapılmıştır. Sonrasında betonarme taşıyıcı elemanı temsil edecek nihai tepme katsayısına karar verilmiştir.



Şekil 3.8. Schmidt Sertlik Çekici Cihazı İle Yapı Taşıyıcı Elemanlarının Muayenesi

3.2.2. Ultra ses deneyi ile beton dayanım belirleme

Tez kapsamında betonarme yapılara uygulanan tahribatsız dayanım belirleme yöntemlerinden ikincisi de ultra ses yöntemidir. Bu yöntemle inceleme altındaki beton/betonarme elemanın, iki yüzeyi arasında geçiş sağlayacak yüksek frekans değerine sahip ultra ses dalgaları gönderilmektedir. İnceleme altındaki elemanın yüzeyler arası mesafesi belli olduğu için en temel hareket denkleminde dalganın geçiş süresi dolayısıyla dalganın hızı belirlenmektedir. Belirlenen bu parametreler beton dayanımına ulaşmayı kolaylaştıracak dolaylı bilgiler sağlamaktadır. Şöyle ki, dalga hızı temel olarak araştırmacıya betonun iç yapısına yani iç boşluklarına bağlı bir katsayı vermektedir. Bu katsayılar çeşitli korelasyon değerleri ile birleştirilip nihai beton dayanımı tespit edilmektedir. (Bingöl, 2013).

Beton/betonarme eleman içinden geçen ses üstü dalganın hızı; başlıkların betona tam temas edip etmemesine, aradaki mesafeye, ortam sıcaklığına, donatıya denk gelmesine ve nem durumuna bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir (Bingöl, 2013).

Tez kapsamında uygulaması gerçekleştirilen ultra ses yöntemine ilişkin genel bir görüntü Şekil 3.9’da sunulmaktadır. Yapının düşey taşıyıcı elemanlarında, kolonların her iki kesitinde (mümkün olan elemanlar için) ve perdelerin sadece kısa kesitinde ultra ses deneyleri yapılmıştır. Deney çalışmalarında ölçüm yapılan eleman yüzeyleri için gerekli yüzey hazırlıkları hassasiyetle yapılmıştır. Ultra ses deneyleri de yine ilkbahar döneminde yapılmıştır.



Şekil 3.9. Ultra Ses Cihazı İle Yapı Taşıyıcı Elemanlarının Muayenesi

3.2.3. Laboratuvar ortamında beton basınç dayanımı belirleme

Betonarme bina üretim süreçlerinde, yüklenici firmaların sürdürdükleri iş kalemlerinin, yapım işinin niteliğinin ve kalitesinin korunması açısından denetlenmesi 4708 sayılı yapı denetimi kanununca zorunludur. Bu yükümlülük gereğince; denetçi firmalar tüm yapım işinin projeye uygunluğuna onay vermeden yüklenici firmalar imalata devam edememektedir. Yapı denetim işlerinde dökülen betonun niteliğini kontrol etmek de önemli bir iş kalemi oluşturmaktadır.

Ek olarak betonarme tasarım yaparken kullanılan betonarme bina yapım yönetmeliğinde de beton kalitesinin belirli bir düzeyde olması ve buna göre imalat kabullerinin yapılması gerekliliği bildirilmiştir (TS 500, 2000). İlgili yönetmelikte beton kalitesinin denetlenmesi için alınması gereken beton numune sayıları ve koşulları etraflıca anlatılmıştır.

Tüm bu bilgiler ışığında tez çalışmalarının yürütüleceği betonarme binalarda, malzeme dayanım tespiti çalışmalarının kapsamını artırma adına, yapım aşamalarında denetçi firma tarafından alınan beton numunelerin tahribatlı bir şekilde laboratuvar ortamında yapılmış basınç dayanım test sonuçları da çalışmaya eklenmiştir. Buradaki temel amacın, yapım kalitesi kontrolü ve imalat pratiğinin irdelenmesi olduğunun altı bir kez daha çizilmelidir.

3.3. Modal Analiz

Tez kapsamında yapılan çalışmalarda, yapım kalitesinin araştırılması adına, Erzurum Teknik Üniversitesi lojmanları olarak tip proje üzerinden imalatı yapılmış çok katlı 2 adet betonarme yapı materyal olarak seçilmiştir. Yukarıdaki başlıkta tüm detayları ile materyal olarak tanıtilen betonarme çok katlı binalar için hedeflenen araştırmada kullanılacak yöntem ise “Deneysel Modal Analiz Yöntemi” olarak belirlenmiştir.

Modal analiz, inceleme altına alınan bir yapının dinamik davranış parametrelerinin belirlenmesi için kullanılan bir yöntem olarak adlandırılmaktadır. Bir yapının dinamik davranış parametreleri ise; doğal frekansları, mod şekilleri ve sönüm oranları olarak sıralanmaktadır (Celep, 2014).

Deneysel modal analiz, herhangi bir ürünün/yapının dinamik davranışını belirlemek için ek bir yük uygulama etkisinin gerekmediği durumlardaki denklemleri çözdüğü için ve yapı karakteristikleri hakkında hızlı bilgi verdiği için (Anonim, 2019) birçok mühendislik dalında popüler bir şekilde kullanılmaktadır. Şekil 3.10'da makine elemanlarında; dinamik davranış parametrelerinin modal analiz yöntemi ile belirlendiği görülmektedir. Bunun yanında, modal analiz çalışmaları; tren raylarında, uçak gövdelerinde vb. birçok farklı mühendislik disiplinindeki yapılarda dinamik davranış parametrelerini belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. Chauhan, 2008 ise farklı disiplinlere örnek bir çalışmadır.



Şekil 3.10. Farklı Mühendisliklerde Modal Analiz Uygulamaları (Anonim, 2019)

Modal analiz yöntemi teorik ve deneysel olmak üzere iki kısma ayrılmaktadır. Teorik modal analiz kısmı kendi içinde serbestlik derecelerine göre tek serbestlik dereceli ve çok serbestlik dereceli sistemler şeklinde ayrılırken; deneysel modal analiz kısmı ise ortamdaki titreşim kaynaklarına göre deneysel modal analiz ve OMA şeklinde ayrılmaktadır.

Bu durumda modal analiz çalışmalarının anlaşılması adına “Titreşim” ve “Serbestlik Derecesi” kavramlarının tanımlanmasında yarar görülmektedir.

Herhangi bir cismin denge konumu etrafında yaptığı salınım hareketine “titreşim” adı verilmektedir ve yeryüzündeki nesnelerin tamamı sürekli olarak titreşim halinde bulunmaktadır. Bu titreşimler cismin içyapısına göre değişiklikler göstermekte ve cisimlerin büyük çoğunluğunun titreşimleri insan gözü ile algılayamayacak kadar yüksek frekanslarda bulunmaktadır (Celep, 2014). Titreşim özelliklerinin, nesneye özgü yani karakteristik olduğunu ifade etmek mümkündür.

Titreşimler de kendi içlerinde serbest titreşim ve zorlanmış titreşim olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Serbest titreşim başlangıç yer değiştirmesi ile başlayıp yapı sönümüyle sonlanan titreşimlerdir. Zorlanmış titreşimler ise bir kuvvet etkisiyle başlayan ve kuvvetin etki süresi boyunca devam eden titreşimler olarak tanımlanmaktadır (Birinci, 2010).

Bir diğer kavram olan “Serbestlik Derecesi” ise bir cismin uzaydaki ya da düzlemdeki konumunu belirlemek için gerekli bağımsız parametre sayısına denilmektedir (Çayıroğlu, 2012). Bir örnekle anlatılacak olursa zemine ankastre bağlı bir kolonun serbestlik derecesi, kolonun zemine bağlanmamış ucunda bulunan x-y yönlerindeki ötelenmeleri ve z eksenini etrafındaki dönmesi şeklinde tanımlanabilir. Bir ucu ankastre diğer ucu sabit mesnet olan bir kiriş için serbestlik derecesine bakılacak olursa, sadece sabit mesnet ucundaki dönme durumu şeklinde söylenebilir.

Tez kapsamında incelenen ve tip projede üretilmiş yapılar için teorik modal analiz çalışmaları SAP2000 yazılımı kullanılarak yapılmıştır. SAP2000 yazılımında oluşturulan sonlu eleman modeli yapılan çalışmaları detaylandırıp deneysel çalışmalara da ışık tutmuştur (SAP2000, 2020).

3.3.1. Teorik modal analize esas sonlu eleman modelinin hazırlanması

Tez kapsamında incelenen çok katlı betonarme binaların, teorik modal analiz yöntemi ile dinamik davranış parametrelerinin hesaplanması için SAP2000 yapısal analiz programında sonlu eleman modeli oluşturulmuştur (SAP2000, 2020). Sonlu eleman modeli oluşturulurken gerekli teknik detaylara ait bilgiler, yüklenici firma tarafından sağlanan çizimler ve teknik raporlardan temin edilmiştir. İncelenen yapı için SAP2000 yazılımında oluşturulmuş sonlu eleman modeli Şekil 3.11’de gösterilen normal kat kiriş ve kolon aplikasyonu temel alınarak yapılmıştır.

İncelenen çok katlı betonarme yapıların, projelendirme aşamasında tasarım mühendisleri tarafından belirlenen malzeme listesi ve teknik özellikleri Çizelge 3.1’de bulunmaktadır. Başlangıç aşamasında gerçekleştirilen teorik modal analiz için oluşturulan sonlu eleman modelinde de malzeme olarak çizelgedeki teknik bilgiler kullanılmıştır.

Çizelge 3.1. Bina Tasarımında Tercih Edilen Malzemelerin Teknik Bilgileri

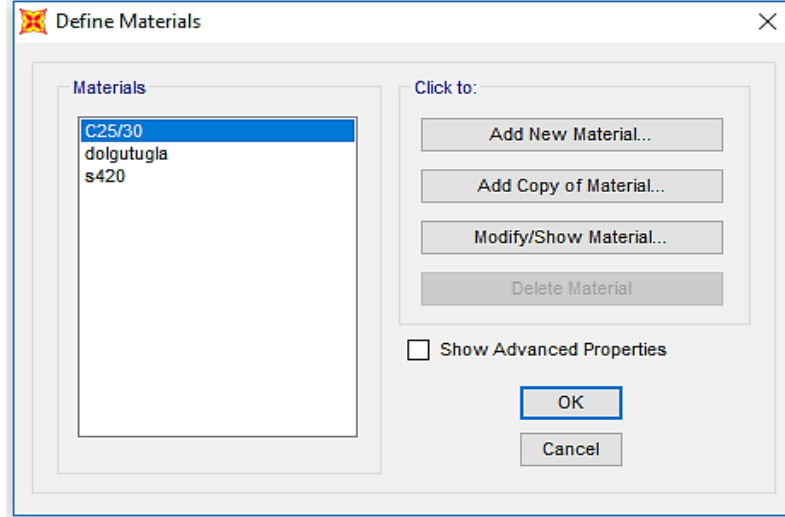
MALZEME	ELASTİSİTE MODÜLÜ (N/mm ²)	POİSSON ORANI	BİRİM AĞIRLIK (kg/m ³)
C25	30.000	0,2	2.400
Çelik	200.000	0,3	7.850
Tuğla	2.000	0,2	1.600

3.3.1.1. Sonlu eleman modeli oluşturma aşamaları

Teorik modal analize esas alınacak sonlu eleman modelinin oluşturulduğu SAP2000 programında, yapı elemanlarını modellemek için birçok modelleme tekniği bulunmaktadır. Tez kapsamında incelenen binalar için oluşturulan sonlu eleman modelinde; kolon ve kirişler modellenirken “Çubuk Eleman Yöntemi” kullanılmıştır. Bu yöntemde modellenen elemanlar, esasen geometrik şekillerinin ağırlık merkezlerinden geçen çubuklarla temsil edilmektedir (SAP2000, 2020).

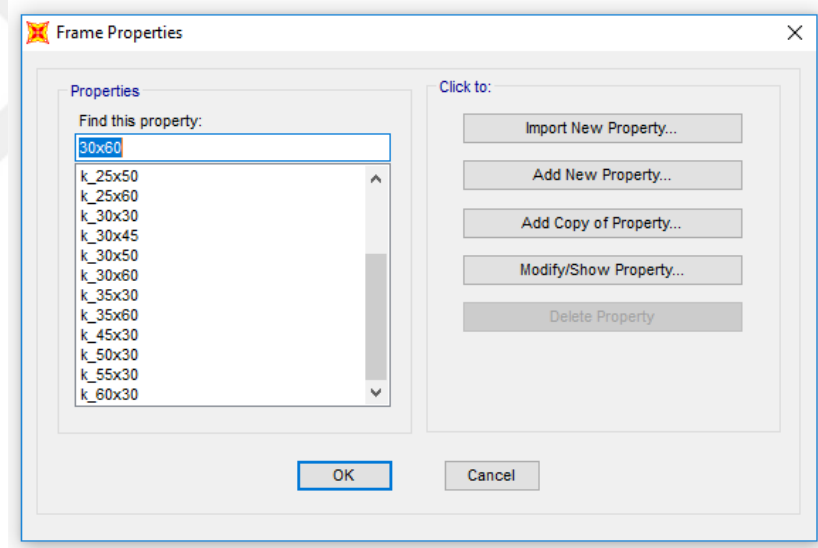
Perde elemanlar, dolgu duvarlar ve radye temel modellenirken “Alan Eleman Yöntemi” kullanılmıştır. Bu yöntemde oluşturulan alan elemanın, geometrik olarak eğiminin değiştiği her koordinat bir düğüm noktası ifade etmekte ve bu düğüm noktalarından yine bir alan elemana veya çubuk elemana bağlantı sağlayabilmektedir. Son olarak modelde döşemeler alan elemanın “none” seçeneği ile ağırlıksız olarak modellenmiş, sonrasında kirişlere yük aktarım mekanizması kurularak üzerlerine yükler girilmiştir. Merdivenler de döşemelerle aynı yöntemle modele tanımlanmıştır (SAP2000, 2020).

Şekil 3.12’de ara yüz görselinde sunulduğu şekilde sonlu eleman modelinde kullanılacak malzemelere ait teknik bilgiler, SAP2000 programına tanıtılmıştır (SAP2000, 2020).



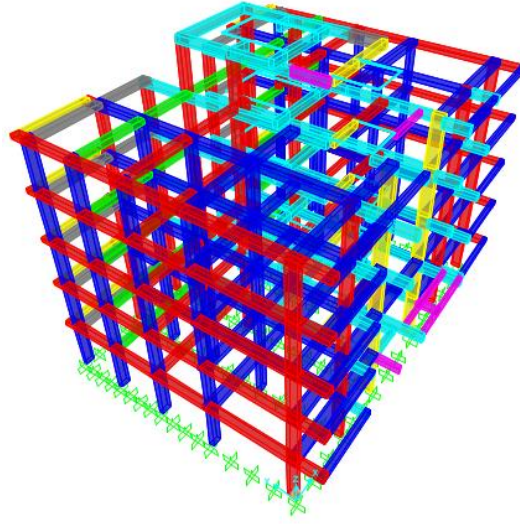
Şekil 3.12. Malzeme Mekanik Özelliklerinin SAP2000 Programına Tanıtılması

Şekil 3.13’de gösterildiği şekilde betonarme binanın mimari projesinden elde edilen bilgiler ışığında taşıyıcı sistem elemanlarının kesitleri oluşturulmuştur.



Şekil 3.13. Tasarımda Belirlenen Kesit Boyutlarının Sisteme Girilmesi

Şekil 3.14’de görüldüğü üzere taşıyıcı sistemde bulunan kolon ve kirişler, “Çubuk Eleman Yöntemi” kullanılarak sonlu eleman modeline tanımlanmıştır.



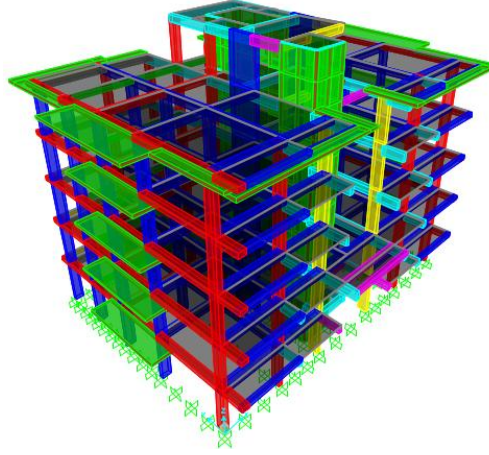
Şekil 3.14. Kolon ve Kirişlerin Sisteme Girilmesi

Şekil 3.15’de görüldüğü üzere taşıyıcı sistemde bulunan perde elemanlar “Alan Eleman Yöntemi” kullanılarak sonlu eleman modeline girilmiştir.



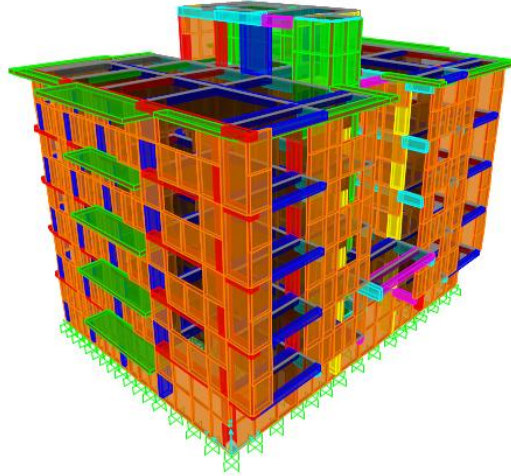
Şekil 3.15. Perdelerin Alan Eleman Yöntemi İle Sisteme Girilmesi

Şekil 3.16’da görüldüğü üzere taşıyıcı sistemde bulunan döşeme elemanları “Alan Eleman Yöntemi” kullanılarak sonlu eleman modeline girilmiştir.



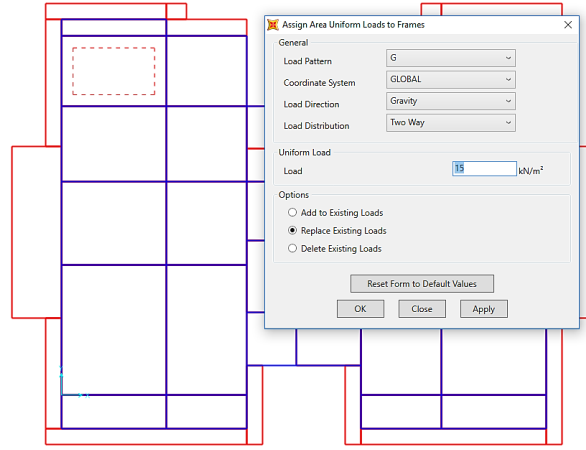
Şekil 3.16. Sisteme Döşemelerin Girilmesi

OMA çalışmaları öncesinde gerçekleştirilen teorik modal analize esas sonlu eleman modelinde, dolgu duvarlar tanımlanmamıştır. Ancak, yapılara uygulanan OMA neticesinde elde edilen modal davranış parametreleri dolgu duvarların yapı rijitliğini önemli ölçüde etkilediğini göstermiş ve sonlu eleman modelinin sahadaki bina davranışını daha gerçekçi bir şekilde yansıtması için dolgu duvarların modele tanımlanması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu nedenle, güncellenen sonlu eleman modeline Şekil 3.17’de görüldüğü üzere sistemde bulunan dolgu duvar elemanları “Alan Eleman Yöntemi” kullanılarak tanımlanmıştır.



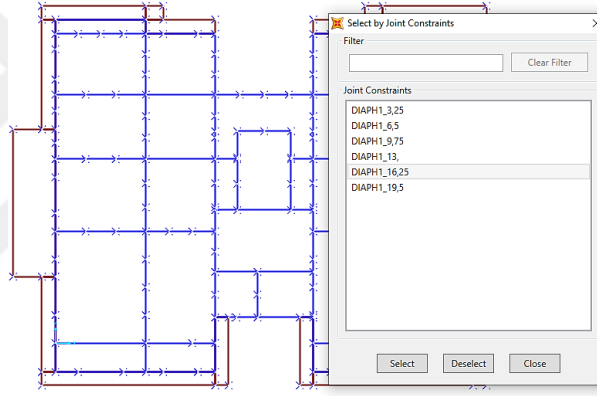
Şekil 3.17. Dolgu Duvar Elemanlarının Sisteme Dâhil Edilmesi

Şekil 3.18’de görüldüğü üzere “none” olarak girilen döşeme elemanlarına, kirişlere yük aktarımı sağlayacak şekilde yük girişleri tamamlanmıştır.



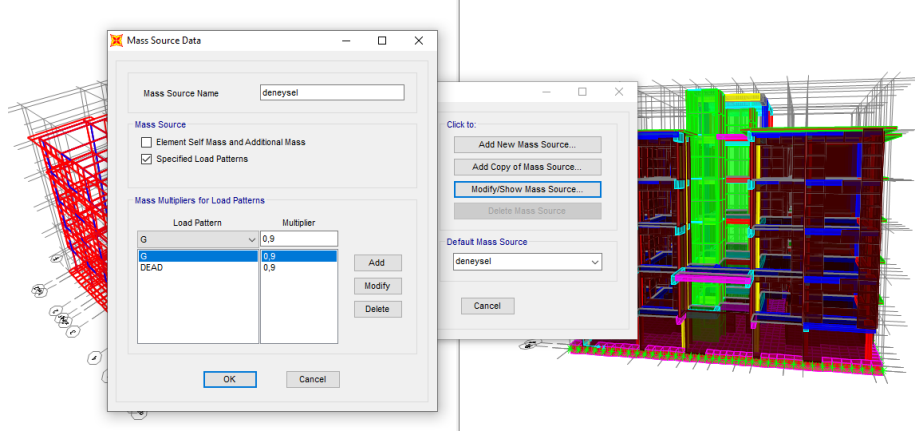
Şekil 3.18. Döşeme yüklerinin kirişlere yük aktarım mekanizması ile girilmesi

Şekil 3.19’da katlara rijit diyafram atılarak her katın hareketinin düzlemsel olması sağlanmıştır.



Şekil 3.19. Katlara Diyafram Atılması

Modal analiz çalışmasının teorik kısmında daha öncede belirtildiği gibi M kütle matrisi, sonuca doğrudan etki etmektedir. Bu sebeple sonlu eleman modelinde, modal analiz için esas alınacak yükler azami derecede önem arz etmektedir. Şekil 3.20’de incelenen binalar için oluşturulmuş sonlu eleman modelinde, modal analize esas alınacak kütle kaynağı tanımlanmıştır. Tez kapsamında yapılan saha çalışmaları esnasında binalar inşaat aşamasında oldukları için teorik modal analize esas alınacak yükler ilgili dönemdeki binanın kendi ağırlığı olarak tanımlanmıştır. Burada, hareketli yüklerle ilgili bir tanımlama yapılmadığının altı çizilmelidir. Zira ilk OMA çalışması esnasında yapı inşa halindedir ve kullanım kaynaklı hareketli yük bulunmamaktadır.



Şekil 3.20. Modal Analize Esas Alınacak Yüklerin Sisteme Tanıtılması

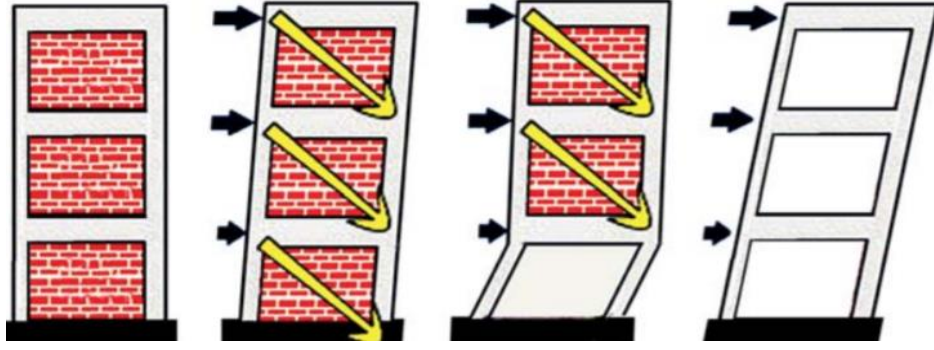
Tez kapsamında yapılan OMA uygulamaları, binalar farklı yapım aşamalarında iken tekrarlanmıştır. Bu durumlar;

1. Binada bodrum+2 katta dolgu duvar imalatı tamamlanmış durum
2. Binada tüm dolgu duvar imalatı bitmiş durum

olarak ifade edilebilir. Teorik modal analiz için yapılan sonlu eleman modellerinin, saha ölçümlerini yansıtmaması adına çeşitlendirilmiştir.

3.3.1.2. Dolgu duvarların yapı davranışına etkisi

Betonarme binaların tasarım aşamalarındaki yapısal analizlerde, dolgu duvarların etkileri özellikleri sadece kütle olarak göz önünde bulunur ve taşıyıcılığı büyük oranda göz ardı edilir. Bunun nedeni olarak; duvar malzemelerinin dayanımlarının çok değişken olması ve duvar dayanımına önemli katkısı olan duvar işçiliğinin çok değişken ve güvenilirmez olması görülmüştür (Bayülke, 2003). Ancak buna rağmen binalardaki dolgu duvarların yatay yük etkilerinde kendi taşıma güçlerine ulaşınca kadar perde duvar gibi davrandıkları görülmüştür. Literatürde dolgu duvarların sistem davranışına etkisini araştıran birçok deneysel çalışma bulunmaktadır (Okuyucu, 2011). Şekil 3.21’de de görüldüğü gibi çalışmaların çoğu, dolgu duvarların binanın deprem performansına olumlu katkısını, değişkenlere bağlı olarak koşullu bir şekilde kabul etmektedir. Literatürde dolgu duvarlar ile betonarme taşıyıcı elemanlar arasındaki boşluk miktarının dahi deprem performansına etkisi araştırılmaktadır (Kaplan, 2008).



Şekil 3.21. Dolgu Durumuna Göre Yatay Yük Deplasmanı (Kaplan,2008)

Bunun yanında Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde, Deprem Etkisi Altında Düzensiz Binalar başlığı adı altında bir bölüm bulunmaktadır (TBDY, 2018). Bu bölüm tasarım aşamasındaki binalarda tüm yapı elemanlarının rijitliğini dikkate almakta ve olası durumlar için binalarda önlemlerini artırmaktadır. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nin düzensizlik sınıflarında “Zayıf Kat” ve “Yumuşak Kat” düzensizlikleri ve bunlara ek olarak kısa kolon etkileri bulunmaktadır. Bahsi geçen düzensizliklerde, büyük oranda dolgu duvar etkileri görülmektedir. Ek olarak Türkiye’de meydana gelmiş yıkıcı depremlerin sonrasında incelenen hasarlı yapılarda, düzensizliklerin hasar oluşumunda büyük ölçüde etkisinin olduğu görülmektedir (Garip vd., 2017). Şekil 3.22, 3.23 ve 3.24’de depremlerde, bahsi geçen düzensizliklere bağlı olarak hasar görmüş yapılar görülmektedir.



Şekil 3.22. Deprem Yönetmeliklerinde Bahsi Geçen B1 Yapı Düzensizliği



Şekil 3.23. Deprem Yönetmeliklerinde Bahsi Geçen B2 Yapı Düzensizliği



Şekil 3.24. Kısa Kolon Etkisi (Anonim, 2019)

Sonuç olarak dolgu duvar imalatı; betonarme çerçeve elemanlarına mesnetlenme durumları, üzerlerindeki sıvalar ve diğer etmenler gibi birçok değişkeni ve insani müdahaleleri barındırmaktadır. Tüm bu etmenler; yapısal hesaplamalarda dolgu duvarlara ait standart bir hesap yönteminin olmasını oldukça zorlaştırmaktadır. Ancak tüm bunlara rağmen; dolgu duvarların yapısal davranış üzerinde göz ardı edilemeyecek düzeyde bir etkisinin olduğu da teknik olarak ifade edilmektedir.

Tez kapsamında, betonarme binalarda yapılan deneysel çalışmaların iki farklı zamanda ve binanın iki farklı yapım aşamasında (dolgu duvar imalat seviyesi bakımından) gerçekleştirilmesi ile tez çalışmasının perspektifi genişletilmiştir. Bu sayede çalışmalara ek olarak dolgu duvar imalatının yapı davranışı üzerindeki etkileri de bütüncül olarak gözlemlenebilmiştir.

3.3.2. Deneysel Modal Analiz

Tez kapsamında, yapılan teorik modal analiz çalışmalarından binaya ait teorik dinamik davranış parametreleri tespit edilmiştir. Sonlu eleman modelinden elde edilen dinamik davranış parametreleri; tez çalışmasını detaylandırmak ve deneysel çalışmalara fikir oluşturması açısından önemlidir. Teorik çalışmanın oluşturduğu öngörü ile deneysel modal analiz aşamasına geçilmiştir.

Deneysel modal analiz çalışmaları binaların mevcut durumlarındaki, gerçekleşmiş, dinamik davranış parametrelerinin bulunması açısından oldukça önem arz eden bir yöntemdir. Literatürde bina önem katsayısı yüksek yapılarda belirli aralıklarla binaya ait dinamik davranış parametrelerinin güncellenmesi dahi önerilebilmektedir (Ventura et al., 2004).

Deneysel modal analiz çalışmaları titreşim esasına dayanan çalışmalardır. Yani deneysel olarak dinamik davranış parametreleri tespit edilirken; yapının kendisini zorlayan etkilere karşı tepki olarak ortaya koyduğu titreşimler kullanılmaktadır. Daha önce bahsedildiği gibi “Deneysel Modal Analiz” yöntemi, temel aldığı titreşim kaynağının oluşumuna göre kendi içinde çeşitlenmektedir. Yapı titreşimleri, kuvvet fonksiyonu belirli bir kaynak tarafından oluşturulup devamında dinamik davranış parametreleri bulunuyorsa bu yöntem Geleneksel (Deneysel) Modal Analiz yöntemi olarak adlandırılmaktadır. Eğer yapı, çevresel dış kaynaklar sebepli oluşan ve fonksiyonu bilinmeyen kuvvetler tarafından titreştirilip dinamik davranış parametreleri bulunuyorsa bu yöntem OMA yöntemi olarak adlandırılmaktadır (Boru ve Kutanis, 2015).

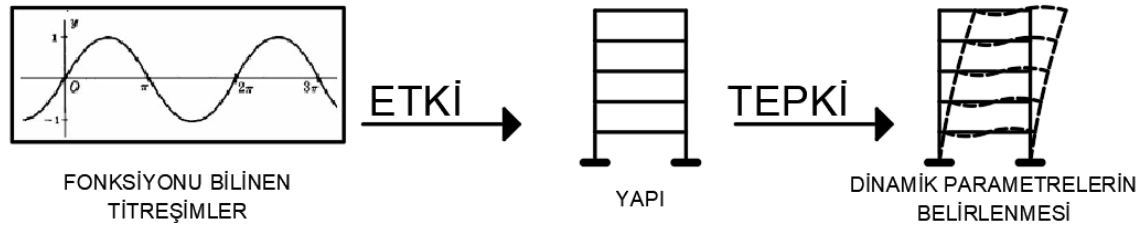
Deneysel modal analizin hangi yöntem ile (geleneksel veya OMA) gerçekleştirileceği, ölçülmesi planlanan yapının hacimsel büyüklüğü, çevresel koşulların durumu gibi birtakım sebeplere bağlı olarak da belirlenmektedir. Küçük veya orta hacimli yapıların dinamik karakteristikleri belirlenirken darbe çekici veya sarsma tablaları kullanılarak, zamana bağlı değişimi bilinen kuvvet ile zorlanmış titreşimler oluşturulabilmektedir. Bu sayede de dinamik davranış parametreleri deneysel olarak hesaplanabilmektedir. Eğer düşünülen yapı hacimsel olarak büyük (köprü, baraj vb.) ise yapıda titreşim oluşturmak ciddi zorlukları ve maliyeti beraberinde getirecek ve belki yapıyı bütün olarak titreştirmek imkânsız olacaktır (Chauhan, 2008). Bu sebeple de OMA yöntemi çok daha kullanışlı olmaktadır.

Titreşim kaynaklarına göre çeşitlenen ve yapısal hacme göre kullanım alanları farklılaşan deneysel modal analizin alt birimleri olan Geleneksel – Deneysel Modal Analiz ve OMA, aşağıdaki bölümlerde literatür desteği ile açıklanmaktadır.

3.3.2.1. Geleneksel – deneysel modal analiz

Yapıda, fonksiyonu bilinen kuvvetlerin oluşturduğu titreşimler ile dinamik davranış parametrelerinin tespit edilmesine Geleneksel – Deneysel Modal Analiz denilmektedir. Yapılara fonksiyonu bilinen kuvvetler genel olarak; sarsma tablaları, darbe çekiçleri vb. aletler vasıtasıyla uygulanmaktadır. Devamında ise yapının oluşan titreşimlere verdiği tepkiler ölçülmektedir (Yetkin, 2016).

Titreşim ölçümleri genel olarak ivmeölçerler yardımıyla yapılmaktadır. Nihayetinde fonksiyonu bilinen bir kuvvet ile uygulama sonrası oluşan bir tepki fonksiyonu, yapıya ait dinamik davranış parametrelerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Daha öncede bahsedildiği gibi geleneksel modal analiz küçük-orta hacimli yapılarda ve laboratuvar ortamlarında daha çok kullanılan bir metottur (Yetkin, 2016). Şekil 3.25’de deneysel (geleneksel) modal analiz çalışmalarında etki-tepki fonksiyonlarının oluşumları gösterilmiştir.

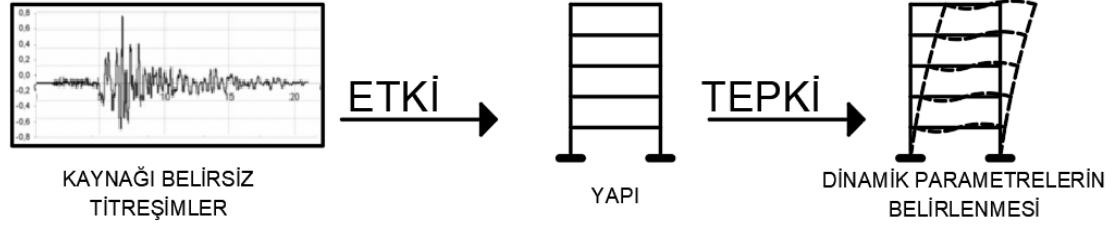


Şekil 3.25. Deneysel Modal Analiz Algoritması

3.3.2.2. Operasyonel modal analiz

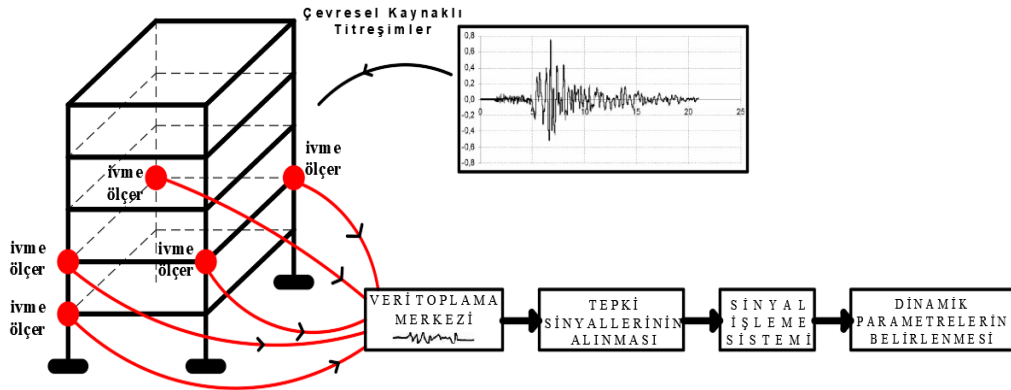
OMA yönteminde dinamik davranış parametrelerinin bulunması için alınan titreşim kayıtlarının kaynakları; genlikleri ve zamanla değişimleri bilinmeyen çevresel titreşim kaynaklarıdır. Dinamik davranış parametreleri, OMA metodunda fonksiyonu bilinmeyen bu kuvvet etkilerinin yapıda oluşturduğu tepki fonksiyonu ile bulunmaktadır. Bahsedilen bu çevresel etkiler; trafik, insan, iş makineleri, depremler vb. şekilde olabilmektedirler (Heerah, 2009).

OMA genel olarak yapay titreşim uygulamalarının imkânsız noktasına geldiği ve aşırı maliyetli olduğu büyük hacimli yapılarda kullanılan bir yöntemdir. Şekil 3.26’da OMA çalışmalarında etki-tepki fonksiyonlarının oluşumları gösterilmiştir.



Şekil 3.26. OMA Algoritması

Tez çalışması kapsamında, uygulaması yapılan OMA yönteminde gerçekleştirilen saha çalışmaları için takip edilen akış şeması Şekil 3.27’de gösterilmiştir. Gösterilen bu akış şemasının sıkıntısız bir şekilde sonuca ulaşması için saha görevlilerinin pratik ve anlaşılır bir şekilde çalışmaları gerekmektedir. İvmeölçerlerin konumları ve yönleri en doğru ve pratik şekilde seçilmelidir. Deney düzeneğine ait şemalarda tüm detaylara ve ortam koşullarına eksiksiz yer verilmelidir. Çalışma geniş sahalara yayıldıkça, saha araştırmacıları arasındaki iletişim olabilecek en üst düzeye çıkarılmalıdır.



Şekil 3.27. OMA İçin Akış Şeması

Çevresel kaynaklar, hava şartları, heterojen yapı malzemeleri, cihaz kalibrasyonları ve cihaz hata payları gibi bilinmezlikler OMA için de bazı kabulleri zorunlu kılmaktadır.

OMA yöntemiyle gerçekleştirilen ölçümlerde yapılan bazı kabuller şunlardır:

- DeneySEL ölçümler sırasında, sıcaklık, nem vb. gibi bir etki altında yapının malzeme özelliklerinde ve sınır şartlarında herhangi bir değişim olmadığı,

- Yapıda oluşan titreşimlerin küçük olduğu ve yapının lineer davranış sergilediği,
- Yapının rijitliğini değiştirebilecek çok büyük titreşimler altında yapılan ölçümlerin doğru sonuçlar vermeyeceği,
- Yapının bir bütün ve sürekli olduğu, şeklindedir (Türker, 2011).

Genel olarak OMA yönteminin kullanım alanları,

- Yapıların projelendirilmesi aşamasında yapılan kabullerin gerçekte sağlanıp sağlanmadığının belirlenmesinde,
- Teorik analizler sonucu elde edilen dinamik karakteristiklerin deneysel olarak elde edilen dinamik karakteristiklerle karşılaştırılmasının yapılması ve sonlu eleman modellerinin iyileştirilmesinde,
- Yapıların hasar durumlarının değerlendirilmesi şeklinde sıralanabilir (Demirtaş, 2014).

3.3.3. Dinamik karakteristiklerin elde edilme yöntemi

OMA çalışmaları için izlenen akış şemasında da görüldüğü gibi fonksiyonu bilinmeyen kuvvetlerin oluşturduğu titreşimler, yapının belirli noktalarında alınan ölçümlerle kayıt altına alınmaktadır. Sonrasında bu bilinmeyen etkilerin yapıda oluşturduğu tepki fonksiyonu, dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde kullanılmaktadır.

Tez kapsamında yapılan OMA çalışmalarında; yapının dinamik davranış parametreleri, sahada ivmeölçerler ile alınan ortam titreşim kayıtlarının bir takım sinyal işleme süreçleri sonucunda yapının tepki fonksiyonu bulunarak tespit edilmektedir. Bahsedilen tüm bu çalışmalar; sinyal işleme, tepki fonksiyonunun bulunması ve dinamik davranış parametrelerin elde edilmesi, Artemis Modal programı ile yapılmıştır. (Artemis Modal Pro, 2020)

Dinamik karakteristikler elde edilirken tepki fonksiyonları için çok çeşitli sinyal işleme yöntemleri kullanılabilir. Genel bir çerçevede bakılacak olursa sinyaller, frekans ve zaman tanım alanlarındaki yöntemlerle işlenmektedirler (Ramos, 2007). Her iki yöntem için geliştirilen derivasyonların matematiksel temelleri benzerlik göstermektedir. Her iki yöntemde de deney yapılan saha, çevre koşulları ve yapı türü belirli avantajları beraberinde getirmektedir. Zaman tanım alanında yapılan çözümlerde çevresel gürültü etkileri daha çabuk algılanıp filtrelenebilmektedir. Bina tarzı modları,

dolayısıyla frekansları birbirine yakın yapılar için frekans tanım alanında çözümleme yapılması daha pratik olabilmektedir (Yetkin, 2016).

Literatürde frekans ve zaman tanım alanlarına dayalı pek çok yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerden bazıları Çizelge 3.2’de gösterilmektedir (Yetkin, 2016).

Çizelge 3.2. Frekans ve Zaman Tanım Alanlarına Dayalı Yöntemler (Yetkin, 2016)

Tanım Alanı	Yöntem
Frekans Tanım Alanı	Piklerin Seçilmesi
	Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma
	Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (GFTAA)
	Polimax
Zaman Tanım Alanı	Rastgele Azaltım
	Tekrarlanan
	Maksimum Olasılık
	Stokastik Altalan Belirleme

3.3.3.1. Geliştirilmiş frekans tanım alanında ayırıştırma (GFTAA) yöntemi

GFTAA Yöntemi, yapı üzerinden alınan titreşim kayıtlarının, sinyal işleme süreçlerinden geçtikten sonra elde edilen spektral yoğunluk fonksiyonlarındaki pik noktalarının tespitiyle sonuçlanmaktadır. Sonuç olarak GFTAA yöntemi ile incelenen yapı için; modların frekans değerleri, mod şekilleri ve modların sönüm oranları elde tespit edilmektedir (Jacobsen et al,2006).

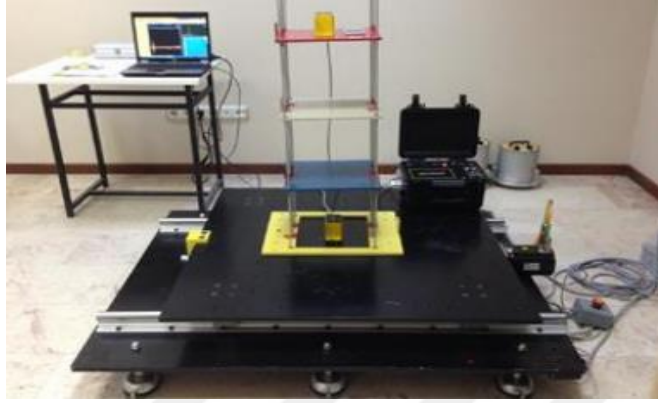
3.3.4. Deneysel modal analiz uygulamasında kullanılan cihazlar

Tez kapsamında yapılan araştırmalarda materyal olarak seçilen çok katlı betonarme yapılar için araştırma yöntemi olarak OMA yöntemi seçilmiştir. OMA yöntemi deneysel bir çalışma olup, yapıya ait dinamik parametrelerin deneysel yöntemlerle tespiti için kullanılması gereken birtakım ölçüm cihazlarına ve yazılımlara ihtiyaç vardır. Tezin bu kısmında ise deneysel çalışmalarda kullanılan ölçüm cihazları hakkında teknik bilgiler sunulmaktadır.

3.3.4.1. Sarsma tablası

Sarsma tablası, incelenen yapı üzerinde belirli bir fonksiyondaki kuvvetin, tepki spektrumunun, geçmiş deprem kayıtlarının ya da sentetik deprem kayıtlarının deney elemanına uygulandığı deney cihazıdır.

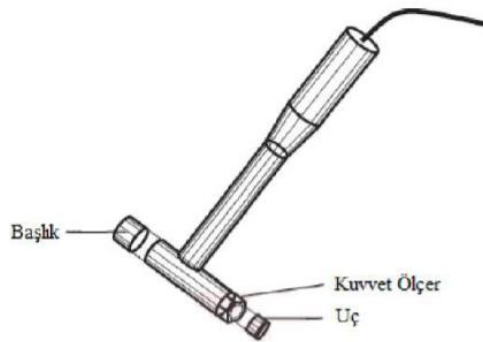
Mekanizmaları hidrolik, elektronik vb. olacak şekilde değişebilmektedir. Boyutları ise üzerinde yapılacak deney hacmine göre değişebilir. Şekil 3.28’de görüldüğü gibi genel olarak laboratuvar ölçeğindeki küçük ve orta hacimdeki deneylere uygun cihazlardır (Altunışık,2010).



Şekil 3.28. Örnek Bir Sarsma Tablası (Şahin vd., 2017)

3.3.4.2. Darbe çekici

Darbe çekiçleri küçük ve orta hacimli laboratuvar çalışmalarındaki yapıları titreştirmek için kullanılan bir cihazdır. Darbe çekiçleri içindeki hassas sensörler sayesinde uygulandıkları deney düzeneklerine fonksiyonları bilinen kuvvetler uygulayabilmektedir. Kullanımı hassasiyet ve kazanılmış el becerisi gerektiren bir cihazdır. Sarsma tablasından daha uygun maliyette elde edilebilen ve Şekil 3.29’da görüldüğü gibi yaygın olarak kullanılan bir ölçüm aletidir (Türker, 2005).



Şekil 3.29. Yaygın olarak kullanılan çekiç türü (Birinci, 2010)

Darbe çekicinde bulunan başlık ve uç kısımları değiştirilerek yapıya farklı frekans seviyelerinde titreşimler uygulanabilir. Darbe çekicinin genel çalışma prensibi Newton’un etki-tepki prensibine dayanır. Yapıya uygulanan kuvvet çekicinin ucundaki kuvvetölçer ile ölçülür. Bu değer etki tepki prensibinden ötürü aynı zamanda yapıya

uygulanan kuvvet olarak kabul edilir. Kuvvet büyüklüğü ise başlıktaki kütle ve vuruş hızına göre artırılıp azaltılabilir (Türker, 2005).

3.3.4.3. İvmeölçerler

Deneyisel modal analiz yöntemlerinin uygulamalarında yapı üzerindeki fonksiyonu belirli veya belirsiz titreşimlerin kayıtlarını, dinamik davranış parametrelerini belirlemek adına, ivmeölçer cihazları yapmaktadırlar. Bu tez kapsamında da yapılan deneyisel çalışmalarda farklı türlerde ivmeölçerler kullanılarak ortam titreşimlerinin kayıtları alınmıştır.

İvmeölçerler, tespit ettikleri ivmeleri (dinamik veya statik), x, y, z eksenlerinde ölçen ve ölçüm verilerini yazılımlar aracılığıyla kaydeden cihazlardır. Dünya ekseninde hareketsiz bir cismin ivmesi, yerçekimi ivmesi olduğundan ölçüm bu değere göre yapılır (Pınar, 2017).

Tez kapsamında yapılan çalışmalarda iki çeşit ivmeölçer sensör kullanılmıştır. OMA çalışmalarında kullanılan bu cihazların uygulama şekilleri ve teknik bilgileri bölümün devamında aktarılmıştır.

E-Quake kuvvetli yer hareketi kayıtcısı

Deneyisel çalışmalar esnasında kullanılan ilk ivmeölçer çeşidi E-Quake Kuvvetli Yer Hareketi Kayıtcısıdır. E-Quake Kuvvetli Yer Hareketi Kayıtcıları deneyisel çalışmalar için oldukça pratik bir kullanıma sahip ivmeölçerdir. Dünyanın aktif fay hattının olduğu birçok lokasyonda anlık yer hareketleri bu cihazlar sayesinde takip edilebilmektedir.

Cihazın ivme ölçümü işini kolayca yapabilmesi için bünyesine Şekil 3.30'da gösterilen modül ekipmanlar entegre edilmektedir. Öncelikle ana kutu içerisinde ivmeölçer mekanizması bulunmaktadır. Buna ek olarak kutu içinde Linux işletim sistemine sahip bir bilgisayar bulunmaktadır. İvme ölçüm verileri fabrikasyon ayarlarda kutu içindeki bilgisayar hafızasına kaydedilmektedir. Ölçüm sonrası Ethernet kablosu ile kutu içindeki bilgisayara IP yoluyla bağlanılıp ölçüm verileri alınabilmektedir. İkinci bir kayıt yeri olarak USB bellekler de kullanılabilir.



Şekil 3.30. E-Quake İvmeölçerler ve Modülleri (Anonim, 2019)

Cihaza imkân dâhilinde ve kullanım amacına göre daimi olarak güç kaynağı girişi sağlanabileceği gibi mobil bataryalar sayesinde geniş sahalarda da elektrik kaygısından uzak bir şekilde ölçümler yapılabilir. Sensörlerin sahadaki enerji ihtiyacını karşılayan mobil bataryaların her biri özel olarak tasarlanmış ve kesintisiz 8 saat enerji temini yapabilmektedir.

Bu ivmeölçer cihazı için en önemli noktalardan biri de GPS modülü ile doğrudan uyduya bağlantı sağlayarak sahadaki kendi modelindeki diğer cihazlar ile kolaylıkla senkronize olabilmesidir.

En nihayetinde bu sistem; kullanıcıları tarafından kablosuz ivmeölçer olarak adlandırılmaktadır. Bu ivmeölçer türü, kablolu ivme ölçüm cihazlarında olduğu gibi ivme değerlerini bir veri toplama sistemi üzerinde anlık olarak gösterebilme özelliğine de sahiptir. Yani, gerekli görülmesi durumunda sensörler kablo bağlantısı ile bir veri toplama sistemine bağlanabilir ve anlık veri kaydı ekranda görüntülenebilir. Ancak kablosuz kullanım durumunda; kablolu ivmeölçer cihazlarının aksine, geniş çalışma sahalarda kablo kalabalığı olmaksızın pek çok noktaya kolayca konumlandırılmaları oldukça önemli bir avantajdır. Ek olarak E-Quake ile kurulmuş ölçüm sistemlerinde, kablolu ölçümlerdeki kablo karmaşası, uzun kablolarda görülebilen bir takım teknik ölçüm sorunları da ortadan kaldırılmış olmaktadır.

E-Quake cihazları ile titreşim ölçüm sistemleri kurulurken dikkat edilmesi gereken noktalar vardır. İlki; deney düzeneğine ait ölçüm şemasında, cihaz yerleşimleri ve cihaz bakış yönleri açıkça belirtilmelidir. Bunun ardından binanın davranışını sağlıklı bir şekilde görüntülemek için cihazlar ölçüm noktalarına çok iyi bir şekilde sabitlenmelidir. Çünkü kablosuz ivmeölçerlerde, yapı titreşimleri anlık olarak

3. MATERYAL ve YÖNTEM

gösterilmediği için sistem kayda başlamadan önce cihaza ve ortama bağlı sorunlar belirlenememektedir. Verinin istenildiği şekilde alınıp alınamadığı, ancak kaydın bitirilmesi ile anlaşılabilir. Bu yüzden E-Quake cihazlarının bulunduğu deney düzeneklerinde cihaz sabitleme işlemi oldukça önemlidir. Kablosuz ivme ölçüm sisteminde kullanıla E-Quake cihazlarına ait teknik bilgiler Çizelge 3.3'te sunulmuştur.

Çizelge 3.3. E-Quake-ACC-23 Cihazına Ait Teknik Detaylar (Anonim, 2019)

Cihaz Özellikleri	Açıklama
ADC Çözünürlüğü	24 BİT
Senkronizasyon	GPS tabanlı - eş zamanlı örnekleme – bağımsız ADC / kanal
Örnekleme Hızı	1 kHz, 500 Hz, 200 Hz, 100 Hz, 50 Hz, 20Hz, 10 Hz, 5Hz, 1Hz (2kHz/4kHz opsiyonel)
Eksen (Bileşen Sayısı)	3
Dinamik Aralık / İç Gürültü	140 dB / 1.2 mikro-Volt RMS
İvme Ölçüm Aralığı	± 2 g
Frekans Bant Genişliği	DC - 120 Hz
İvmeölçer Tipi	Kuvvet dengeleyici - Kuvvet Geri Beslemeli
İvmeölçer Gürültü Seviyesi	130 ng $\sqrt{\text{Hz}}$
Eksen Duyarlılığı	0.002 g/g
Uyarı / Kalibrasyon	Voltaj - sıcaklık - GPS-RAM durumu / bağımsız kalibrasyon / kanal - otomatik - sinüs - kare - kullanıcı tanımlı
Mekanik Şok Dayanımı	2.000 g
Analog Filtre	Anti-aliasing / alçak geçirgen
DSP	Oversampling / downsampling / decimation / sayısal filtreleme
İşletim Sistemi	Dual ARM işlemci - gömülü linux - gerçek zamanlı hesaplama özellikleri
İletişim Arayüzü	Ethernet TCP/IP - ADSL-3G/WiFi bağlantıya hazır - veri kaybını engelleyici iletişim algoritması/RS232 Ops
Veri Depolama	USB - flash bellek (4GB - 8GB - 16GB) / tetiklemeli kayıt / STA/ LTA / diğer
GPS İşlevselliği	Zaman-kordinat bilgisi, GPS sinyali kaybolduğunda kesintisiz iç osilatör sinyali
Uzaktan Bağlantı	TCP/IP - FTP sunucu - seedlink sunucu* - web sunucu
Yıldırım Koruması	Her kanalda bağımsız koruma
Çalışma Voltajı, Besleme	12 VDC / 220V AC - opsiyonel batarya / akü ünitesi
Çalışma Sıcaklık Aralığı	-40 °C ~ +70 °C
Kutulama / Konektör Yapısı	Paslanmaz kutulama / IP67 konektör (opsiyonel askeri sınıf konektör / IP67 koruma)

3 Eksenli Ultra Hassas İvmeölçer

Deneysel çalışmalar esnasında kullanılan ikinci ivmeölçer çeşidi ise 3 Eksenli Ultra Hassas İvmeölçer sensörlerdir. 3 Eksenli Ultra Hassas İvmeölçerler, kablolu ölçüm olarak adlandırılan ölçüm sisteminde kullanılan ve 3 ekseninde de kayıt yapabilen ivme ölçüm cihazlarıdır. Kutu içinde yalnızca voltaj esaslı ivme ölçüm düzeneği bulunmaktadır. Bu cihaz ivme kayıtlarını, veri toplama sistemi üzerinden yazılım

aracılığıyla bilgisayar ortamına yapabilmektedir. Şekil 3.31 ve 3.32’de kablolu ölçüm sisteminde kullanılan 3 eksenli ivmeölçerler ve veri toplama sistemi ile bağlantı sağlayan kablolar görülmektedir.



Şekil 3.31. Ultra Hassas 3 Eksenli İvmeölçer



Şekil 3.32. İvmeölçerlerin Veri Toplama Sistemine Bağlantı Kablosu

Bu cihazların kullanıldığı ölçüm sistemlerinde kablo sağlığına, ivmeölçerdeki ve veri toplama sistemindeki kablo soketlerine ek olarak özen gösterilmelidir. Kablolu deney sistemlerinde çalışma sahasında deney süresince elektrik bulunması gerekmektedir. Kablolu ölçüm sistemlerinde cihazlar veri toplama ünitesinde toplandıkları için ve titreşim kayıtları anlık olarak görüntülenebildikleri için ek bir senkronizasyon modülüne gerek duyulmamaktadır.

Tüm titreşim ölçüm sistemlerinde olduğu gibi deney sistematik bir şekilde ölçüm şeması üzerinde detaylandırılmalıdır. Ölçümün sağlıklı olması için cihazlar binaya çok iyi bir şekilde sabitlenmelidir. Kablolu ölçümlerde kabloların aşırı gerilip soketleri zorlamıyor olmasına da dikkat edilmelidir. Kablolu ivme ölçüm sisteminde kullanılan 3 eksenli ultra hassas ivme ölçüm cihazlarına ait teknik bilgiler Çizelge 3.4’de sunulmuştur.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Çizelge 3.4. SENSEBOX 70x3 Ultra Hassas Sismik İvmeölçer Teknik Bilgiler (Anonim, 2019)

Cihaz Özellikleri	Açıklama
Eksen Sayısı	3
Tipi	Kuvvet/elektro-dinamik geri besleme (FBA-Force Feedback)
Maksimum İvme Ölçüm Aralığı	$\pm 0,8$ g
Çıkış Gürültü Performansı	70 ng/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Frekans Aralığı	0,1-120 Hz
Hassasiyet	6.000 mV/g
Şok Dayanımı	2.000 g
Besleme Voltajı	+6...±15VDC
Çalışma Sıcaklığı	-40°C ~ +65°C
Kutulama	Standart: IP65 / saha tipi metal kutulama

Tek eksenli ultra hassas ivmeölçer

Tek Eksenli Ultra Hassas İvmeölçer, deneysel çalışmalarda kablolu ölçüm olarak adlandırılan ölçüm sisteminde yalnızca tek eksenle kayıt yapabilen ivme ölçüm cihazlarıdır. Yine kutu içinde yalnızca voltaj esaslı ivme ölçüm düzeneği bulunmaktadır. Bu cihaz ivme kayıtlarını, veri toplama sistemi üzerinden yazılım aracılığıyla bilgisayar ortamına yapabilmektedir. Şekil 3.33 ve 3.34’de kablolu ölçüm sisteminde kullanılan tek eksenli ivmeölçerler ve veri toplama sistemi ile bağlantı sağlayan kablolar görülmektedir.



Şekil 3.33. Ultra Hassa Tek Eksenli İvmeölçer (Anonim, 2019)



Şekil 3.34. İvmeölçerlerin Veri Toplama Sistemine Bağlantı Kabloları

Tek eksenli ultra hassas ivmeölçerler de 3 eksenli cihazlar ile aynı hassasiyetleri taşımaktadır. Çalışmalar için hazırlanan deney düzeneklerinin en sağlıklı sonuçlar vermesi için bu hassasiyetler göz ardı edilmemeli ve güncel mühendislik yaklaşımlarına uygun hareket edilmelidir. Kablolu ivme ölçüm sisteminde kullanılan tek eksenli ultra hassas ivme ölçüm cihazlarına ait teknik bilgiler Çizelge 3.5’de sunulmuştur.

Çizelge 3.5. SENSEBOX 7021 Ultra Hassas Sismik İvmeölçer Teknik Bilgiler (Anonim, 2019)

Cihaz Özellikleri	Açıklama
Eksen Sayısı	1
Tipi	Kuvvet/elektro-dinamik geri besleme (FBA-Force Feedback)
Maksimum İvme Ölçüm Aralığı	± 3 g
Çıkış Gürültü Performansı	130 ng/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Frekans Aralığı	0,1-120 Hz
Hassasiyet	2.400 mV/g
Şok Dayanımı	2.000 g
Besleme Voltajı	+6.... ± 15 VDC
Çalışma Sıcaklığı	-40°C ~ +65°C
Kutulama	Standart: IP65 / saha tipi metal kutulama

3.3.4.4. Veri toplama ünitesi

Veri toplama üniteleri; kablolu ölçüm olarak adlandırılan sistemlerde, ivmeölçerlerin iç mekanizmalarının hareketleri ile oluşan voltajların çevrimini yaparak, deney verilerini “g” birimiyle kullanıcıya sunar. Deneysel çalışmalarda veri toplama ünitesi, ivmeölçerleri kablo bağlantıları ile tek bir bünyede toplaması ve verileri anlamlı halde koordine etmesiyle kablolu ölçüm sistemlerinin beyni niteliğinde olan cihazlardır.

Tez kapsamında kullanılan veri toplama ünitesi, ortam titreşimleri ile oluşan veriyi ivmeölçerlerden bilgisayara TestLab Network yazılımı ile aktarmaktadır. Şekil 3.35’te saha çalışması için kurulmuş bir veri toplama sistemi gösterilmiştir (TestLab,2020).



Şekil 3.35. 16 Kanallı Taşınabilir Dinamik Veri Toplama Sistemi (Anonim, 2019)

Esasında ivmeölçerlerden veri toplama ünitesine aktarılan sinyaller hamdır. Yani sinyaller sadece yapı titreşimlerini değil ortamdaki gürültüleri de içermektedir. Bu şekilde elde edilen ham sinyallerin kullanılması durumunda ise yapı davranışının (yapı dinamik karakteristiklerinin) doğru bir şekilde belirlenmesi zorlaşmaktadır. Bu nedenle veri toplama sisteminin en önemli işlevlerinden biri sinyal koşullamadır (Demirtaş, 2014). Sinyal koşullama sayesinde,

- Düşük seviyeli bir sinyalin kalitesi arttırılabilmekte,
- Gürültü sinyallerinin etkisini azaltılabilmekte,
- İstenmeyen sinyaller filtrelenebilmekte,
- İvmeölçerlerdeki elektrik gücünü ayarlanabilmekte,
- İvmeölçerlerin davranışları kontrol edilebilmektedir (Demirtaş, 2014).

Sinyal koşullamanın bu özellikleri sayesinde yapılardan elde edilen ham sinyaller filtrelenmekte ve yapıların dinamik davranışları hakkında daha doğru verilere ulaşılması sağlanmaktadır. Sinyal koşullama işlemlerinden sonra sinyallerin bilgisayar ortamına aktarılmasıyla sinyal işleme aşaması başlamaktadır. Sinyal işleme, bilgisayar ortamında geliştirilen özel yazılımlar kullanılarak gerçekleştirilmektedir (Demirtaş, 2014).

Tez kapsamında yapılan çalışmalarda Şekil 3.36'da görülen TESTBOX2010 Dinamik Veri Toplama / Yapısal Sağlık Takibi Cihazı kullanılmıştır (Anonim, 2019). Bahsi geçen taşınabilir veri toplama ünitesinde 16 adet kanal bulunmaktadır. Cihaz ile bilgisayar arasında bağlantı kurulmasını sağlayan TestLab Network yazılımı aracılığıyla bilgisayardan anlık görüntülenen ölçümler yapılabileceği gibi USB bellek ortamına da kayıt yapılabilmektedir (TestLab, 2020).



Şekil 3.36. TESTBOX2010 Dinamik Veri Toplama / Yapısal Sağlık Takibi Cihazı

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Kablolu ivme ölçüm sisteminde kullanılan TESTBOX2010 Dinamik Veri Toplama / Yapısal Sağlık Takibi Cihazına (Anonim, 2019) ait teknik bilgiler Çizelge 3,6'da sunulmuştur.

Çizelge 3.6. Dinamik Veri Toplama Cihazına Ait Teknik Detaylar (Anonim, 2019)

Cihaz Özellikleri	Açıklama
ADC Çözünürlüğü	24 Bit
Senkronizasyon	Eş zamanlı örnekleme – kanal başına bağımsız ADC
Sensör Giriş Kanal Sayısı	16 kanal (daha fazla kanal sayısı GPS senkronizasyon ile olanaklıdır)
Dinamik Ölçüm Aralığı	138 dB
Örnekleme Hızı (Maks.)	16 Kanal ve üstü 4 kHz'e kadar / kanal (standart-2 kHz)
Kanal Voltaj Giriş Aralığı (Programlanabilir)	$\pm 12V / \pm 8.8V / \pm 4.4V / \pm 2.2V / \pm 1.1V / \pm 550mV / \pm 275mV / \pm 137.5mV / \pm 68.75 mV / \pm 34.4 mV / \pm 17.2 mV$
Giriş Sinyal Tipi	Diferansiyel (en iyi performans) / single ended
Programlanabilir Kazanç Seçenekleri	1/8 – 1/4- 1/2 -1-2-4-8-16-32-64-128
Analog Filtre	Anti-aliasing / alçak geçirgen
DSP	Oversampling / downsampling / decimation / sayısal filtre
Sensör İkaz Seçenekleri	+5V, +12V, -12V (standart)
Bilgisayar Bağlantı Ara Yüzü	Ethernet
Depolama	USB – Flash memory
Sensör Konektör Yapısı	IP67, push-pull, yuvarlak, 9 pin
Sayısal G/Ç	4 Giriş / 4 çıkış
CPU	ARM-cortex / gömülü Linux
Kutu/Çanta	Shock-Proof taşınabilir çanta tipi kutu (NATO cage code A7423)
Boyutlar	16.125" Ux 13.375" Gx 8.0625" Y - 8 ve 16 kanal versiyonlar
Çalışma Sıcaklığı	-20 °C ~ +55 °C
Güç Girişi	12 VDC / maks. 40 watt

3.3.5. OMA için ortam titreşimleri kayıtlarının alınması

Tez kapsamında incelenen binalara ait dinamik davranış parametrelerinin tespitleri için OMA yöntemi kullanılmıştır. OMA, yıllar içinde yapıların kendilerine özgü ve bilinmeyen bol dinamik davranış parametrelerinin tespiti için oldukça yaygın kullanılan bir yöntem haline gelmiştir. OMA yöntemi, dinamik davranış parametrelerinin tespiti ile birlikte araştırmacıya binada yapısal olarak meydana gelmiş hasarlar, rijitlik kayıpları vs. gibi birçok konuda da fikir vermektedir (Boru ve Kutanis, 2015).

OMA yönteminin; yapım kontrolü, hasar tespiti, yapı sağlığı izlemesi gibi geniş alanlarda sunduğu çalışma imkânları ile beraber, yöntemde dikkate alınması gereken bir diğer nokta ise çalışma sahalarının hacmine uygun deney sistemlerinin kurulmasıdır. Genel olarak, OMA gibi deneysel çalışmaların önemli noktalarından biri de deney aletlerinin çalışma sahası için yeterliliğinin yani doğal olarak buna kaynak sağlayacak

finansal yeterliliğin sağlanmasıdır. OMA gibi deneyler çok geniş sahalarda yapılabildiği için finansal yeterlilik birçok perspektifte sınırlayıcı etmen olmaktadır.

Örneğin 10 katlı bir binanın, her bir katının 4 noktasında aynı anda ultra hassas düzeyde ölçüm alacak şekilde bir deney düzeneği kurmak (toplam 40 ivmeölçer sensör) finansal açıdan neredeyse imkânsızdır. Bu sebeple geniş sahalar ve yetersiz ekipman sayıları yapısal modal analiz çalışmalarında çoklu kurulum algoritmasının gelişmesini sağlamıştır. Bu amaçla geniş sahalarda sınırlı ölçüm ekipmanıyla OMA deneyini gerçekleştirebilmek adına geliştirilen bu yöntemle “referans sensör” ya da “optimal sensör” yöntemi adı verilmektedir (Zhu et al., 2018).

10 katlı yapı örneğinde belirtildiği gibi ölçümü minimum cihaz sayısı ile tamamlamak, geliştirilen bu yöntemle mümkün kılınabilmektedir. Bu yöntemde ölçümler çoklu kat kurulumları yapılarak tamamlanmaktadır. Yöntemin gerçekleşmesi için binanın bir noktasına deney tamamlanana kadar sabit kalacak ve her kat kurulumuna dâhil edilecek şekilde bir adet referans cihazı sabitlenmesi gerekmektedir. Tüm bina düşünüldüğünde referans sensör yöntemi, aynı anda alınmayan yani senkronize olmamış farklı kat kurulumlarının olduğu bir deney sistemi gibi gözükmemektedir. Ancak her kat için yapılan kurulumda, o kattaki cihazlar ile referans cihaz, kendi içlerinde zaman senkronizasyonunu sağlamaktadır. Bu yöntem, çok geniş sahalarda mevcut sayıdaki ivmeölçerlerle ekonomik bir şekilde deney yapmayı kolaylaştırdığı gibi yapının gerçek davranışını temsil edecek noktalara gerekli önemi vererek deney yapabilme imkânı da sağlamaktadır. Bu tez çalışması kapsamında da; eldeki ivmeölçer sensör sayısının kısıtlı olması nedeniyle referans sensör yöntemi kullanılarak titreşim ölçümleri yapılmıştır.

Görüldüğü üzere OMA çalışmaları yapılırken çoklu kurulumlarda cihaz senkronizasyonları oldukça önemlidir. Geleneksel OMA yaklaşımları her ölçümdeki farklı kanallardan gelen dijital verilerin senkronize edildiğini, yani aynı zaman ölçeğine göre örneklendiğini varsayar. Bu nedenle senkronizasyon sadece aynı anda başlamış ölçüm cihazları demek değildir. Senkronizasyonu sağlayan bir diğer etmen ise kurulumlardaki cihazların örnekleme hızlarının aynı olması zorunluluğudur (Zhu et al., 2018).

OMA çalışmalarında kayıt sürelerini belirlemek bir diğer önemli teknik husustur. Titreşim kayıt süresi; yapıyı titreştiren sinyalin spektral şekli ve süresi, harmonik

titreşimlerin varlığı, deneye tabi tutulan yapının karmaşıklığı, ölçüm ekipmanlarının kalitesi, vb. pek çok parametreye bağlıdır. Ancak, kabaca bir yaklaşımla dikkate alınan en düşük mod şekline ait periyot değerinin 500 katından daha az süre ile ölçüm alınmaması pratikte önerilmektedir. Buna ek olarak, ölçülen tepkilerde baskın harmonik titreşimlerin bulunması durumunda kayıt süresinin daha da uzun tutulması gerekmektedir (Jacobsen and Andersen, 2008). Bu noktadan hareketle, saha çalışması yapılmadan evvel yapının teorik modal analizinin yapılarak mod şekilleri ve ilgili periyotların hesaplanması sağlıklı bir sensör yerleşim düzeni ve ölçüm süresi belirlenmesi için büyük önem arz etmektedir.

Bu bilgiler ışığında; tez kapsamında incelenen çok katlı betonarme yapılara OMA uygulaması yapılmıştır. Deneysel çalışmalar esnasında titreşim kayıtlarını almak için önceki bölümlerde anlatılan ölçüm cihazları kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda anlaşılır ve pratik şekilde çalışmak oldukça önem arz etmektedir. Bu sebeple deneysel çalışmalarda kullanılan ölçüm cihazlarının kodları bulunmaktadır. Bu sayede ölçümler daha pratik hale gelmektedir. Çizelge 3.7’de deneysel çalışmalarda kullanılan ölçüm aletlerinin kodları bulunmaktadır.

Çizelge 3.7. Ölçümde Kullanılan İvmeölçer Cihazların Kodları

Kablosuz Sensörler		Kablolu Sensörler	
E-Quake	127	SENSEBOX 70x3	1
E-Quake	128	SENSEBOX 70x3	2
E-Quake	129	SENSEBOX 70x3	3
E-Quake	130	SENSEBOX 70x3	4
E-Quake	131		
E-Quake	132		
E-Quake	133		

Takip eden kısımda incelenen iki adet çok katlı betonarme bina için yapılan OMA çalışması hakkında bilgi verilmektedir. Aynı zamanda deneysel çalışmalarla birlikte; kullanılan ekipmanlar, ölçüm algoritmaları, ölçüm şemaları, binanın durumu, iklimsel durumlar vs. gibi konular hakkında da bilgiler sunulmaktadır.

3.3.5.1. 8. blok için yapılan deneysel çalışmalar

8. blok olarak adlandırılan lojman yapısı için ortam titreşimi tabanlı olan OMA çalışmaları; kış ve ilkbahar olmak üzere iki farklı mevsimsel dönemde yapılmış olup deneysel ölçüm aletleri olarak da kablolu ve kablosuz olmak üzere iki farklı türde ivme ölçüm cihazı kullanılmıştır.

8. blok için ilk ölçüm 16 Ocak 2019 tarihinde Erzurum’da kış mevsiminde iken yapılmıştır. Binanın durumu Şekil 3.37 ve Şekil 3.38’de görüldüğü gibi betonarme taşıyıcı sistem ve ilk üç kattaki dolgu duvar imalatları tamamlanmış haldedir. Bunun yanında ölçüm esnasında hava sıcaklığı -15 ila -20° arasında seyretmiştir (Anonim, 2019). Kış sezonunda yapılan bu OMA çalışmaları, binaların farklı yapım aşamalarındaki dinamik davranış parametrelerini tespit etmek amacıyla yapılmıştır.



Şekil 3.37. Kış Mevsiminde 8. Bloktaki Titreşim Ölçüm Dönemine Ait Görsel I



Şekil 3.38. Kış Mevsiminde 8. Bloktaki Titreşim Ölçüm Dönemine Ait Görsel II

8. blok için yapılan ikinci ve üçüncü ölçümler 29-30 Mayıs 2019 tarihlerinde ilkbahar mevsiminde yapılmış olup bu tarihlerde Erzurum’da aktif olarak inşaat sezonu başlamış durumdadır. Binada yapılan çalışmalar kapsamında; dolgu duvar imalatları

tamamlanmış ve bina içinde elektrik, su vb. tesisat işlerine başlanılmıştır. Şekil 3.39 ve Şekil 3.40'da ilkbahar mevsiminde yapılan ikinci ölçümlerde, binaya ait görseller bulunmaktadır. Bunun yanında ölçün esnasında hava sıcaklığı 20° civarlarında seyretmiştir (Anonim, 2019).



Şekil 3.39. 8. Blok İçin Yapılan İkinci Ölçümdeki Bina Durumu I



Şekil 3.40. 8. Blok İçin Yapılan İkinci Ölçümdeki Bina Durumu II

8. blok yapısında kışın yapılan ortam titreşimi kaydı E-Quake adındaki kablosuz ölçüm cihazları ile yapılmıştır. İlkbahar döneminde yapılan ikinci ve üçüncü ortam titreşimi kayıtları ise kablolu ve kablosuz ölçüm cihazları ile olmak üzere iki farklı ölçüm sisteminde yapılmıştır. Şekil 3.41'de kablosuz E-Quake cihazlarının Şekil 3.42'de ise kablolu ultra hassas sismik ölçerlerin, ortam titreşimi kayıtları için binada belirlenen ölçüm noktalarına sabitlenmesi görülmektedir.



Şekil 3.41. E-Quake Cihazlarının Binada Belirlenen Noktalara Sabitlenmesi



Şekil 3.42. İvmeölçerlerin Binada Belirlenen Noktalara Sabitlenmesi

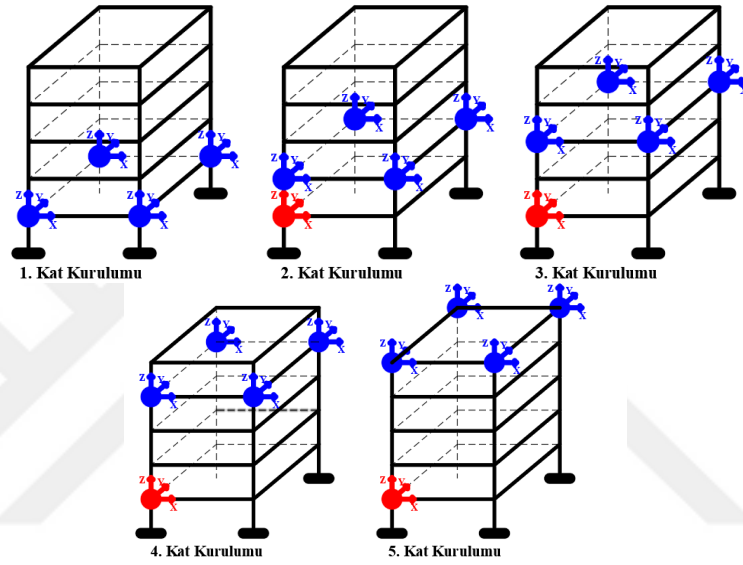
Ortam titreşimi kayıtlarında kullanılan ivmeölçerler, çalışma ekibi tarafından binanın belirlenen noktalarına saten alçı yardımıyla hızlı ve zeminle arasında boşluk oluşturmayacak bir şekilde sabitlenmiştir. Sabitleme işlemi yapılmadan önce cihazların doğru yerlerde ve doğru yönlerde olduğunu kontrol edilmiştir. Sabitleme işlemi, doğru ortam titreşimi kayıtları almanın en önemli ve ilk adımı olduğu için tüm kat kurulumlarında oldukça hassas davranılmıştır.

Tez kapsamında incelenen betonarme binalarda OMA çalışmaları için ortam titreşim kayıtları; çoklu kurulum yöntemi (optimal sensör veya referans sensör metodu) ile alınmıştır.

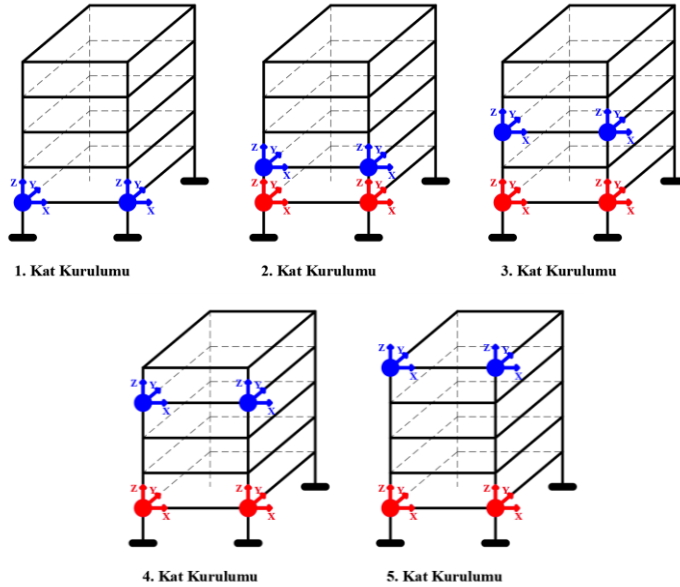
8. blokta yapılan kablosuz ölçümler için binanın dört köşesine yerleştirilen sensörler ile binaya ait ortam titreşim kayıtları alınmıştır. Üst katlarda titreşim kayıtları alındığı esnada giriş katında bir adet sabit E-Quake cihazı bırakılmıştır. Böylece çalışma sonunda, referans cihazlar sayesinde çoklu kat kurulumları kendi içlerinde senkronize olmuştur. Ölçüme ait çoklu cihaz kurulum şeması Şekil 3.43'te gösterilmiştir.

Bununla beraber yine 8. blokta yapılan kablolu ölçüm için binanın sadece ana giriş cephesine yerleştirilen ultra hassas ivmeölçerle tüm binaya ait ortam titreşimi kayıtları yapılmıştır. Üst katlardaki ölçümler için giriş katında iki adet cihaz yine aynı cephede referans olarak bırakılmıştır. Ölçüme ait çoklu cihaz kurulum şeması Şekil 3.44'te gösterilmiştir.

İlgili görsellerdeki kırmızı renkli ivmeölçer gösterimleri referans sensörleri belirtmek için kullanılmıştır.

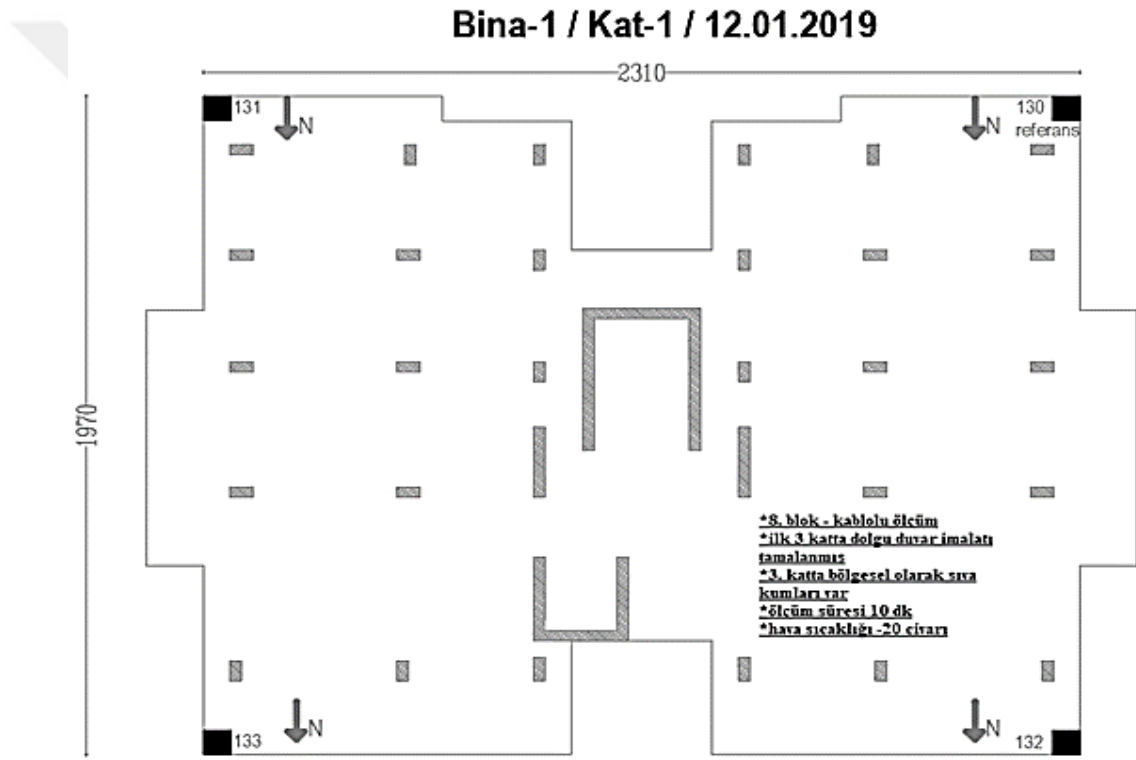


Şekil 3.43. 8. Blok Kablosuz Ölçüme Ait Cihaz Yerleşim Şeması



Şekil 3.44. 8. Blok Kablolu Ölçüme Ait Ölçüm Şeması

Sahada gerçekleştirilen titreşim ölçüm kayıtları süresince, kat krokilerine gerekli tüm notlar alınmıştır. Kat krokileri, ölçümün yapıldığı binanın ilgili katındaki; cihaz kodlarını, cihaz yerleşimlerini, cihazların bakış yönlerini, tarihi, hava durumunu, bina durumunu, ortam durumunu ve daha birçok detayı içinde barındırmaktadır. Bu sayede krokiler, ölçüm sahasından alınan fotoğraflar kadar önemli fiziksel bir doküman haline gelmektedir. Ek olarak krokiler, binadan alınan ortam titreşimi kayıtlarının, spektral yoğunluk fonksiyonları haline gelene kadar yapılan tüm sinyal işleme süreçlerinde, araştırmacıya rehberlik etmektedir. Bu çalışma kapsamında deney yapılacak binaların tüm katları için ayrı ayrı krokiler oluşturulmuş ve çalışma nihayetlene kadar saklanmıştır. Örnek teşkili adına Şekil 3.45'te 8.blok için yapılan 1. kat krokisi gösterilmiştir.



Şekil 3.45. 8.Blok İçin Bina Krokisi Örneği (Ölçüler cm cinsindendir)

Deneyisel çalışmaların saha kısmında ilerleyişleri hakkında daha fazla görsel içerikli bilgiler verilecek olursa; Şekil 3.46 ve Şekil 3.47'de cihazlar, hızlı donan alçı ile zemine doğru bir şekilde sabitlenmiştir. Bu sayede ortam titreşimleri en doğru şekilde kaydedilmiştir.



Şekil 3.46. Cihazların Zemine Sabitlenmesi



Şekil 3.47. Kablolu Ölçüm Sistemine Ait Cihazların Sabitlenmesi

Şekil 3.48’de kablolu ölçüm sistemine ait cihazların ara kabloları hassas ve doğru bir şekilde veri toplama ünitesinde toplanmış ve yazılım aracılığıyla cihazlar sisteme tanıtılmıştır.



Şekil 3.48. İvmeölçerlerin Kablo Bağlantılarının Yapılması ve Sisteme Tanıtılması

Şekil 3.49’da cihazların tabanları hassas bir şekilde temizlenip bir sonraki kat kurulumuna hazır hale getirilmiştir. Ek olarak Şekil 3.50’de kattaki titreşim kaydı işlemi tamamlandıktan sonra kablosuz cihazların içinden ortam titreşimi kayıt dosyaları alınmıştır. Bu süreçler her kat kurulumu için ayrı ayrı tekrarlanmıştır.



Şekil 3.49. Cihazların Temizlenmesi ve Bir Sonraki Ölçüm İçin Hazırlanması



Şekil 3.50. Cihaz İçerisindeki Ölçüm Sonrası Verilerin Toplanması

Şekil 3.51’da kablolu ölçüm için kurulan veri toplama ünitesi görülmektedir. Cihazların bağlantı kabloları ayarlandıktan sonra tüm cihazların sinyalleri veri toplama ünitesinde görünmektedir. Kablolu ölçüm sistemlerinde kabloların hasar görmemelerine, doğru kanallara bağlantı sağlandığına ve soketlerde çekme gerilmeleri oluşturmamalarına çok dikkat edilmelidir. Bazı durumlarda kabloların birbirleriyle çok yakın temasları manyetik etkiler oluşturduğu için ölçümlerin etkilememesi adına kablolar düzenli ve ayrık bir şekilde yerleştirilmelidir.



Şekil 3.51. Kablolü Ölçümde Kurulan Veri Toplama Ünitesi

3.3.5.2. 9. blok için yapılan deneysel çalışmalar

9. blok için gerçekleştirilen OMA çalışmaları; kış ve ilkbahar olmak üzere iki farklı mevsimsel dönemde yapılmış olup yalnızca kablosuz ivme ölçüm cihazları kullanılmıştır.

9. blok için ilk ölçüm 12 Ocak 2019 tarihinde Erzurum’da kış mevsiminde yapılmıştır. Tez kapsamında 9. blok için yapılan ilk OMA çalışmaları yine kış sezonuna rastlamıştır. Binada kış mevsiminde ilk ortam titreşimi kaydı alınırken, binanın durumu Şekil 3.52 ve Şekil 3.53’te görüldüğü gibi betonarme taşıyıcı sistem ve ilk üç kattaki dolgu duvar imalatları tamamlanmış durumdadır. Ek olarak yine Şekil 3.53’te görüldüğü gibi yapının 4. ve 5. katlarında dolgu duvar imalatı için bölgesel olarak tuğla ve kum malzemeleri bulunmaktadır. Bunun yanında ölçün esnasında hava sıcaklığı -15° ila -20° arasında seyretmiştir (Anonim, 2019).



Şekil 3.52. Birinci Ölçüm Tarihinde 9. Blok İmalat Durumu I



Şekil 3.53. Birinci Ölçüm Tarihinde 9. Blok İmalat Durumu II

Yine 9.blok için yapılan ikinci ölçümlerde ilkbahar mevsiminde (1-2 Haziran 2019) yapılmış olup bu tarihlerde Erzurum’da aktif olarak inşaat sezonu başlamış bulunmaktadır. Bu gelişmeler itibariyle binada; dolgu duvar imalatları tamamlanmış, dış cephe mantolama imalatları devam etmekte ve bina içinde sıva, ıslak zemin kaplamaları, kapı pencere kasalarının montajı vb. işlerde başlamıştır. Şekil 3.54’de ilkbahar mevsiminde yapılan ikinci ölçümlerde, binaya ait görsel bulunmaktadır. Bunun yanında ölçüm esnasında hava sıcaklığı 20° düzeyinde seyretmiştir (Anonim, 2019).



Şekil 3.54. 9. Blok İçin Yapılan İkinci Ölçümdeki Bina Durumu

9. blok için kış ve ilkbahar mevsimlerinde ortam titreşimi kayıtları E-Quake adındaki kablosuz ölçüm cihazları ile yapılmıştır.

Yine 9. blokta da yapılan kablosuz ölçümlerde “referans sensör yöntemi” kullanılarak binanın katlarında çoklu kurulumlar yapılmıştır. Sabit kalan referans ivmeölçeri sayesinde çoklu kat kurulumları kendi içlerinde senkronize olmuştur.

OMA işlemleri için yürütülen saha çalışmalarında, öneminden ve gerekliliğinden daha önce de bahsedilen kat krokileri çizilmiş ve üzerine ölçüm esnasında gerekli her detay not alınmıştır.

Çalışmada kullanılan OMA yöntemi ile ulaşılmak istenen sonuç, inceleme altındaki yapıların dinamik davranış parametrelerinin belirlenmesidir. OMA yöntemi için gerekli olan titreşim kayıtlarının; en doğru yerlerden ve en sağlıklı şekilde alınması tüm çalışmanın seyrini etkileyecek düzeyde önemlidir. Örneğin cihaz bakış yönleri dikkate alınmadan tamamlanmış bir ölçümde veya zemine doğru sabitlenmemiş cihazların olduğu bir ölçümde, sinyal işleme süreçlerine geçilememektedir. Bu durum saha çalışmalarının tekrarlanması anlamına gelmektedir. Bu nedenle; OMA yöntemi her aşamasında dikkat gerektiren oldukça hassas bir çalışmadır.

Yapılan saha çalışmaları doğrultusunda incelenen çok katlı betonarme yapılar için sağlıklı ortam titreşimi kayıtları alınmıştır. OMA yönteminde izlenen bir sonraki aşamada Artemis Modal yazılımı aracılığıyla sinyal işleme süreçleri başlamıştır (Artemis Modal Pro, 2020). İlerleyen bölümlerde OMA çalışmalarındaki sinyal işleme sürecinin, Artemis Modal yazılımında nasıl yapıldığı anlatılmıştır.

3.3.6. Deneysel dinamik davranış parametrelerin elde edilmesi

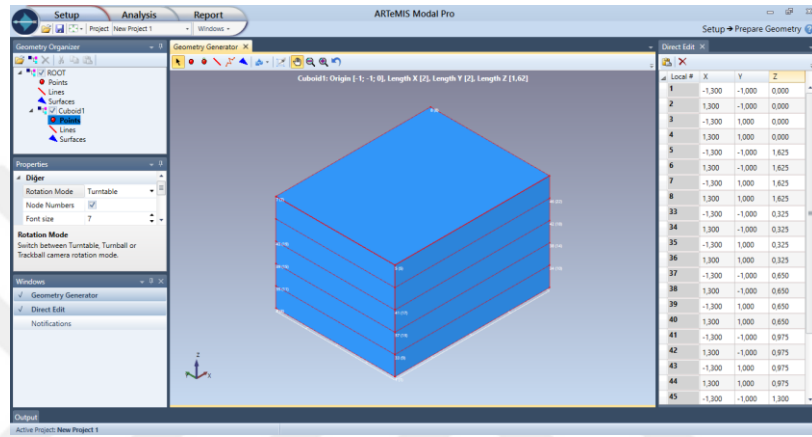
Tez kapsamında incelenen betonarme binalarda yapım kontrolünün araştırılması amacıyla deneysel olarak dinamik davranış parametreleri belirlenmiş ve bunun için ortam titreşim kayıtları alınmıştır. Tezin bu kısmında, dinamik davranış parametrelerinin belirlenmesi adına çevresel etkilerin binada oluşturduğu tepki fonksiyonlarının bulunması anlatılmıştır. Betonarme binalar için sinyal işleme aşamaları Artemis Modal yazılımı aracılığı ile yapılmış olup yazılım ve aşamalardan bu bölümde bahsedilmiştir.

3.3.6.1. İvme kayıtları kullanılarak mod şekilleri ve frekanslarının elde edilmesi

OMA yönteminde saha çalışmalarının sonucu olarak yapının ortam titreşimlerine verdiği tepkiler ivme kayıtları olarak ölçülmüş ve Artemis Modal isimli yazılım kullanılarak sinyal işleme süreci tamamlanmıştır. Artemis Modal programında yapılan çalışma 5 aşamada gerçekleştirilmektedir.

Model geometrisinin oluşturulması

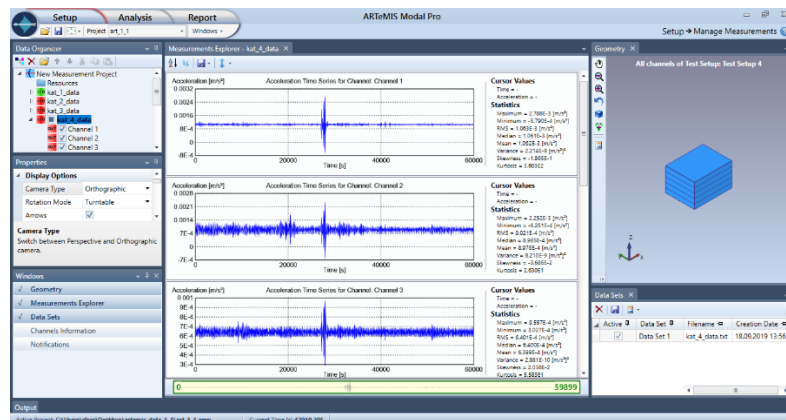
Saha ölçümlerinin veri işleme yazılımında kullanılabilmesi için yazılımda yapının uygun bir temsili gerekmektedir. Bu sebeple bu aşamada yapı boyutları, oransal olarak yazılıma tanıtılıp, yapı geometrisine uygun bir şekilde analize esas model oluşturmaktadır. Ana taşıyıcı olmaması nedeniyle çatı geometrisi modele yansıtılmamaktadır. Model oluşturma çalışmasına ilişkin genel bir görüntü Şekil 3.55'te sunulmaktadır.



Şekil 3.55. Artemis Modal Pro Yazılımında Model Geometrisinin Oluşturulması

Titreşim kayıt dosyalarının yazılıma tanıtılması

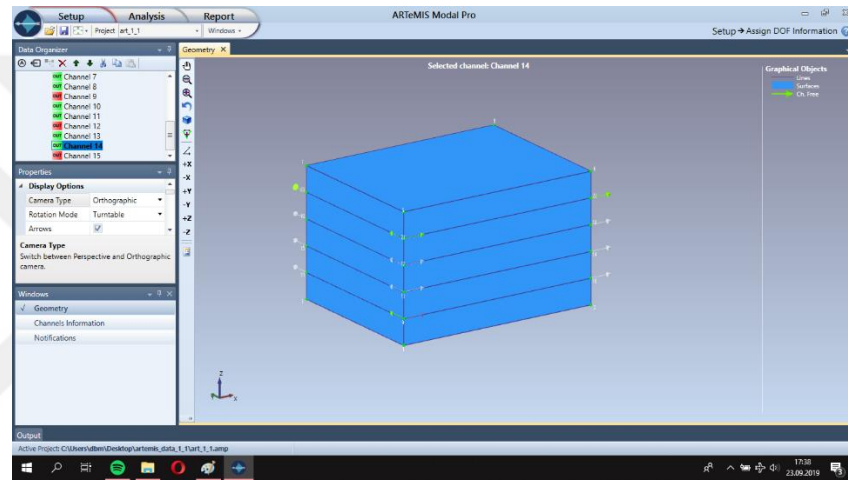
Artemis Modal yazılımındaki bu aşamada ise kaydedilen ivme dosyaları Şekil 3.56'da görüldüğü gibi yazılıma tanıtılır. Örnekleme aralığı, örnekleme değerlerine ait birimler gibi parametrelere ayrıca dikkat edilir.



Şekil 3.56. Artemis Modal Yazılımına Titreşim Kayıt Dosyalarının Tanıtılması

Titreşim kayıt dosyalarının modele uygulanması ve analize hazır hale getirilmesi

Bu aşamada, Artemis Modal yazılımında oluşturulmuş temsili modeldeki birleşim noktalarına, programa tanıtılmış titreşim kayıtları atanmaktadır. Binalar için alınan titreşim kayıtları; bir kat için, her bir “x, y ve z” yönleri ayrı bir kanal ifade edecek şekilde düzenlenip ve hazır hale getirilmektedir. OMA çalışmalarındaki çoklu kat kurulumlarıyla oluşan tüm set veriler sahadaki ölçüm düzeniyle aynı olacak şekilde yazılıma tanıtılmaktadır. Bu işlemler esnasında saha çalışmaları oluşturulmuş ve içinde birçok ayrıntıyı barındıran kat krokilerinden yararlanılmaktadır. Şekil 3.57’de titreşim kayıtlarının belirli bir sistematikte kanallara atanması görülmektedir.



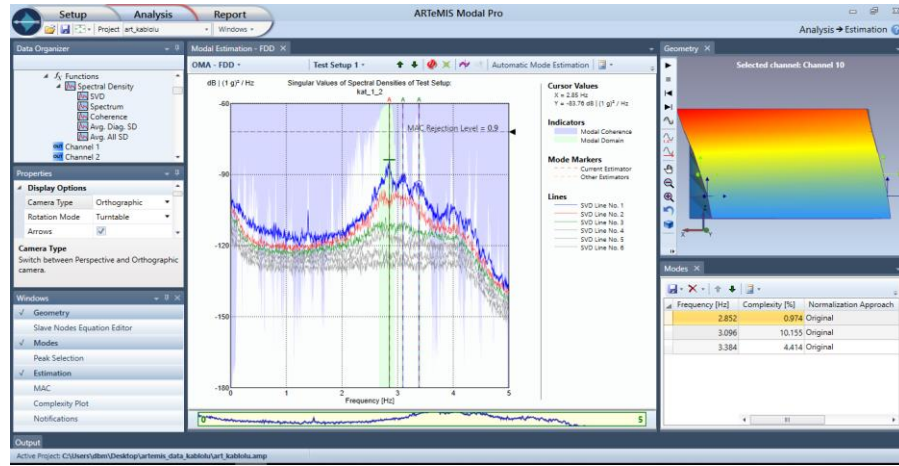
Şekil 3.57. Artemis Modal Pro Yazılımında Modele Titreşim Kayıtlarının Uygulanması

Analiz neticesinde mod şekilleri ve modal frekansların elde edilmesi

Bu aşamada küboid şeklinde temsili olarak oluşturulan modele veri tanıtımı yapılmış ve nihai model üzerinde analiz çalışması yapılarak dinamik davranış parametreleri elde edilmektedir. Yapının teorik frekans değerleri dikkate alınarak, belirli frekans değer aralıklarında spektral yoğunluk fonksiyonları hesaplanmaktadır. Frekans Alanında Çözümleme (FDD), Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (EFDD) Yöntemi ya da bir başka yöntem kullanılarak dinamik davranış parametreleri tespit edilmektedir. Bu çalışmada Frekans Alanında Çözümleme Yöntemi kullanılmıştır. Çevresel titreşim kaynaklarının, mod değerlerinin otomatik olarak bulunmasını sağlayamayacak kadar yetersiz olduğu durumlarda spektral yoğunluk fonksiyonunda otomatik mod bulma işlemleri yapılamadığı da olmaktadır. Bunun yerinde Spektral Yoğunluk Fonksiyonu üzerinde manuel olarak pik noktaları seçme çalışması yapıлып

3. MATERYAL ve YÖNTEM

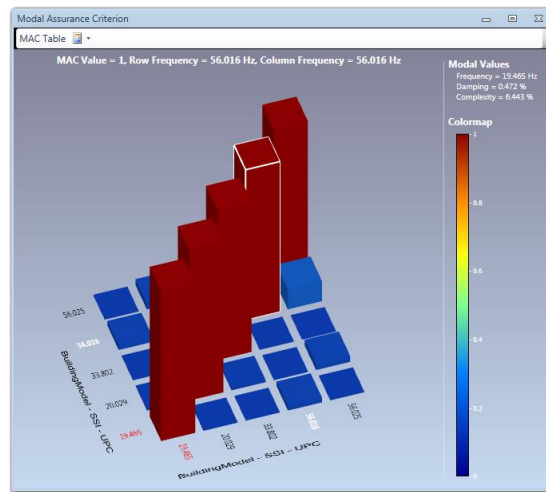
yapıya ait mod şekilleri ve ilgili frekans değerleri Şekil 3.58’de görüldüğü gibi belirlenebilmektedir.



Şekil 3.58. Artemis Modal Pro Yazılımında Analiz Sonucu Dinamik Davranış Parametrelerin Eldesi

Elde edilen mod şekillerinin tutarlılıklarının irdelenmesi

Deneyisel veriler işlendikten sonra analiz sonucunda bulunan dinamik davranış parametrelerinin doğruluğunun genel kabul gören bir yöntemle irdelenmesi gerekmektedir. Modal Güvence Kriteri (Modal Assurance Criterion – MAC), modların ortogonalliğini yani mod şekillerinin birbirinden bağımsız olup olmadıklarının tayini amacıyla kullanılan bir istatistiki göstergedir (Yetkin, 2016). Şekil 3.59’da deneyisel çalışmalarda elde edilen ortam titreşimi kayıtlarına yapılan sinyal işleme ile elde edilen sonuçların; Modal Güvence Kriteri yöntemiyle kontrolü görünmektedir.



Şekil 3.59. Örnek Modal Güvence Kriteri Matrisi

Modal Güvence Kriteri; mod şekillerindeki büyük farklılıklara karşı oldukça hassas, küçük farklılıklara karşı nispeten duyarsız bir istatistiki göstergedir. Bu güçlü istatistiki parametre, mod şekilleri arasındaki tutarlılık derecesine ilişkin önemli bilgi sunar. Altı çizilerek ifade edilmelidir ki; Modal Güvence Kriteri sadece tutarlılık gösterir; mod şeklinin geçerliliği ile ilgili olarak bilgi sunmaz (Pastor et al., 2012).

MAC, sayısal olarak 0 ile 1 arasında değerler almaktadır. 1 değeri tam tutarlı mod şeklini ifade ederken; 0'a yakın değerler modların ayırık olduğunu ifade etmektedir (Anonim, 2019). Bir başka ifadeyle; karşılaştırılan iki farklı mod şekli vektörü birbiriyle uyumlu ise modal güvence matrisinin diyagonal terimlerinin 1, diğer terimlerinin 0 olması gerekmektedir. Diyagonal terimlerden bazılarının 1 değerinden oldukça düşük değerler alması, o terimle kesişen modların birbirinden çok farklı olduğunun göstergesi olup elde edilen mod şekil vektörlerinin yeniden gözden geçirilmesi gerekliliğini göstermektedir (Yeniceli, 2014).

3.3.7. Sonlu eleman model iyileştirme yöntemleri

Binalarda deprem gibi dinamik yüklere karşı tedbirlerin alınabilmesi ancak binaların dinamik davranış parametrelerinin bilinmesi ile olabilmektedir. Ancak bu bilgiler dâhilinde binalarda olumsuz senaryoların tatbikatı yapılabilmektedir. Bu ihtiyaca yönelik olarak, tasarım kriterleri ile bina için yapılan sonlu eleman modelleri, teorik olarak dinamik davranış parametreleri hakkında bilgi vermektedir.

Teorik modal analiz, yapısal analiz programlarında modların birleştirilmesiyle yapılmaktadır. Her bir mod için periyot/frekans değerlerinin hesabında bina rijitlikleri temel bileşenlerdendir. Buna karşın analiz programlarında; inşaat yapım işlerinin insani müdahale kısımları, yapılardaki oturmalar, mesnet çökmeleri, eksantrisite oluşumları, homojen kabul edilen malzemelerin aslında heterojen olması, hatta kıvamlarının hava şartlarına göre dahi değişebileceği gerçekliği ve de olası çatlak oluşumları ile yapının kaybettiği rijitlikler hesaba katılmamaktadır.

Beklenen ve gerçekleşmesi yüksek olan tüm bu ihtimaller yapıların dinamik karakteristikleri ile doğrudan ilgilidir. Bu sebeple binalar için yapılan teorik modal analiz, bazı noktalarda geride kalmaktadır. Deneysel modal analizler ise yapının mevcut durumdaki haliyle yapıldığı için teorik modal analiz sonuçlarını güncellemektedir.

Sonuç olarak genel anlamda ekonomik ömrüne yeni başlamış ve yapısal hasar görmemiş bir yapı üzerinden alınan ölçümlerin referans kabul edildiği teorik modal analiz sonuçları ile deneysel modal analiz sonuçları arasındaki farkın en aza indirilmesi işlemine sonlu eleman modelinin güncellenmesi adı verilmektedir (Yetkin, 2016). Bu çalışma kapsamında incelenen yapılar için teorik ve OMA sonuçları arasında farklar oluşmuş; sonlu eleman modelinin güncellenmesi yoluna gidilmiştir.

Sonlu eleman metodunun güncelleştirilmesi işi iki farklı şekilde yapılmaktadır. İlk yöntem deneme-yanılma yöntemidir. Bu yöntemde yapı sonlu eleman modeli üzerindeki malzeme özellikleri ve malzemelere ait sınır koşulları gibi belirsizlikler üzerinde düzenlemeler yapılarak yapının mevcut halini yansıtan model elde edilmeye çalışılır. İkinci yöntem de optimizasyon yöntemidir. Optimizasyon yöntemi de genel hatları ile deneme-yanılma yöntemine benzerlik göstermektedir. Bu yöntemde yine aynı belirsizlikler için aralıklar seçilir ve bu aralıktaki tüm değerler sonlu eleman modeli üzerinde denenir. Deneysel sonuçlara en çok yaklaşan model ise gerçek yapıyı temsil eden sonlu eleman modeli olarak seçilir (Yetkin, 2016)

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Tez çalışmasının bu bölümünde, binalarda yapım kalitesi kontrollerinin araştırılması için materyal olarak seçilen, çok katlı betonarme binalarda yapılmış deneysel çalışmaların sonuçlarına yer verilmiştir. Tez çalışması kapsamında inceleme altına alınan binalarda dinamik davranış parametrelerinin belirlenmesi adına bir dizi işlemler yapılmıştır. Öncelikle SAP2000 yazılımında sonlu eleman modelleri oluşturulmuş ve yapılardaki teorik modal analiz sonuçları irdelenmiştir. Bu irdelemelerin sonucunda tespit edilen modlar ile binadaki ivmeölçer yerleşim planları ve OMA analizlerinde fikir verecek yaklaşık frekans aralığı belirlenmiştir. Bunun ardından OMA çalışmaları başlamıştır. OMA ile birlikte binalarda yapılan bir diğer deneysel çalışmayla binalardaki beton dayanımları kontrol edilmiştir. Bu çalışmalar sonucunda binada gerçekleşmiş durumu yansıtan 2 adet deneysel argüman elde edilmiştir. Bu duruma ek olarak, statik hesap raporu kapsamında teorik olarak modal ve dinamik analizler ile binanın tasarım çıktıları elde edilmiştir. Statik rapor çıktıları da OMA çalışmalarından sonra sonlu eleman modelleri için bir sonuç değerlendirme argümanı haline gelmiştir. Yapılan çalışmaların sonuçları ışığında yapının gerçekleşmiş durumdaki temsilini sağlayacak sonlu eleman modeli güncelleştirilmiş sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Yapılan tüm çalışmalara ait sonuçlar bu bölümde sunulmuştur.

4.1. Beton Malzeme Dayanım Sonuçları

İncelenen betonarme binalardaki taşıyıcı elemanların malzeme dayanımlarının tespiti için tahribatsız Schmidt Sertlik Çekici ve Ultra Ses metotları kullanılmıştır. Malzeme dayanımlarına ait bilgilerin kapsamını genişletmek adına binalarda yerinde beton dökümleri esnasında denetçi firma tarafından alınan küp beton numunelerinin laboratuvar ortamındaki basınç dayanımları da sonuçlara eklenmiştir. Bu sayede malzeme dayanımı bilgileri için tahribatlı metotlarla da bir kıyas sağlanmıştır.

4.1.1. Schmidt sertlik çekici deney sonuçları

Schmidt Sertlik Çekici deneyleri her iki blok içinde Materyal ve Yöntem bölümünde anlatılan kurallara uygun bir şekilde ve hassasiyetle yapılmıştır. Çalışmaların yapıldığı tarihte 9. blokta yürütülen ince işçilikler, deneysel çalışmalarda kat içi istatistiğe etki etmiştir. Şöyle ki; bina içinde yapımına henüz başlanmış alçı sıva işleri ilk katlarda

taşıyıcı elemanların birçoğunun yüzeyini kapatmıştır. Bu sebeple bazı katlarda vuruş sayılarında eksiklikler görülmektedir.

Her iki bina içinde yapılmış olan Schmidt Sertlik Çekici Deneyi çalışmalarının ardından elde edilen sonuçlar Çizelge 4.1’de gösterilmiştir. Bu uygulama neticesinde, 8. blok yapısı için ortalama beton basınç dayanımı 32 MPa olurken, bu değer 9. blok için 35 MPa olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.1. Binaların Schmidt Sertlik Çekici Deney Sonuçları

8. Blok				9. Blok			
1. Kat	Kat İçi Vuruş	64	Vuruş	1. Kat	Kat İçi Vuruş	16	Vuruş
	Maks. Değer	40	R		Maks. Değer	42	R
	Min. Değer	28	R		Min. Değer	30	R
	Ort. Değer	33	R		Ort. Değer	35	R
	DAYANIM	30	MPa		DAYANIM	34	MPa
2. Kat	Kat İçi Vuruş	64	Vuruş	2. Kat	Kat İçi Vuruş	16	Vuruş
	Maks. Değer	44	R		Maks. Değer	40	R
	Min. Değer	30	R		Min. Değer	32	R
	Ort. Değer	35	R		Ort. Değer	36	R
	DAYANIM	34	MPa		DAYANIM	36	MPa
3. Kat	Kat İçi Vuruş	64	Vuruş	3. Kat	Kat İçi Vuruş	64	Vuruş
	Maks. Değer	44	R		Maks. Değer	41	R
	Min. Değer	28	R		Min. Değer	30	R
	Ort. Değer	35	R		Ort. Değer	36	R
	DAYANIM	34	MPa		DAYANIM	36	MPa
4. Kat	Kat İçi Vuruş	64	Vuruş	4. Kat	Kat İçi Vuruş	64	Vuruş
	Maks. Değer	38	R		Maks. Değer	41	R
	Min. Değer	30	R		Min. Değer	30	R
	Ort. Değer	33	R		Ort. Değer	35	R
	DAYANIM	30	MPa		DAYANIM	34	MPa
Ort. Bina Dayanımı		32	MPa	Ort. Bina Dayanımı		35	MPa

4.1.2. Ultra ses deney sonuçları

Ultra Ses Deneyi yine Materyal ve Yöntem bölümünde anlatılan kurallara uygun bir şekilde ve hassasiyetle yapılmıştır. Ultra Ses Deney çalışması Schmidt Çekici deneyine yakın bir tarihte yapılmıştır. Bu nedenle 9.blok için de bina fiziksel koşullarının bu çalışmaya olumsuz şekilde etki ettiği ifade edilmelidir. Şöyle ki 9. blokta yürütülen alçı sıva işçilikleri, bu binada deney yapılmasına olanak tanımamıştır.

8.blok için yapılmış olan Ultra Ses Deneyi çalışmalarının bilgileri Çizelge 4.2’de gösterilmiştir. Ultra Ses Deneyi ile 8. Blok yapısı ortalama beton dayanımı 31 MPa olarak tayin edilmiştir. Bu değer, Schmidt Sertlik Çekici uygulaması ile belirlenen 32 MPa dayanım ile eşit olarak kabul edilebilir.

Çizelge 4.2. 8. Blok Ultra Ses Deney Sonuçları

1. Kat	Kat İçi Toplam İnceleme	16	Adet
	Maks. Değer	46	MPa
	Min. Değer	21	MPa
	Ort. Değer	32	MPa
2. Kat	Kat İçi Toplam İnceleme	20	Adet
	Maks. Değer	41	MPa
	Min. Değer	26	MPa
	Ort. Değer	32	MPa
3. Kat	Kat İçi Toplam İnceleme	28	Adet
	Maks. Değer	41	MPa
	Min. Değer	25	MPa
	Ort. Değer	32	MPa
4. Kat	Kat İçi Toplam İnceleme	28	Adet
	Maks. Değer	36	MPa
	Min. Değer	24	MPa
	Ort. Değer	29	MPa
Ort. Bina Dayanımı		31	MPa

4.1.3. Beton laboratuvarı kırım sonuçları

Yüklenici firmanın bina yapım yönetmeliklerine göre yaptırmakla yükümlü olduğu deneysel çalışmalardan biri de yerinde beton dökümünden alınan beton numunesine belirli yaşlarda dayanım testlerinin yaptırılmasıdır. Beton malzeme dayanımının tespiti için yapılan diğer deneylerden farklı olarak tahribatlı bir metot olsa da dayanım hakkında diğer deneylere de ışık tutması açısından bu başlıkta sonuçlar sunulmuştur. Yerinde beton dökümünden alınan ve basınç deneylerine tabii tutulan numunelere ait dayanım sonuçları Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'te gösterilmiştir. Sonuçlar, her iki blokta kullanılan betonun ortalama 29 MPa basınç dayanımına sahip olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.3. 8. Blok Beton Numune Kırım Sonuçları

Beton Sınıfı	Numune Lokasyonu			Numune Boyutu (cm)	28 Günlük Basınç Dayanım Sonuçları (MPa)
	Bina	Kat	Eleman		
C25	8. blok	Z	Kolon	150X150X150-KÜP	34,20
C25	8. blok	Z	Tabliye	150X150X150-KÜP	43,80
C25	8. blok	1	Giriş Merdiveni	150X150X150-KÜP	34,00
C25	8. blok	1	Kolon	150X150X150-KÜP	33,70
C25	8. blok	1	Tabliye	150X150X150-KÜP	33,60
C25	8. blok	2	Kolon	150X150X150-KÜP	35,30
C25	8. blok	2	Tabliye	150X150X150-KÜP	33,00
C25	8. blok	3	Kolon-Perde	150X150X150-KÜP	33,10
C25	8. blok	3	Tabliye	150X150X150-KÜP	33,70
C25	8. blok	4	Kolon	150X150X150-KÜP	33,20
C25	8. blok	4	Tabliye	150X150X150-KÜP	34,10
C25	8. blok	5	Asansör Perde-Tabliye	150X150X150-KÜP	33,70
Ortalama Küp Basınç Dayanımı					34,62
Ortalama Silindir Basınç Dayanımı					29,42

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Çizelge 4.4. 9. Blok Beton Numune Kırım Sonuçları

Beton Sınıfı	Numune Lokasyonu			Numune Boyutu (cm)	28 Günlük Basınç Dayanım Sonuçları (MPa)
	Bina	Kat	Eleman		
C25	9. blok	Z	Su Basman Perdesi	150X150X150-KÜP	33,00
C25	9. blok	Z	Kolon-Perde	150X150X150-KÜP	32,50
C25	9. blok	Z	Tabliye	150X150X150-KÜP	32,60
C25	9. blok	1	Giriş Merdiveni	150X150X150-KÜP	34,00
C25	9. blok	1	Kolon	150X150X150-KÜP	38,80
C25	9. blok	1	Tabliye	150X150X150-KÜP	33,30
C25	9. blok	2	Kolon	150X150X150-KÜP	33,90
C25	9. blok	2	Tabliye	150X150X150-KÜP	34,70
C25	9. blok	3	Kolon	150X150X150-KÜP	34,90
C25	9. blok	3	Tabliye	150X150X150-KÜP	33,70
C25	9. blok	4	Kolon	150X150X150-KÜP	33,80
C25	9. blok	5	Asansör Perde-Tabliye	150X150X150-KÜP	33,70
Ortalama Küp Basınç Dayanımı					34,08
Ortalama Silindir Basınç Dayanımı					28,96

4.1.4. Beton malzeme dayanım deneyleri özeti

İncelenen binalarda taşıyıcı elemanlardaki nispeten baskın malzemeyi oluşturan betona ait en nihai dayanım durumu Çizelge 4.5’te özetlenmiştir.

Çizelge 4.5. Malzeme Dayanımının Tespitine Ait Özet Bilgiler

Dayanım Tespit Şekli	Basınç Dayanımı (MPa)	
	8. Blok	9. Blok
Laboratuvar Kırımı	29,5	29,0
Schmidt Sertlik Çekici Deneyi	32,0	35,0
Ultra Ses Deneyi	31,0	Ölçüm Alınamadı

Betonarme binalarda tasarım aşamasında C25 olarak seçilen beton mekanik özelliğinin; inşaat aşamasında yapılan basınç deneylerinde, Schmidt Çekici ve Ultra Ses tahribatsız dayanım deneylerinde yaklaşık olarak C30 olduğu görülmüştür. Benzer bir sonuca (Yetkin vd., 2016) çalışmasında ulaşıldığı görülmektedir. Ülkemizde imal edilen bodrum+5 katlı betonarme bir yapı üzerinde dolgu duvar imalatının hemen sonrasında yapılan çalışmada, tasarım aşamasında C20 olarak kurgulanan beton dayanımının C25 olarak gerçekleştiği ifade edilmiştir.

Betonların dayanımları ile beton yaşları aynı perspektifte incelendiği takdirde, dayanımının %80-%90’ını ilk 28 günde kazanan betonda, dayanım değerlerinin farklı beton yaşlarında çok yakın değerlerde olduğu görülmüştür (Baradan vd., 2012). Bu durum yapım aşaması esnasında taşıyıcı eleman betonlarının döküm kurallarına uygun

bir şekilde dökülüp betonun bakımlarının mümkün olan en doğru şekilde yapıldığı yargısını oluşturmaktadır. Her iki yapının beton dayanımının da birbirine çok yakın çıkmış olması, beton imalat kalitesi bakımından pozitif bir sonuç olarak değerlendirilmektedir.

İlaveten; yapılan araştırmalar sonucunda ultra ses deneylerinden elde edilen beton dayanım değerlerinin tek eksenli basınç dayanım değerlerine daha yakın olduğu görülmüştür. Ek olarak Schmidt çekicinden elde edilen dayanım değerlerinde görülen hata payının ultra ses deneyinde daha fazla olması nedeni ile P dalga hızından elde edilen beton dayanım değerlerinin daha kullanışlı olduğunun ifade edilmesi mümkündür. (Öziçer ve Uyanık, 2017).

4.2. Operasyonel Modal Analiz Sonuçları

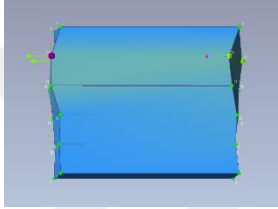
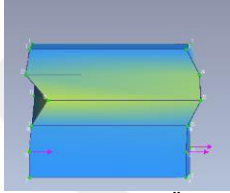
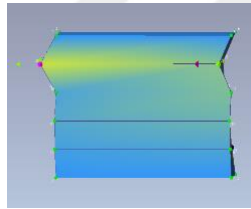
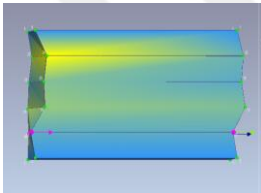
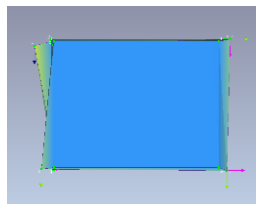
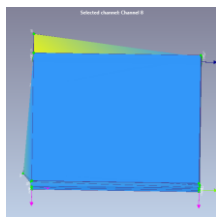
Bölüm 3'te tez kapsamında incelenen betonarme binaların farklı aşamalarında sahadan alınan ortam titreşim kayıtlarının Artemis Modal Pro yazılımındaki sinyal işleme ve modal davranış parametrelerinin elde edilmesi süreçlerinden detaylıca bahsedilmiştir. Bilindiği üzere OMA çalışmaları, binalar farklı aşamalarda iken tekrarlanmıştır. Binalardaki farklılıklar dikkate alındığında her blok için iki kere deneysel olarak dinamik davranış parametresi belirlenmiştir. Sahada yapılan OMA deneysel çalışmalarının sonucu olarak edilen dinamik davranış parametreleri aşağıda sunulmaktadır.

4.2.1. Mod şekilleri ve modal frekanslar

İncelenen iki adet betonarme yapı için farklı yapım aşamalarında gerçekleştirilmiş OMA ölçümlerine ait mod şekilleri ve modal frekansları, Frekans Alanında Çözümleme (Frequency Domain Decomposition – FDD) tekniği kullanılarak belirlenmiştir. Sonuçlar Çizelge 4.6, Çizelge 4.7, Çizelge 4.8'de sunulduğu gibidir.

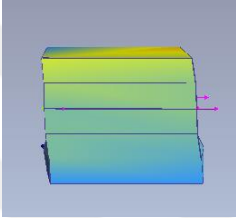
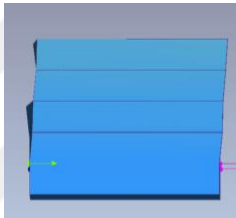
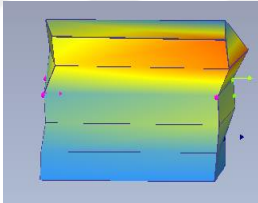
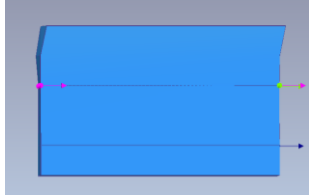
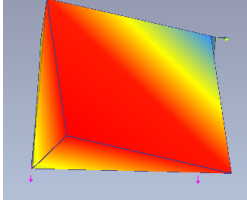
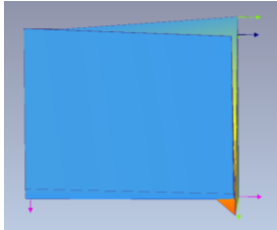
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Çizelge 4.6. Binalar Yarı Tuğla Duvar Örülü Halde İken Alınan OMA Sonuçları

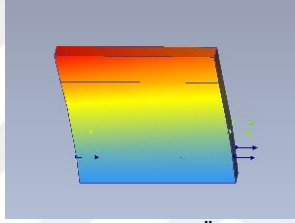
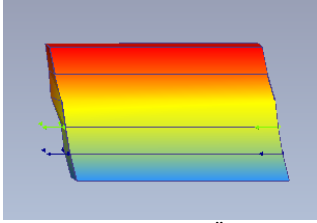
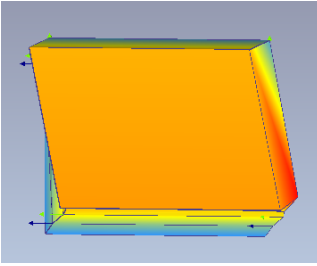
9. BLOK			8. BLOK		
					
Mod	Mod Şekli	Frekans (Hz)	Mod	Mod Şekli	Frekans (Hz)
1	 X Yönünde Yatay Öteleme	3,145	1	 X Yönünde Yatay Öteleme	3,174
2	 Y Yönünde Yatay Öteleme	3,535	2	 Y Yönünde Yatay Öteleme	3,540
3	 Düşey Z Eksen Etrafında Yatay Burulma	4,019	3	 Düşey Z Eksen Etrafında Yatay Burulma	3,936

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Çizelge 4.7. Binalar Tuğla Duvar Örülü Halde İken Alınan OMA Sonuçları

9. BLOK			8. BLOK		
					
Mod	Mod Şekli	Frekans (Hz)	Mod	Mod Şekli	Frekans (Hz)
1	 X Yönünde Yatay Öteleme	3,340	1	 X Yönünde Yatay Öteleme	3,340
2	 Y Yönünde Yatay Öteleme	3,496	2	 Y Yönünde Yatay Öteleme	3,682
3	 Düşey Z Eksen Etrafında Yatay Burulma	5,400	3	 Düşey Z Eksen Etrafında Yatay Burulma	5,566

Çizelge 4.8. Bina Tuğla Duvar Örülü Halde İken 8. Blokta Alınan Kablolü OMA Sonuçları

		
Mod	Mod Şekli	Frekans (Hz)
1	 X Yönünde Yatay Öteleme	2,852
2	 Y Yönünde Yatay Öteleme	3,037
3	 Düşey Z Eksen Etrafında Yatay Burulma	3,848

Yukarıda belirtildiği gibi OMA uygulaması ile deneysel dinamik kimliklendirme çalışmaları binalar dolgu duvar imalatı bakımından farklı 2 aşamada iken yapılmıştır. Çizelge 4.9’da görüldüğü gibi yarı dolgu duvarlı durumdaki binalarda yapılan OMA çalışmalarında periyot, dolgu duvar işlemi bitmiş binalara göre daha yüksek çıkmıştır. Bu

durumda dolgu duvar imalatı tamamlanmış sistemin toplam rijitlik durumu ile binaların periyot değerleri beklendiği gibi azalmıştır. Bu durum ek olarak yapım aşamalarında meydana gelebilecek bir depremde binalara etkiyecek deprem yüklerinin daha az olacağını da göstermiştir.

Ek olarak tam tuğla duvarlı durumda ölçüm alınırken 8 ve 9. bloktaki frekans farkları en fazla %5 olacak şekilde minimal düzeydedir. Binalarda ölçüm, 9.bloktaki sıva işlemleri ve dış cephe giydirmiş işlemleri tamamlanmış haldeyken yapılmıştır. OMA sonuçları 9. blok yapısının %5 daha büyük periyota sahip olduğunu göstermiştir. Sonuç olarak görülen %5’lik farklılığın sebebinin sıva olmadığı düşünülmektedir. Sıva genel olarak birim elemanların toplu bir davranış sergilemesine yardımcı olmaktadır. Ancak incelenen yapılarda sıva aşamasından önce dolgu duvarlar betonarme çerçevelerle boşluk oluşturmayacak şekilde imal edilmiş ve bir sıkıştırma etkisi meydana getirilmiştir.

Çizelge 4.9. Binaların Yapım Aşamalarına Göre OMA Sonuçları

	8. Blok		9. Blok	
	Mod	Frekans	Mod	Frekans
Yarı Tuğla Duvarlı Durum	1	3,174	1	3,145
	2	3,540	2	3,535
	3	3,936	3	4,019
Tam Tuğla Duvarlı Durum	1	3,340	1	3,340
	2	3,682	2	3,496
	3	5,566	3	5,400

Burada OMA için yapı titreşim ölçümlerinin alınma yöntemi üzerine bir irdeleme yapmakta yarar görülmektedir. Tüm katlarda eş zamanlı olarak titreşim ölçümü ve kaydı yapılmasına imkân sağlayacak, yeter sayıda ivmeölçer sensör olmaması nedeniyle birinci katta bir sensör referans olarak bırakılmak kaydıyla; her kat için ayrı ayrı ölçüm alınmıştır. Yüzer sensör-referans sensör yöntemi olarak da adlandırılan bu uygulama dâhilinde kaydı yapılan titreşim verisi işlenerek modal davranış parametreleri elde edilmiştir. Tüm katlarda senkron ölçüm alınmadan, asenkron veri kaydıyla çalışma yapılmış olması tartışma doğurabilecek bir husustur. Bu noktada, (Zhu, et al, 2018) çalışması tez kapsamında yapılan uygulamayı teknik olarak destekler nitelikte bir çalışma olarak değerlendirilmektedir. Bu araştırmada, 8 katlı betonarme bir yapıda senkron ve asenkron olarak titreşim kayıtları alınarak yapılan OMA sonuçları karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda, asenkron veri kaydı ile yapılan OMA yöntemindeki istatistiki belirsizliklerin senkron ölçüme göre daha fazla olmakla birlikte; asenkron ölçümlerde

ölçüm süresinin uzun tutulması ise bu olumsuzluğun giderilebileceği ve asenkron ölçümle tayin edilen modal davranış parametrelerinin güvenilir olacağı sonucu paylaşılmıştır. Tez kapsamında, her bir katta ayrı ayrı titreşim kaydı yapılmıştır. Uygulamada senkron ölçümler için teorik birinci periyot değerinin yaklaşık 500 katı süre ile ölçüm alınması önerilmektedir. Buna ek olarak, ölçülen tepkilerde baskın harmonik titreşimlerin bulunması durumunda kayıt süresinin daha da uzun tutulması gerektiği (Jacobsen and Andersen, 2008) tarafından da ifade edilmektedir. Bu sebeple incelenen yapılarda her bir katta en az 30 dakikalık, sürekli titreşim ölçümleri alınmıştır ki; bu incelenen yapılarda senkron ölçüm süre önerilen yaklaşık ($0.43 \times 500 = 215$ sn) 4 dakikalık süreden oldukça fazladır. Bu bakımdan, asenkron titreşim ölçümleri üzerinden yapılan OMA sonuçlarının güvenli olduğu kabul edilerek, bu veri üzerinden değerlendirme yapılması uygun bulunmuştur.

Bu noktada üzerinde durulması gereken bir başka husus ise deneysel modal analiz çalışmasının çevresel titreşimler etkisi altında gerçekleştirilmiş olmasıdır. Kaynağı bilinmeyen titreşim etkilerine karşı yapı tepkileri ölçülmüş ve veri işleme çalışması yapılarak dinamik davranış parametreleri elde edilmiştir. Kaynağı bilinen, yani zorlanmış titreşim olarak da adlandırılan etkiler altında yapı davranışının incelenmemiş olması; elde edilen dinamik davranış parametrelerini tartışmalı bir duruma getirebilir. Bu durumda, (Beskhyroun, et al., 2019) çalışması tez kapsamında tercih edilen ortam titreşimi kaynaklı etkiler üzerinden yapılan çalışmayı destekler niteliktedir. (Beskhyroun, et al., 2019) çalışmasında 13 katlı betonarme bir yapı üzerinde hem zorlanmış titreşimler hem de ortam titreşimleri etkisi altında deneysel modal analiz çalışmaları yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çalışma neticesinde, incelenen yapının ilk dört mod şekli için ortam titreşimi ve deprem kaynaklı titreşimler etkisinde belirlenen modal davranış parametreleri ile düşük genlikli zorlanmış titreşimler etkisi altında ölçülen modal davranış parametrelerin birbirine çok yakın sonuçlar verdiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu referansla, tercih edilen ortam titreşimi ölçümleri ile yapılan OMA yönteminin güvenilir olduğu sonucuna varılmıştır. Bununla birlikte, tez çalışması kapsamında zorlanmış titreşim (forced vibration) üretme amacıyla kullanılabilecek bir sarsma cihazının olmadığı da ifade edilmelidir. Yani, çevresel titreşimlere yapının verdiği tepkilerin ölçülmesi üzerine deneysel modal analiz çalışması yapılmış olması esasen bir tercih değil; zorunluluk olmuştur.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bir diğer yandan, daha önce de bahsedildiği gibi 8.blokta kablolu ölçüm düzeneği ile de çalışmalar yapılmıştır. Ancak çalışmalar esnasında her katta binanın 4 köşesinde ölçüm alacak şekilde altyapı kurulmuş olmasına rağmen sağlıklı bir veri kaydı alınamamıştır. Çizelge 4.10'da sunulan frekans değerlerinin gerek kablolu sensörlerle yapılan OMA ve gerekse teorik modal analiz sonuçlarından oldukça farklı olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.10. 8. Blok İçin Alınan Kablolu ve Kablosuz Ölçümlere Ait Modal Analiz Sonuçları

Kablolu Ölçüm Düzeneği			Kablosuz Ölçüm Düzeneği	
Mod	Frekans (Hz)	Mod Şekli	Frekans (Hz)	Mod Şekli
1	2,852	X Yönü Yatay Öteleme	3,340	X Yönü Yatay Öteleme
2	3,096	Y Yönü Yatay Öteleme	3,682	Y Yönü Yatay Öteleme
3	3,501	Düşey Z Eksen Etrafında Yatay Burulma	5,566	Düşey Z Eksen Etrafında Yatay Burulma

Bunun sebebinin ise Şekil 4.1'de görüldüğü gibi ortamdaki kablo kaynaklı teknik sorun olduğu tespit edilmiştir. Bu sorunun titreşim kayıtları üzerindeki etkileri ise Şekil 4.2'de gösterilmiştir.

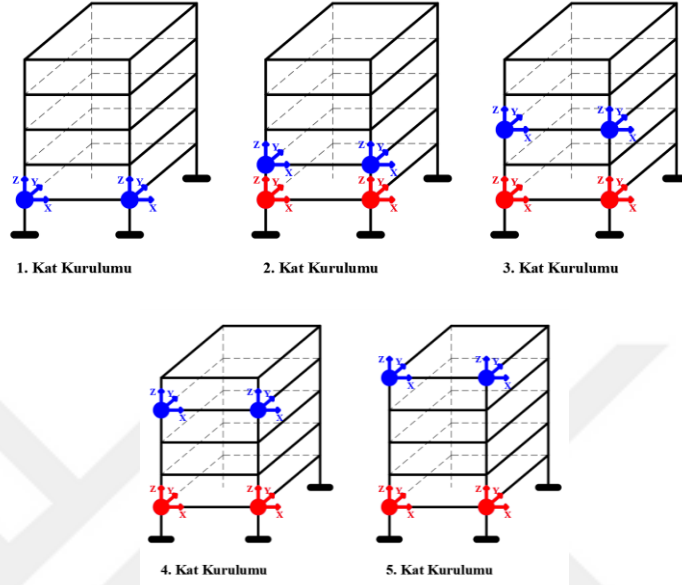


Şekil 4.1. Kablolu Ölçüm Sistem Kurulumu



Şekil 4.2. Kablolu Ölçümlerde Titreşim Kayıtlarında Oluşan Sıkıntılar

Sahada oluşan bu sorunu aşabilmek adına katlardaki ölçüm alınan nokta sayısı dörtten ikiye düşürülmüştür. Bu ölçüm düzeneğinde Şekil 4.3’de görüldüğü gibi binanın sadece giriş cephesine ivmeölçer yerleştirilmiştir. Eldeki mevcut kablolarla, bu sayede sağlıklı veri alınabilmektedir.

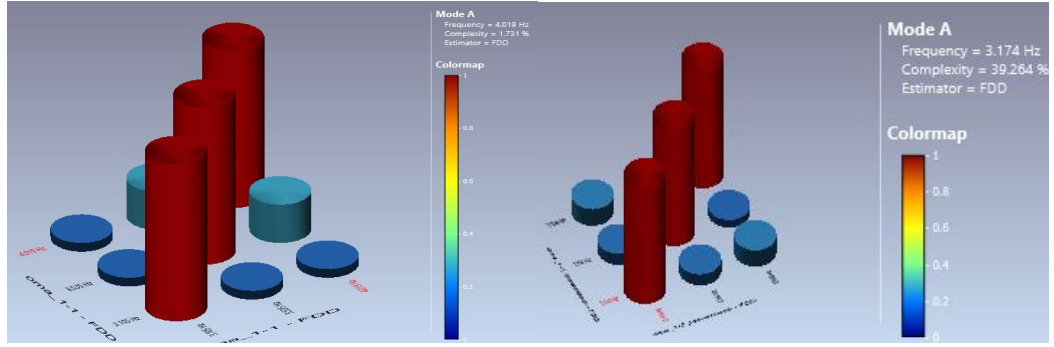


Şekil 4.3. Kablolu Ölçüme Ait Ölçüm Şeması

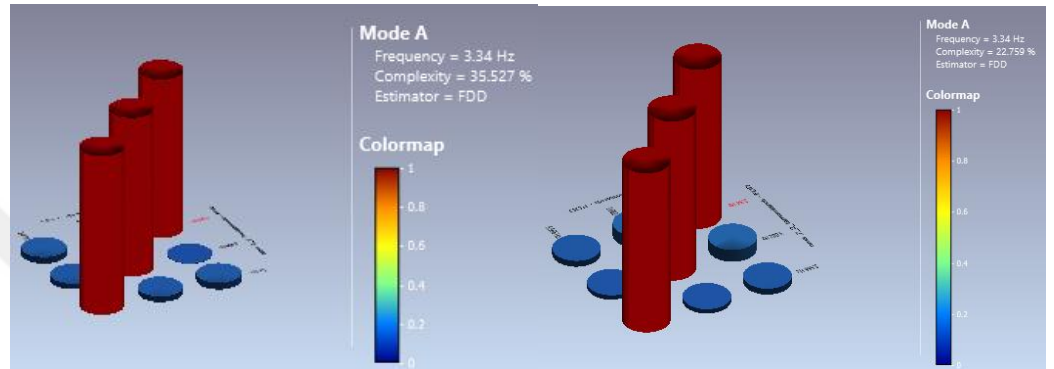
Görüldüğü gibi belirtilen kablolu ölçüm şemasına göre alınan ölçümlerde elde edilen modal analiz sonuçları kablosuz ölçüme ait modal analiz sonuçlarından farklılıklar göstermiştir. Buna sebep olarak ise binanın sadece bir cephesinden alınmış ölçümler, yapının tamamını temsil edememiş ve yapı için modal katılım kütlelerinin eksik kalmış olduğu düşünülmüştür. Bu nedenle, bu hatalı ölçümden elde edilen sonuçlar değerlendirmeye alınmamakla birlikte; kablolu sensörlerle OMA çalışması yapılması durumunda kablo kalitesi ve kablo sağlığı konusunda hassas çalışmalar yapılması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

4.2.2.Mod şekillerine ilişkin tutarlılık kontrolleri

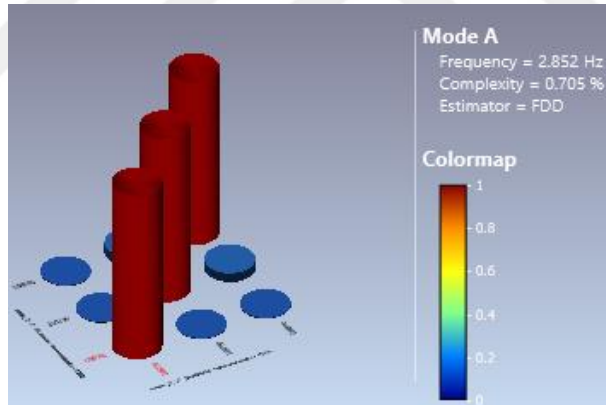
İncelenen betonarme binalar için farklı yapım aşamalarında alınmış saha ölçümlerinin işlenip dinamik davranış parametrelerinin bulunmasının ardından Artemis Modal yazılımı üzerinde elde edilen mod şekillerinin tutarlılıklarının kontrolü amacıyla Modal Güvence Kriterleri (MGK) hesaplanmıştır. Binalar için yapılan deneysel çalışmalar sonucu elde edilen modlar için MGK grafikleri Şekil 4.4, Şekil 4.5, Şekil 4.6’da gösterilmiştir (Artemis Modal Pro, 2020).



Şekil 4.4. Yarı Tuğla Duvar Örülü Binalar İçin MGK Kontrolü (9. ve 8. blok)



Şekil 4.5. Tuğla Duvar Örülü Binalar İçin MGK Kontrolü (9. ve 8. blok)



Şekil 4.6. 8. Blok İçin Yapılan Kablolü Ölçüme Ait MGK Kontrolü

Ek olarak modal güvenlik kriteri kontrollerinin çizelge dökümleri Çizelge 4.11, Çizelge 4.12, Çizelge 4.13, Çizelge 4.14 ve Çizelge 4.15'te gösterildiği gibidir (Artemis Modal Pro, 2020).

Çizelge 4.11. Yarı Tuğla Duvarlı Ölçümde 8. Blok İçin MGK Kontrolünün Çizelge Dökümü

	3,105	3,535	4,019
3,105	1,00000	0,05555	0,05537
3,535	0,05555	1,00000	0,24390
4,019	0,05537	0,24390	1,00000

Çizelge 4.12. Yarı Tuğla Duvarlı Ölçümde 9. Blok İçin MGK Kontrolünün Çizelge Dökümü

	3,174	3,540	3,936
3,174	1,00000	0,09470	0,14250
3,540	0,09470	1,00000	0,06585
3,936	0,14250	0,06585	1,00000

Çizelge 4.13. Tuğla Duvarlı Ölçümde 8. Blok İçin MGK Kontrolünün Çizelge Dökümü

	3,340	3,496	5,400
3,340	1,00000	0,00261	0,04114
3,496	0,00261	1,00000	0,03528
5,400	0,04114	0,03528	1,00000

Çizelge 4.14. Tuğla Duvarlı Ölçümde 9. Blok İçin MGK Kontrolünün Çizelge Dökümü

	3,340	3,682	5,566
3,340	1,00000	0,07391	0,03678
3,682	0,07391	1,00000	0,02688
5,566	0,03678	0,02688	1,00000

Çizelge 4.15. Tuğla Duvarlı Ölçümde 8. Blok Kablolü Ölçüm İçin MGK Kontrolünün Çizelge Dökümü

	2,852	3,037	3,848
2,852	1,00000	0,00537	0,00524
3,037	0,00537	1,00000	0,05385
3,848	0,00524	0,05385	1,00000

Mod şekillerine ilişkin MAC değerleri incelendiğinde, diyagonal sırada yer alan değerlerin tam olarak 1, köşe değerlerin ise sıfıra son derece yakın değerleri olduğu görülmektedir. Elde edilen bu sonuçlar, OMA neticesinde elde edilen mod şekilleri ve modal frekansların, (Pastor et al, 2012) çalışmasında da ifade edildiği şekilde, güvenilir olduğunu ve değerlendirmelerde kullanılabileceklerini göstermektedir.

Sonuç olarak tezin temel amacı olan yapı kalitesi kontrolünün araştırılması için; Çizelge 4.9’da sunulan OMA sonuçlarının irdelenmesi önem arz etmektedir. Her iki bina için gerek yarı dolgu duvarlı ve gerekse tam dolgu duvarlı durumlarda belirlenen mod şekilleri ve ilgili periyot değerlerinin çok küçük farklar dışında neredeyse aynı olması saha uygulaması bakımından imalat kalitesinin özdeş olduğu sonucunu doğurmaktadır. Yüklenici firmanın, her iki bina için aynı kalitede işçilik sergilediğini ifade etmek mümkündür. Zira malzeme kalitesinin aynı olduğu tez çalışması saha uygulamalarının birinci aşamasında gerçekleştirilen beton dayanım tespiti çalışmalarında belirlenmiştir. Bu bağlamda, OMA uygulaması ile tip proje üzerinden imal edilen bina türü yapıların yapı kalitesi kontrolünün genel olarak yapılabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Bu uygulamanın, son yıllarda hız kazanan kentsel dönüşüm proje çalışmaları kapsamında

yaygın olarak tip proje üzerinden üretilen toplu konut imalatları için bir kalite kontrol seçeneği olabileceği düşünülmektedir.

4.3. STA4CAD Teorik Modal Analiz Verisi

Tez çalışması kapsamında, tip proje üzerinden imal edilmiş 2 adet betonarme çok katlı yapının yapım kalitesi kontrolünün deneysel ve teorik davranış parametreleri üzerinden yapılması amaçlanmıştır. Bu amaçla yapılan SAP2000 modeli deneysel çalışmalara yol gösterirken, STA4CAD yazılımının teorik modal analiz sonuçları tasarım kriterlerinin deneysel veriler ışığında sorgulanmasını sağlamıştır. STA4CAD yazılımı incelenen binanın statik çözümleme ve betonarme tasarımında kullanılmıştır. STA4CAD yazılımı ile oluşturulmuş modelde, modellemeye dahil edilmiş yapı elemanlarını bilmek SAP2000 yazılımında model geliştirmeyi kolaylaştırmış ve modeller üzerinden ortak bir değerlendirme imkanı sağlamıştır. STA4CAD yazılımında, modelleme esnasında binanın radye temel ve dolgu duvar dâhil tüm bileşenleri dikkate alınarak bir modelleme yapılmıştır. Bir başka ifadeyle, ulusal mevzuatta yer almamasına rağmen dolgu duvarların yapısal davranışa olan etkisinin dikkate alındığı bir çözümleme ile betonarme proje üretilmiştir.

STA4CAD yazılımında yapılan ve statik hesap raporunda sunulan teorik modal analize göre sonuçlar Çizelge 4.16’da sunulmuştur(Statik Hesap Raporu, 2013).

Çizelge 4.16. STA4CAD Yazılımında Hesaplanan Teorik Modal Analiz Sonuçları

Mod No	Periyot (sn.)	Frekans (Hz)	Mod Şekli
1	0,435	2,301	X Yönü Yatay Öteleme
2	0,385	2,599	Y Yönü Yatay Öteleme
3	0,361	2,774	Düşey Z Ekseninde Etrafında Yatay Burulma

4.4. SAP2000 Yazılımı ile Hazırlanan Sonlu Eleman Modelleri Üzerinde Hesaplanan Teorik Modal Analiz Sonuçları

Tez kapsamında incelenen binalarda teorik modal analiz sonuçlarını; OMA sonuçları ile kıyaslamak, yapıya ait bir temsil modeli araştırmak ve binanın tasarım aşamasında kullanılan dinamik davranış parametrelerine bir yorum getirebilmek adına birden fazla sonlu eleman modeli yapılmıştır. Örneğin; modellemenin birinci uygulamasında sistem ankastre mesnetli olarak kurgulanmış ve dolgu duvar rijitlik katkısı ihmal edilmiştir. Elde edilen modal analiz sonuçlarının deneysel çalışmalarla ve statik

raporla uyumlu olmaması nedeniyle, modelin mesnet koşullarının güncellenmesi yoluna gidilmiştir. Ek olarak; binaların OMA esnasındaki imalat durumunu yansıtır sonlu eleman modellerinin de oluşturulması gerekli görülmüştür. Çizelge 4.17’de SAP2000 yazılımında yapılan modellerin kodları ve açıklamaları sunulmuştur.

Çizelge 4.17. SAP2000 Model Kodları

Model Kodu	Açıklama
A1	Ankastre Temel ve Betonarme Perde-Çerçeve Sistem
A2	Radye Temel ve Betonarme Perde-Çerçeve Sistem
B1	Ankastre Temel, Betonarme Perde-Çerçeve ve Tam Dolgu Duvarlı Sistem
B2	Radye Temel, Betonarme Perde-Çerçeve ve Tam Dolgu Duvarlı Sistem
C1	Ankastre Temel, Betonarme Perde-Çerçeve ve Yarı Dolgu Duvarlı Sistem
C2	Radye Temel, Betonarme Perde-Çerçeve ve Yarı Dolgu Duvarlı Sistem

Bu sayede sonlu eleman modellerinde; OMA uygulaması ile sahada belirlenen deneysel davranışa en yakın temel ve dolgu duvar yaklaşımı araştırılırken, deneysel çalışmalar esnasındaki bina imalat durumları da dikkate alınmıştır. Teorik modal analiz çalışmaları esnasında sonlu eleman modellerindeki malzeme bilgileri ise tasarım kriterlerine göre, statik hesap raporunda belirtilen şekilde, girilmiştir. Yani C25 beton ve TBDY-2018’deki boşluklu tuğla duvar “Elastisite Modülü” 2.000 MPa değerlerine göre modal analizler yapılmıştır (TBDY,2018). Toplam 6 ayrı sonlu eleman modeli üzerinden hesaplanan teorik modal analiz sonuçları aşağıda detaylandırılmaktadır.

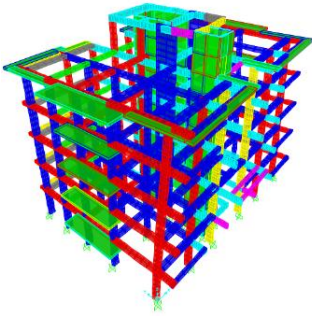
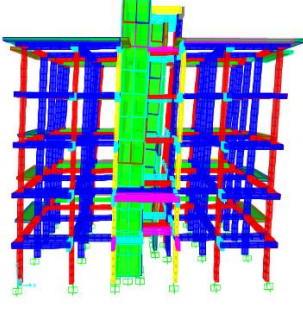
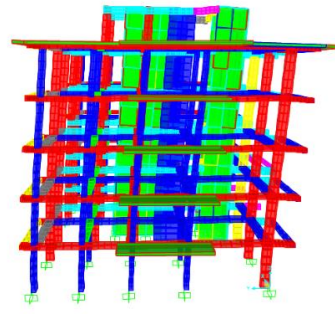
A1. Ankastre Temel ve Betonarme Perde-Çerçeve Sistem

Ankastre temel ve betonarme perde-çerçeve sistem için SAP2000 yazılımında yapılan analize ait değerler Çizelge 4.18’de mod şekilleri ise Çizelge 4.19’da gösterilmiştir (SAP2000, 2020). Ek olarak OMA çalışmaları bina inşaat halinde yapıldığı için o sırada yapıda sadece ölü yüklerin bir kısmı bulunmaktaydı. Bu sebeple modal analize esas yüklerde sadece binadaki ölü yükler bulunmaktadır. Bu model için dolgu duvarların rijitlik etkisi de hesaba katılmamıştır.

Çizelge 4.18. A1 Modeli: Ankastre Temel ve B.A Perde-Çerçeve Sistemin Modal Analiz Sonuçları

Mod	Frekans (Hz)	Periyot (sn.)	Mod Şekli
1	2,105	0,475	Düşey Z Ekseninde Yatay Burulma
2	2,653	0,377	X Yönü Yatay Öteleme
3	3,251	0,301	Y Yönü Yatay Öteleme

Çizelge 4.19. A1 Modeli: Ankastre Temel ve B.A Perde-Çerçeve Sistemin Mod Şekilleri

MOD 1 Burulma 2,105 Hz	MOD 2 X Yönü Yatay Öteleme 2,653 Hz	MOD 3 Y Yönü Yatay Öteleme 3,251 Hz
		

Bu model üzerinde hesaplanan mod şekilleri; OMA çalışmalarından elde edilen mod şekilleri sıralaması bakımından birbirinden farklı çıkmıştır. Ek olarak statik hesap raporunda sunulan mod şekilleri sıralaması içinde aynı durum söz konusudur. OMA sonucunda ve hatta statik hesap raporunda 3. Mod şekli olarak sunulan düşey eksen etrafındaki yatay burulma hareketi; bu model üzerinde birinci mod şekli için hesaplanmıştır.

Mod şekillerini eşleştirme amacıyla, yapı temelının zemin yatak katsayısı değeri (30.000 kN/m^3) hesaba alınarak; radye temel modellenmesi yoluna gidilmiştir.

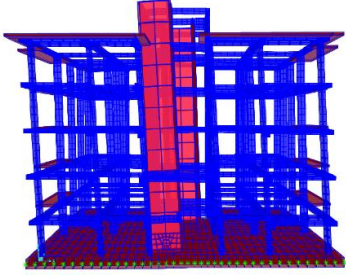
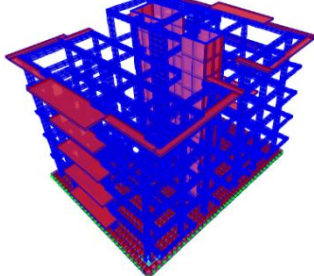
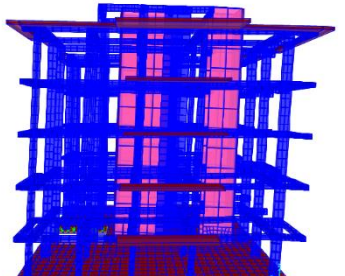
A2. Radye Temel ve Betonarme Perde-Çerçeve Sistem

Ankastre mesnet koşulları değiştirilerek oluşturulan; radye temel ve betonarme perde-çerçeve sistem için SAP2000 yazılımında yapılan analiz değerleri Çizelge 4.20’de mod şekilleri ise Çizelge 4.21’de gösterilmiştir (SAP2000, 2020). Modal analize esas yüklerde sadece binadaki ölü yükler bulunmaktadır. Dolgu duvar rijitlik etkileri bu modelde de ihmal edilmiştir.

Çizelge 4.20. A2 Modeli: Radye Temel ve B.A Perde-Çerçeve Sistemin Modal Analiz Sonuçları

Mod	Frekans (Hz)	Periyot (sn.)	Mod Şekli
1	1,414	0,707	X Yönü Yatay Öteleme
2	1,671	0,598	Düşey Z Eksen Etrafında Yatay Burulma
3	1,829	0,547	Y Yönü Yatay Öteleme

Çizelge 4.21. A2 Modeli: Radye Temel ve B.A Perde-Çerçeve Sistemin Mod Şekilleri

MOD 1 X Yönü Yatay Öteleme 1,414 Hz	MOD 2 Burulma 1,671 Hz	MOD 3 Y Yönü Yatay Öteleme 1,829 Hz
		

Radye temelli bu model üzerinde yapılan hesaplamalar neticesinde; birinci mod şekli, OMA sonuçları ve statik hesap raporu ile aynı olup X yönünde (kısa doğrultu) yatay öteleme olarak hesaplanmıştır. Ancak, ikinci ve üçüncü mod şekillerinin deneysel ve tasarım sonuçlarından farklı olduğu görülmüştür. Burada altı çizilmesi gereken husus; farklı mesnet koşullarına sahip iki sonlu eleman modeli üzerinden hesaplanan ve OMA sonuçlarında sunulan mod şekillerinin karşılaştırılması çalışmasının yapıldığıdır. Periyot değerleri için bir karşılaştırma yapılmayışının nedeni; bir diğer kıstas parametremiz olan statik hesap raporunda, hareketli yük kaynaklı kütlenin hesaba katılmış olmasıdır.

Yapılan ilk incelemede yukarıda görüldüğü gibi dolgu duvarsız betonarme çerçeve sistemlerde temel tiplerinin etkileri incelenmiştir. Bu inceleme sonucunda binalar için yapılan zemin etüdünden elde edilen verilerle radye temel eklenmiş modelde periyot değerlerinin normalden fazla yükseldiği görülmüştür. Bununla birlikte radye temel eklenmiş modeldeki ilk mod şekli “X yönünde yatay öteleme” şeklinde değişiklik göstermiştir. Sonuç olarak modele radye temel tanımlanması ile zemin özelliklerinin yapı üzerinde oluşturduğu etkileşimler görülmeye başlanmıştır. Bunun sonucu olarak ankastre mesnet koşullarına göre daha zayıf bir temel olan radye temelin ekli olduğu modelde periyot değerleri artış göstermiştir. Sonraki aşamada; OMA sonuçları ve statik hesap raporu ile uyumlu modal analiz sonuçlarının hesaplanabildiği bir model oluşturulması çalışmasına devam edilmiş ve bu durumda, SAP2000 yazılımı ile oluşturulan sonlu eleman modelinin dolgu duvar eklentisi ile güncellenmesi yoluna gidilmiştir (SAP2000, 2020).

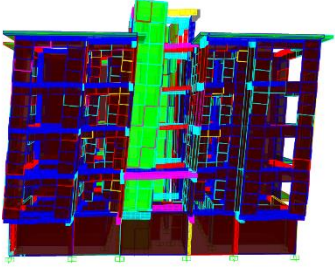
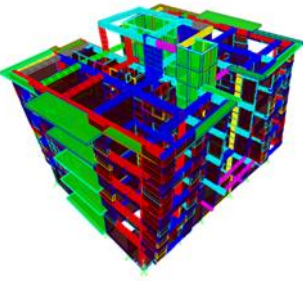
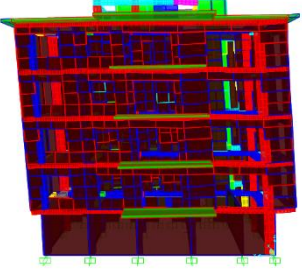
B1. Ankastre Temel, Betonarme Perde-Çerçeve Sistem ve Dolgu Duvarlı Sistem

Ankastre temel, betonarme perde-çerçeve sisteme dolgu duvarların tanımlanması suretiyle elde edilen sonlu eleman modeli üzerinde hesaplanan modal analiz değerleri Çizelge 4.22’de mod şekilleri ise Çizelge 4.23’de gösterilmiştir. Modal analize esas yüklerde sadece binadaki ölü yükler bulunmaktadır. Bu durum; yapılarda ikinci OMA çalışmasıyla deneysel dinamik davranış parametrelerinin belirlendiği durumu temsil eder nitelikte model oluşturma amacıyla çalışılmıştır. Ayrıca, sonuçların STA4CAD yazılımındaki teorik modal analiz sonuçları ile doğru bir perspektifte incelenebilmesi için “g+0,3q” yüklemesi de esas alınmış ve değerler Çizelge 4.24’te ilaveten sunulmuştur. Her iki analiz sonucunda da; mod şekillerinin, OMA sonuçlarından ve statik hesap raporunda sunulan değerlerden farklı olduğu görülmüş ve radye temelli modele dolgu duvar eklentisi yapılarak sonlu eleman modelinin güncellenmesi yoluna gidilmiştir.

Çizelge 4.22. B1 Modeli: Ankastre Temel, B.A Perde-Çerçeve ve Dolgu Duvar Sistemin Modal Analiz Sonuçları

Mod	Frekans (Hz)	Periyot (sn.)	Mod Şekli
1	3,306	0,303	X Yönü Yatay Öteleme
2	3,964	0,252	Düşey Z Eksen Etrafında Yatay Burulma
3	4,448	0,225	Y Yönü Yatay Öteleme

Çizelge 4.23. B1 Modeli: Ankastre Temel, B.A Perde-Çerçeve ve Dolgu Duvar Sistemin Mod Şekilleri

MOD 1 X Yönü Yatay Öteleme 3,306 Hz	MOD 2 Burulma 3,964 Hz	MOD 3 Y Yönü Yatay Öteleme 4,448 Hz
		

Çizelge 4.24. B1 Modeli: Ankastre Temel, B.A Perde-Çerçeve ve Dolgu Duvar Sistemin g + 0,3q Modal Analiz Sonuçları

Mod	Frekans (Hz)	Periyot (sn.)	Mod Şekli
1	3,072	0,326	X Yönü Yatay Öteleme
2	3,989	0,271	Düşey Z Eksen Etrafında Yatay Burulma
3	4,133	0,242	Y Yönü Yatay Öteleme

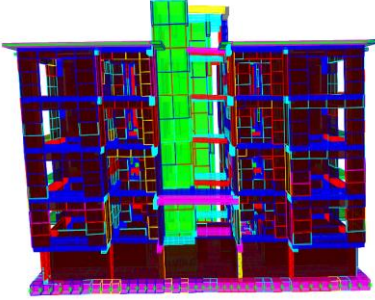
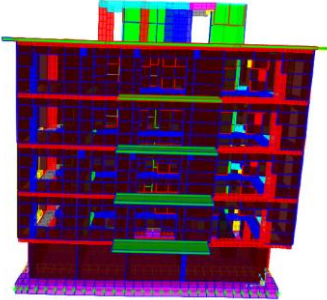
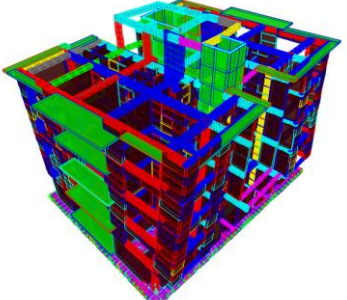
B2. Radye Temel, Betonarme Perde-Çerçeve Sistem ve Dolgu Duvarlı Sistem

B1 modelinden farklı olarak; temel mesnetlenme koşulları radye temel olarak güncellenen modele, dolgu duvarlar eklenmiş ve hesaplanan teorik değerler Çizelge 4.25’de mod şekilleri ise Çizelge 4.26’da gösterilmiştir. Ek olarak modal analize esas yüklerde sadece binadaki ölü yükler bulunmaktadır. Ancak sonuçların STA4CAD yazılımındaki teorik modal analiz sonuçları ile de doğru bir perspektifte incelenebilmesi için “g+0,3q” yükleme de esas alınmış ve sonuçları Çizelge 4.27’de sunulmuştur. B2 modelinin gerek hareketli yükün hesaba katılmadığı, gerekse hesaba katıldığı durumlar için hesaplanan mod şekillerinin hem OMA sonuçları ile hem de statik hesap raporu ile aynı olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 4.25. B2 Modeli: Radye Temel, B.A Perde-Çerçeve ve Dolgu Duvar Sistemin Modal Analiz Sonuçları

Mod	Frekans (Hz)	Periyot (sn.)	Mod Şekli
1	2,454	0,408	X Yönü Yatay Öteleme
2	2,784	0,359	Y Yönü Yatay Öteleme
3	3,157	0,317	Düşey Z Eksenine Etrafında Yatay Burulma

Çizelge 4.26. B2 Modeli: Radye Temel, B.A Perde-Çerçeve ve Dolgu Duvar Sistemin Mod Şekilleri

MOD 1 X Yönü Yatay Öteleme 2,454 Hz	MOD 2 Y Yönü Yatay Öteleme 2,784 Hz	MOD 3 Burulma 3,157 Hz
		

Çizelge 4.27. B2 Modeli: Radye Temel, B.A Perde-Çerçeve ve Dolgu Duvar Sistemin g + 0,3q Modal Analiz Sonuçları

Mod	Frekans (Hz)	Periyot (sn.)	Mod Şekli
1	2,281	0,439	X Yönü Yatay Öteleme
2	2,588	0,386	Y Yönü Yatay Öteleme
3	2,938	0,340	Düşey Z Eksen Etrafında Yatay Burulma

B1 ve B2 modelleri üzerinde yapılan ikinci incelemede dolgu duvarların teorik modal analiz hesaplamaları üzerindeki etkileri araştırılmış, sonuçlar OMA ve statik hesap raporundaki veriler ile karşılaştırılmıştır. Mod şekilleri baz alındığında OMA sonuçlarının ve statik hesap raporunun uyumlu olduğu görülmüştür. Kütle kaynağı tanımlanırken hareketli yük etkilerinin %30 oranında dikkate alındığı B2 modelinde ise teorik modal analizin gerek mod şekilleri ve gerekse periyot değerleri bakımından statik hesap raporunda sunulan değerlerle özdeş sonuçlar verdiği görülmüştür.

Sonlu eleman modellerinde, dolgu duvarların sisteme eklenmesinde birkaç yöntem bulunmaktadır. Betonarme çerçevelere çapraz eksenel yük elemanları tanımlama da bu yöntemlerde biridir (Okuyucu, 2011). Ancak bu çalışmada araştırmanın odağı modal analiz olduğu için dolgu duvarların alan elemanlarla modellenip modal kütle ve rijitlik katkılarının SAP2000 yazılımınca hesaplanması yeterli bulunmuştur (SAP2000, 2020).

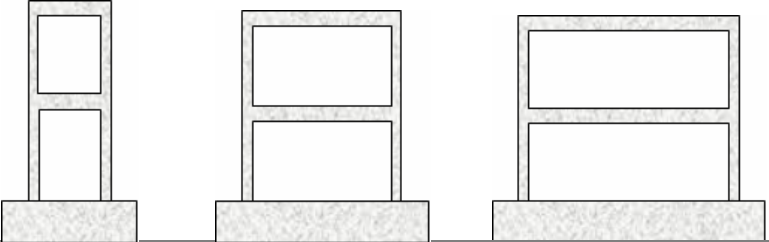
Dolgu duvarların modelleme aşamalarından önce, yapım pratiklerinde özellikle dikkat edilen noktalarından biri dolgu duvarların, betonarme kiriş tarafından sıkıştırılıp sabitleştirilmesidir. Dolgu duvar örgüsü çerçeve açıklığını kapatmaya yetmezse veya sıkıştırmazsa boşluk harç ile ya da poliüretan köpük ile doldurulmaktadır. Tez kapsamında incelenen binalarda da bu uygulama gerçekleştirilmiş olup Şekil 4.7’de görüldüğü gibi betonarme çerçeve boşluğunda dolgu duvarın yatay etkiler altında çerçeveden bağımsız hareket imkânları ortadan kaldırılmıştır. Bu durumun; modal davranış parametrelerini etkileyecek pratik bir uygulama olabileceği düşünülmüştür.



Şekil 4.7. Dolgu Duvarlar İle Kiriş Arasındaki Boşluğun Kaldırılması

Konuya ilişkin literatürde yer alan pek çok çalışmaya ek olarak; dolgu duvarların betonarme çerçeve boşluklarıyla etkileşimleri ve yatay yükler etkisi altındaki yapısal davranışa olan katkısı (Okuyucu, 2011) çalışmasında oldukça kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Yapılan çalışmada farklı açıklık oranlarındaki çerçeve sistemler farklı dolgu duvar modelleri ile deneysel olarak inceleme altına alınmıştır. Çerçeve sistemlerin daha iyi anlaşılması adına Çizelge 4.28’de daha detaylıca izah edilmiştir.

Çizelge 4.28. İncelenen Çerçevelerin Detayları (Okuyucu, 2011)

$\alpha = h_1/L$	Dar Çerçeveler	Standart Çerçeveler	Geniş Çerçeveler
h_1 ,kiriş uzunluğu (mm)	700	1400	2050
H, kolon yüksekliği (mm)	975	825	825
Açıklık Oranı, α	0,72	1,70	2,48
Ölçekli Çizim			

Deney sonuçlarının istatistiğini ve değerlendirmesini anlamlı kılmak için her çerçeve serisinde; boş çerçevelere, dolgu panelli çerçevelere, çapraz eksenel elemanlı çerçevelere ve beton dolgulu çerçevelere deneyler yapılmıştır. Çalışmadaki anlam kargaşasını kaldırmak için Çizelge 4.29’da görüldüğü gibi her panele dolgu durumuna göre kodlar verilmiştir.

Çizelge 4.29. Çerçeve Serilerinin Dolgu Duvar Kodları (Okuyucu, 2011)

Seriler	Boş Çerçeve	Referans (Tuğla İle Örölmüş)
Dar Çerçeve (Narrow)	NB	NR
Standart Çerçeve	SB	SR
Geniş Çerçeve (Wide)	WB	WR

Görölen farklı açıklık oranlarındaki 3 çerçeve serisine (dar, standart ve geniş çerçeveler) bir dizi güçlendirilmiş dolgu duvar deneyleri uygulandıktan sonra elde edilen değerler Çizelge 4.30’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.30. Çerçeve Serilerine Uygulanan Deneylerin Sonuçları (Okuyucu, 2011)

Numuneler	Basınç Dayanımları (MPa)			İleri Yüklemeye Maks. Yük (kN)	Geri Yüklemeye Maks. Yük (kN)	Başlangıç Rijitliği (kN/mm)
	Çerçeve	Panel	Harç			
NB	7,9	-	-	8,4	7,6	1,1
NR	19,0	-	5,0	34,5	35,1	10,9
SB	13,7	-	-	13,6	13,4	1,2
SR	12,2	-	5,5	78,3	75,5	57,5
WB	14,9	-	-	15,4	13,8	1,4
WR	17,6	-	5,1	87,8	82,3	122,3

İncelenen doktora tezindeki deneysel çalışmaların sonucundan elde edilen verilere bakıldığında narinlik oranı olan boş dar çerçevelere (NB) sadece tuğla dolgu duvar (NR) eklenmiş hallerinde dahi çerçeve rijitliği yaklaşık olarak 10 kat artmıştır (Okuyucu, 2011). Deneysel çalışmada standart çerçeve olarak adlandırılan ve 1,7 açıklık oranına sahip numunede bu artışın daha yüksek olduğu görölmüştür. Şöyle ki; standart boş çerçevede (SB) başlangıç rijitliği 1,2 iken sadece tuğla dolgu duvarlı standart çerçevede (SR) başlangıç rijitliği 57,5 değerine ulaşmıştır (Okuyucu, 2011). Geniş çerçeve olarak tanımlanan numunelerde ise dolgu duvar eklentisi ile yanal rijitlikte ~90 kata kadar artış olduğu rapor edilmiştir.

Bayölke, 2003’te Betonarme Yapının Dolgu Duvarı çalışmasında dolgu duvarların yapı periyotlarında oluşturduğu farklılıkları irdelemiştir. Çalışma kapsamında incelenen yapıların dolgu duvar ve sıvaları yapılmış durumdaki titreşim periyotlarının, çıplak çerçeve durumundaki periyotlarının % 50 - 70’i kadar olduğu gözlemlenmiştir (Bayölke, 2003).

Sonuç olarak; çalışma kapsamında incelenen binalarda dolgu duvarların rijitliğe ve periyotlara etkileri göz ardı edilmeyerek, sonlu eleman modellemelerine radye temelden sonra dolgu duvarlar da eklenmiştir. Bu modellerin, binalar için gerçekleştirilen OMA çalışması sonuçlarının irdelenmesinde kullanılacağı bir kez daha ifade edilmelidir.

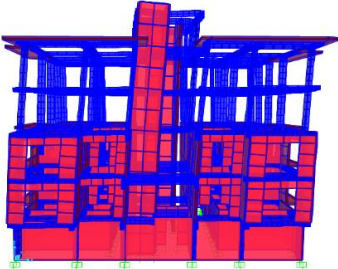
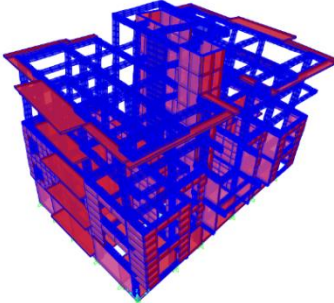
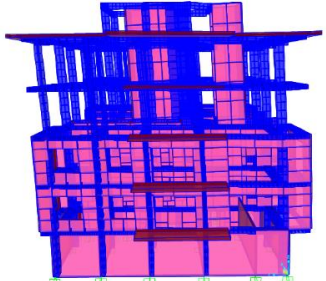
C1. Ankastre Temel, Betonarme Perde-Çerçeve Sistem ve Yarı Dolgu Duvarlı Sistem

Binalarda gerçekleştirilen birinci OMA uygulamaları esnasında yapılardaki dolgu duvarların yarısının imalatının tamamlanmış olması nedeniyle; kıyaslama yapılabilmesi için bu durumu yansıtan sonlu eleman modelleri de oluşturulmuştur. Bu kapsamda; C1 modeli olarak tanımlanan ankastre temel, betonarme perde-çerçeve ve yarı dolgu duvarlı sistem için SAP2000 yazılımında yapılan analize ait değerler Çizelge 4.31’de mod şekilleri ise Çizelge 4.32’de gösterilmiştir (SAP2000, 2020). Modal analize esas yüklerde sadece binadaki ölü yükler bulunmaktadır. Yapı kullanım halinde olmadığı için hareketli yük katkısı dikkate alınmamıştır.

Çizelge 4.31. C1 Modeli: Ankastre Temel, B.A Perde-Çerçeve ve Yarı Dolgu Duvar Sistemin Modal Analiz Sonuçları

Mod	Frekans (Hz)	Periyot (sn)	Mod Şekli
1	2,998	0,334	X Yönü Yatay Öteleme
2	3,692	0,271	Düşey Z Ekseninde Etrafında Yatay Burulma
3	4,141	0,242	Y Yönü Yatay Öteleme

Çizelge 4.32. C1 Modeli: Ankastre Temel, B.A Perde-Çerçeve ve Yarı Dolgu Duvar Sistemin Mod Şekilleri

MOD 1 X Yönü Yatay Öteleme 2,998 Hz	MOD 2 Burulma 3,692 Hz	MOD 3 Y Yönü Yatay Öteleme 4,141 Hz
		

Bu model üzerinde yapılan analiz sonucunda, mod şekillerinin sırası OMA sonuçları ve statik analiz raporundaki sonuçlardan farklılık göstermiş ve düşey eksen etrafında burulma hareketi ikinci mod şekli olarak hesaplanmıştır.

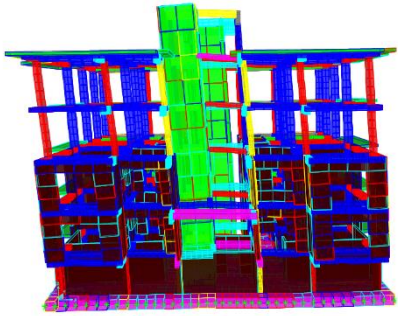
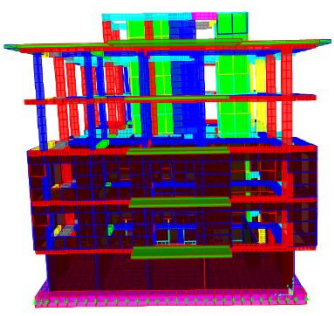
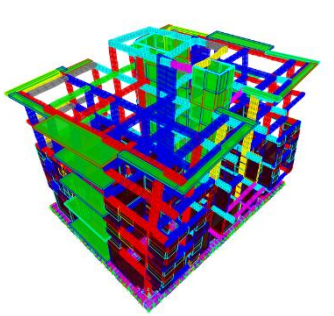
C2. Radye Temel, Betonarme Perde-Çerçeve Sistem ve Yarı Dolgu Duvarlı Sistem

Yarı dolgu duvarlı ikinci model olarak kurgulanan C2 modelinde; radye temel, betonarme perde-çerçeve ve yarı dolgu duvarlı sistem için SAP2000 yazılımında yapılan analize ait değerler Çizelge 4.33’de mod şekilleri ise Çizelge 4.34’de gösterilmiştir. Ek olarak modal analize esas yüklerde sadece binadaki ölü yükler bulunmaktadır. C1 modeline benzer şekilde hareketli yük katkısı ihmal edilmiştir.

Çizelge 4.33. C2 Modeli: Radye Temel, B.A Perde-Çerçeve ve Yarı Dolgu Duvar Sistemin Modal Analiz Sonuçları

Mod	Frekans (Hz)	Periyot (sn.)	Mod Şekli
1	2,411	0,415	X Yönü Yatay Öteleme
2	2,756	0,363	Y Yönü Yatay Öteleme
3	2,945	0,340	Düşey Z Eksen Etrafında Yatay Burulma

Çizelge 4.34. C2 Modeli: Radye Temel, B.A Perde-Çerçeve ve Yarı Dolgu Duvar Sistemin Mod Şekilleri

MOD 1 X Yönü Yatay Öteleme 2,411 Hz	MOD 2 Y Yönü Yatay Öteleme 2,756 Hz	MOD 3 Burulma 2,945 Hz
		

C2 modeli üzerinde hesaplanan mod şekillerinin OMA sonuçlarında ve statik raporda sunulan mod şekilleri ile aynı sırada olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, periyot değerlerinin daha az hesaplandığı görülmektedir. Bunun temel nedeni olarak; hareketli yük etkisi ihmali ile kütlenin daha az ve dolgu duvar eksikliği ile yanıl rijitliğin daha az tanımlanmış olmasının düşünülmesi mümkündür.

Sonlu eleman modelinde, OMA çalışmaları esnasında binaların yapım aşamalarındaki durumlarının araştırılması amacıyla yarı dolgu duvarlı modeller üzerinde analizler yapılmıştır. Daha önce yapılan analizlerden elde edilen çıktılarına göre radye temelli olan model sonuçları OMA kıyası için esas alınmıştır. Radye temelli modelde görüldüğü üzere mod şekilleri beklenen sıra ile “X yönü yatay öteleme – Y yönü yatay öteleme – Z eksen etrafında yatay burulma” halini almıştır. Radye temelli ve yarı dolgu duvarlı modelin periyot değerleri ise ankastre temelli modele göre yine radye etkisi ile artmıştır.

Teorik modal analiz sonuçları kendi içerisinde değerlendirildiğinde; statik hesap raporunda STA4CAD yazılımı ile oluşturulan model üzerinde yapılan modal analiz sonuçları ile SAP2000 yazılımında oluşturulan modeller üzerinde yapılan modal analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma Çizelge 4.35’de sunulmuştur. Statik hesap raporu ile yaklaşık olarak aynı modal analiz sonuçlarını veren ve SAP2000 yazılımı ile hazırlanan B2 modeli bu kıyaslamada kullanılmıştır (SAP2000, 2020).

Çizelge 4.35. STA4CAD ve SAP2000 Yazılımlarında Hesaplanan Modal Analiz Sonuçları

MODLAR	STA4CAD		SAP2000 – B2 Modeli		FARK
	Frekans (Hz)	Mod Şekli	Frekans (Hz)	Mod Şekli	
MOD – 1	2,301	X Yönü Yatay Öteleme	2,281	X Yönü Yatay Öteleme	0,9
MOD – 2	2,599	Y Yönü Yatay Öteleme	2,588	Y Yönü Yatay Öteleme	0,4
MOD – 3	2,774	Düşey Z Eksen Etrafında Yatay Burulma	2,938	Düşey Z Eksen Etrafında Yatay Burulma	5,9

Çizelge 4.35’de görüldüğü üzere modal analize esas yüklemeleri ve malzeme mekanik özellikleri aynı olan, bununla birlikte dolgu duvar ve radye temelin ekli olduğu B2 kodlu SAP2000 modelindeki modal analiz sonuçları STA4CAD modal analiz sonuçları büyük oranda uyumuştur (SAP2000, 2020).

Bu durumda SAP2000 ve STA4CAD yazılımında belirli parametreleri sağlayarak yapılan modeller büyük oranda uyum sağlamıştır. Çizelge 4.35’te görüldüğü üzere ilk iki mod için fark neredeyse sıfırdır. Birbirinden farklı bu iki yazılım, tez çıktıları haricinde tek bir model üzerinden tam manasıyla kıyaslanamamıştır. Konu başlığı ile istatistik biliminin oluşturduğu tabanlığa göre yazılımların kıyası üzerinde çalışma yapacaklar için bir veri tabanı sunulması amaçlanmıştır (SAP2000, 2020).

Ek olarak ulusal yönetmeliklerde geçtiği gibi, eleman olarak değil kütle olarak dolgu duvarların sisteme eklendiği sonlu eleman modellerine ait modal analiz sonuçları ankastre temel modelli Çizelge 4.36’da radye temel modelli Çizelge 4.37’de olacak şekilde sunulmuştur.

Çizelge 4.36. Dolgu Duvarın Kirişlere Yük Olarak Etki Ettirildiği A1 Modeli: Ankastre Temelli Çerçeve Sistemin Modal Analiz Sonuçları

Mod	Frekans (Hz)	Periyot (sn.)	Mod Şekli
1	1,645	0,608	Düşey Z Eksen Etrafında Yatay Burulma
2	2,100	0,476	X Yönü Yatay Öteleme
3	2,596	0,385	Y Yönü Yatay Öteleme

Çizelge 4.37. Dolgu Duvarın Kirişlere Yük Olarak Etki Ettirildiği A2 Modeli: Radye Temelli Çerçeve Sistemin Modal Analiz Sonuçları

Mod	Frekans (Hz)	Periyot (sn.)	Mod Şekli
1	1,122	0,892	Düşey Z Eksen Etrafında Yatay Burulma
2	1,304	0,767	X Yönü Yatay Öteleme
3	1,458	0,686	Y Yönü Yatay Öteleme

Ankastre ve radye temelli çerçeve sistemlere dolgu duvar elemanlarının sadece kütlelerinin etki ettirildiği sistemlerin modal analiz sonuçları incelendiğinde OMA sonuçlarından hem mod şekilleri hem de frekans-periyot değerleri büyük farklılıklar göstermiştir. Değerlendirmenin özelinde bakıldığında radye temel etkisini mod şekli ile yine göstermektedir. Bu modelleme aslında B türü modellemenin bir farklı araştırma yönü olarak görülebilir. İki modelin tek farkı dolgu duvar rijitliklerinin ihmalleridir. Bu sonuç sonlu eleman modellemelerde radye temel ve dolgu duvar elemanlarının modele dahil edilmesi gerekliliğini bir kere daha göstermiştir.

4.5. Sonlu Eleman Modelinin Güncellenmesi

Tez kapsamında incelenen betonarme binalarda, deneysel çalışmalara ışık tutması için tüm yapım aşamalarını temsil eden sonlu eleman modelleri SAP2000 yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur (SAP2000, 2020). Ardından OMA çalışmaları yapılmış ve binalar için yerinde dinamik davranış parametrelerine ulaşılmıştır. Bu esnada betonarme binaların malzeme dayanım değerleri kontrol edilip tahribatsız yöntemlerle bu bilgiler teyit edilmiştir. Binaların teorik modal analizinde kullanılacak sonlu eleman modelleri SAP2000 yazılımı kullanılarak oluşturulmuş olup OMA ile uyumlu modlar veren ve proje statik raporunda sunulan modal analiz sonuçlarını hesaplayan model (B2 modeli) elde edilmiştir. Buna ek olarak; yarı dolgu duvar bulunan sonlu eleman modelleri de ayrıca

oluşturulmuştur. Devamında, binaların yerinde dinamik davranış parametreleri belirlenmiştir. Sonlu eleman modeli üzerinden binalar için hesaplanan teorik modal analiz sonuçları ile OMA sonuçları kıyaslandığında, Çizelge 4.38’de sunulduğu şekilde, mod şekilleri aynı olurken periyot farkları olduğu belirlenmiş ve sonlu eleman modellerinin kalibre edilmesi yoluna gidilmiştir. Yapısal model kalibrasyonu olarak nitelendirilen bu çalışmada “deneme-yanılma” yöntemi esasına dayanarak malzeme özellikleri tanımlanarak model güncelleme uygulaması gerçekleştirilmiştir. Burada temel amaç; sahadaki mevcut durumu yansıtan sonlu eleman modelini oluşturmak ve sonrasında kullanım yüklerini de hesaba katarak hesaplanacak dinamik davranış parametrelerinin statik hesap raporu ile karşılaştırılmasıdır (SAP2000, 2020).

Çizelge 4.38. DeneySEL ve Teorik Çalışmalarda Dolgu Duvar Aşamalarına Göre Modal Analiz Sonuçları

Bina	Yarı Tuğla Duvarlı Durum				Tam Tuğla Duvarlı Durum		
	Mod No	Frekans (Hz)			Teorik Modal Analiz (B2 Modeli)	Frekans (Hz)	
		Teorik Modal Analiz (C2 Modeli)	OMA (Gerçek Bina)	Fark (%)		OMA (Gerçek Bina)	Fark (%)
8. Blok	1	2,411	3,174	31,6	2,454	3,340	36,1
	2	2,756	3,540	28,4	2,784	3,682	32,3
	3	2,945	3,936	33,7	3,157	5,566	76,3
9. Blok	1	2,411	3,145	30,4	2,454	3,340	36,1
	2	2,756	3,535	28,3	2,784	3,496	25,6
	3	2,945	4,019	36,5	3,157	5,400	71,0

Sonlu eleman modeli güncelleme işlemine ilk olarak güncel beton malzeme bilgilerinden yola çıkılarak başlanmıştır. Malzeme dayanım değerlerinin irdelendiği bölümde de görüldüğü gibi deneyler, binada kullanılan betonun dayanımının, tasarım değerinden yukarıda olduğunu göstermiştir. Yani tasarım aşamasında hesaplamalar C25 betona göre yapılmış olsa da deneySEL çalışmalarda binada C30 betona yakın bir dayanım değeri gözlemlenmiştir. Bu sebeple model güncelleme çalışmalarına ilk olarak betonun dayanımının ve elastisite modülünün güncellenmesi ile başlanmıştır.

Güncellenen modeller tam dolgu duvarlı durumu temsil eden B2 ve yarı dolgu duvarlı durumu temsil eden C2 modelleridir.

Sonlu eleman modelinde tuğla duvar elastisite modülü TBDY-2018’e göre 2.000 MPa ve beton basınç dayanımı ise C30 olarak güncellenmiştir (TBDY,2018). Statik proje raporunda da tuğla duvar elastisite modül değeri 2.000 MPa olarak verilmektedir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bununla birlikte betonun elastisite modülü $E=30.000$ MPa iken $E=33.000$ MPa olarak güncellenmiştir.

Çizelge 4.39’da, sonlu eleman modeli güncellemesi işleminde temel alınan OMA sonuçları ve deneyler yapıldığı esnada binalardaki güncel durumu (ölü yükler, ek tekil yükler vs.) temsil eden B2 ve C2 sonlu eleman modellerinin modal analiz sonuçları sunulmuştur. Teorik ve deneysel frekanslar karşılaştırıldığında yer yer %40 oranında fark olduğu görülmüştür. Bu durumda, modellerin tekrar güncellenmesi gerektiğine karar verilmiştir.

Çizelge 4.39. C30 Beton ve $E=2.000$ MPa Tuğla Duvar Mekanik Özelliklerine Göre Model Güncelleme Sonuçlarının Karşılaştırılması

Ölçüm Durumu	Bina	OMA Sonuçları			Kalibre Edilmiş Sonlu Eleman Modeli (B2-C2 Modelleri) ($E_{tuğla}=2.000\text{mpa}$)			Fark (%)
YARI TUĞLA DUVAR	8. BLOK	MOD-1	3,174 Hz	X	Mod-1	2,463 Hz	X	22,4
		MOD-2	3,540 Hz	Y	Mod-2	2,793 Hz	Y	21,1
		MOD-3	3,936 Hz	B	Mod-3	3,012 Hz	B	23,5
	9. BLOK	MOD-1	3,145 Hz	X	Mod-1	2,463 Hz	X	21,7
		MOD-2	3,535 Hz	Y	Mod-2	2,793 Hz	Y	21,0
		MOD-3	4,019 Hz	B	Mod-3	3,012 Hz	B	25,1
TAM TUĞLA DUVAR	8. BLOK	MOD-1	3,340 Hz	X	Mod-1	2,500 Hz	X	25,2
		MOD-2	3,682 Hz	Y	Mod-2	2,817 Hz	Y	23,5
		MOD-3	5,566 Hz	B	Mod-3	3,205 Hz	B	42,4
	9. BLOK	MOD-1	3,340 Hz	X	Mod-1	2,500 Hz	X	25,2
		MOD-2	3,496 Hz	Y	Mod-2	2,817 Hz	Y	19,4
		MOD-3	5,400 Hz	B	Mod-3	3,205 Hz	B	40,7

Beton malzemesine ait basınç dayanımı değerleri hem laboratuvar deneyleriyle hem de tahribatsız deneylerle teyit edilip modelde güncellendikten sonra yapılarda davranışa büyük katkısı olan dolgu duvar malzemesinin mekanik özellikleri de sonlu eleman modeli üzerinde güncellenmiştir.

Çizelge 4.40’da ise OMA deneysel çalışmalarının sonuçları ve deneyler yapıldığı esnada binalardaki güncel durumu (ölü yükler, ek tekil yükler vs.) temsil eden, tuğla elastisite modülü 8.000 MPa ve beton elastisite modülü 33.000 MPa olarak güncellenmiş sonlu eleman modelinin modal analiz sonuçları sunulmuştur. Bu durumda, teorik ve deneysel modal frekanslar arasındaki farkın genel olarak %10’un altında kaldığı görülmüştür. Bu fark; kabul edilebilir bir değer olarak kabul edilmiş ve model güncelleme çalışması bu uygulama ile sonlandırılmıştır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Çizelge 4.40. C30 Beton ve E=8.000 MPa Boşluklu Tuğla Duvar Mekanik Özelliklerine Göre Model Güncelleme Sonuçlarının Karşılaştırılması

ÖLÇÜM DURUMU	BİNA	OPERASYONEL MODAL ANALİZ SONUÇLARI			KALİBRE EDİLMİŞ SONLU ELEMAN MODELİ (B2-C2 Modelleri) (E _{TUĞLA} =8.000MPa)			FARK (%)
		Mod	Frekans (Hz)	Mod Şekli	Mod	Frekans (Hz)	Mod Şekli	
YARI TUĞLA DUVAR	8. BLOK	MOD-1	3,174	X	Mod-1	3,101	X	2,3
		MOD-2	3,540	Y	Mod-2	3,447	Y	2,6
		MOD-3	3,936	B	Mod-3	3,949	B	0,3
	9. BLOK	MOD-1	3,145	X	Mod-1	3,101	X	1,4
		MOD-2	3,535	Y	Mod-2	3,447	Y	2,5
		MOD-3	4,019	B	Mod-3	3,949	B	1,8
TAM TUĞLA DUVAR	8. BLOK	MOD-1	3,340	X	Mod-1	3,212	X	3,8
		MOD-2	3,682	Y	Mod-2	3,463	Y	5,9
		MOD-3	5,566	B	Mod-3	5,013	B	9,9
	9. BLOK	MOD-1	3,340	X	Mod-1	3,212	X	3,8
		MOD-2	3,496	Y	Mod-2	3,463	Y	0,9
		MOD-3	5,400	B	Mod-3	5,013	B	7,2

Sonuçlardan anlaşıldığı üzere, tez kapsamında incelenen binalar için hazırlanan sonlu eleman modelinde güncelleme işlemleri, C30 beton mekanik özelliklerinde ve dolgu duvar rijitliğinin 8.000 MPa olarak seçilmesiyle sağlanmıştır. TBDY-2018’de 2.000 MPa olarak önerilen tuğla duvar elastisite modülünden 4 kat fazla bir değerle güncel bir sonlu eleman modeli oluşturulmuştur.

Yapılan çalışmaların ışığında, tez kapsamında incelenen binalar için hazırlanan sonlu eleman modelinde daha önce bahsedilen deneysel çalışmalarda da belirtildiği gibi standart açıklıklı bir çerçevede dolgu duvarların çerçeve rijitliğine katkılarının 10-50 kat arasında değişkenlik gösterdiği belirtilmiştir (Okuyucu, 2011). Bununla beraber bir başka dolgu duvarların yapı davranışına etkilerinin araştırıldığı çalışmada ise duvarlar, yapıların çıplak çerçeve konumundaki periyodunu %50-%70 arasında azalttığını ve dolgu duvar rijitliğini 2-4 kat artırabildiği gözlemlenmiştir (Bayülke, 2003).

Ek olarak tuğla duvar elastisite modülü 8.000 MPa ile kalibre edilmiş sonlu eleman modeli üzerinde; hareketli yük tanımlamaları yapıldıktan sonra hesaplanan modal analiz sonuçları ile binanın tasarımda esas alınan STA4CAD modal analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.41’de de görüldüğü gibi, OMA sonuçları üzerinden kalibre edilen B2 modeli üzerinde hesaplanan frekans değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu sonuçlara göre binaların gerçekteki durumunun, tasarım halindeki daha rijit olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Statik Hesap Raporu, 2013).

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Çizelge 4.41. Kalibre Edilmiş B2 Model Üzerinde Hesaplanan Teorik Modal Analiz, Tasarıma Esas Modele Göre Modal Analiz Kıyaslaması

STA4CAD'e Göre Modal Analiz Sonuçları			Kalibre Edilmiş B2 - Sonlu Eleman Modeline Göre Modal Analiz Sonuçları	
Mod No	Frekans (Hz)	Mod Şekli	Frekans (Hz)	Mod Şekli
1	2,301	X Yönü Yatay Öteleme	2,985	X Yönü Yatay Öteleme
2	2,599	Y Yönü Yatay Öteleme	3,221	Y Yönü Yatay Öteleme
3	2,774	Düşey Z Eksen Etrafında Yatay Burulma	4,666	Düşey Z Eksen Etrafında Yatay Burulma

Bu sonucu destekler benzer bir davranışın, (Boru ve Kutanis, 2015) çalışmasında belirlendiği görülmektedir. Çalışmada, 17 Ağustos 1999 depreminde hasar almamış ve 1975 deprem yönetmeliğine göre tasarlanmış zemin+5 katlı betonarme bir yapı üzerinde OMA ve devamında sonlu eleman modeli güncelleme çalışması yapılmıştır. Deneysel dinamik davranış parametrelerinin, sonlu eleman modeli üzerinde hesaplanabilmesi için beton elastik modülü değiştirilmek suretiyle model kalibrasyonu yapıldığı ve bu çalışmada birinci mod şekli için kabul edilebilir farkla benzerlik elde edildiği ifade edilmektedir. Yapının gerçekten, tasarlanandan daha rijit bir davranış gösterdiği sonucunun altı çizilerek farklı yöntemlerle sonlu eleman modeli güncelleme çalışmasının yapılarak dikkate alınan tüm mod şekilleri için tutarlılık çalışmaları yapılması gerektiği sonucu paylaşılmıştır.

Buna benzer bir başka uygulama ise, (Yetkin, vd., 2016) çalışmasında yapılmıştır. Bodrum+5 kat olarak inşa edilen betonarme bir yapı üzerinde inşaat devam ederken, dolgu duvar imalatının bitiminin ardından OMA çalışması yapılmış ve elde edilen sonuçlar kullanılarak sonlu eleman modeli güncellenmiştir. Uygulamada dolgu duvarlar 2007 Deprem Yönetmeliği'nde sunulan kurallara uygun olarak eşdeğer basınç çubukları ile modele yansıtılmış, beton elastisite modülü değiştirilmek suretiyle teorik model OMA sonuçlarına yakın sonuçlar elde edilecek şekilde kalibre edilmiştir. Bu tez kapsamında elde edilen sonucu destekler nitelikte; (Yetkin, vd., 2016) çalışmasında da incelenen betonarme yapının tasarlanandan daha rijit olacak şekilde imal edildiği sonucu paylaşılmıştır.

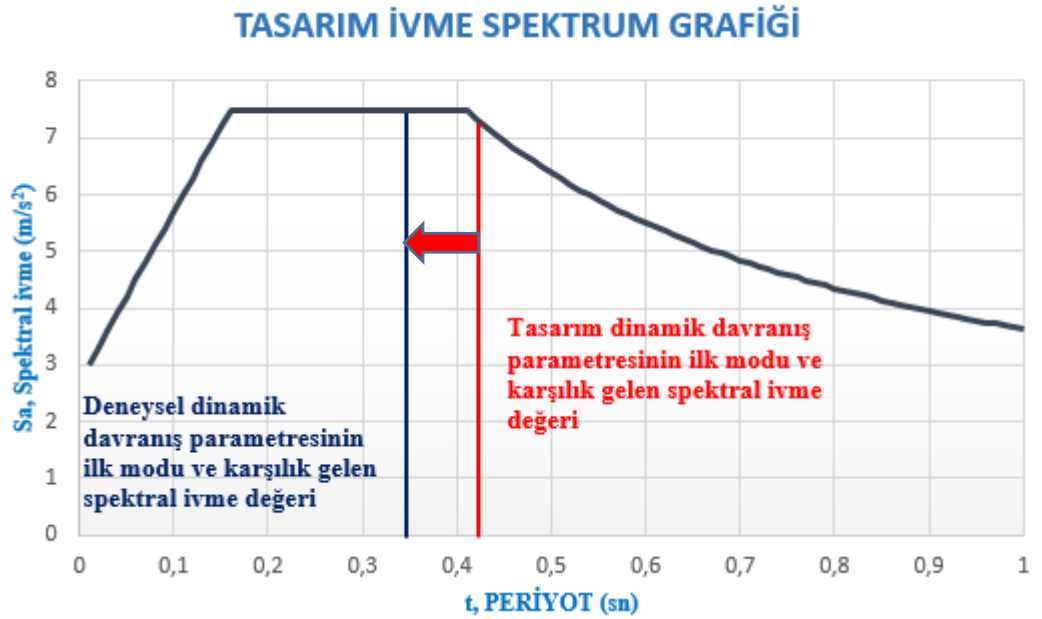
İrdelenen bu durumların sonucu olarak deneysel olarak hesaplanmış dinamik davranış parametreleri; binanın yatay yükler etkisi altında tasarımında öngörülene göre

daha rijit olduğunu göstermiştir. Bu durum EK-1’de detayları sunulan spektral ivme grafiğinde daha net bir şekilde irdelenmiştir.

Şekil 4.8’de görülen spektral ivme grafiğinde; koyu mavi çizgi, deneysel çalışmalar sonunda kalibre edilmiş sonlu eleman modelinden elde edilen ilk periyot değerinin (T_1) spektral ivme grafiğindeki yerinin gösterimidir.

Kırmızı çizgi ise, tasarım aşamasında STA4CAD yazılımında hesaplanmış olan teorik dinamik davranış parametrelerinde belirtilen ilk moda ait periyot değerinin (T_1) spektral ivme grafiğindeki yerinin gösterimidir.

Bu grafikten de görüldüğü üzere deneysel çalışmalar sonucu kalibre edilmiş modele ait yapı dinamik davranış parametreleri, yapıyı, ivme spektrum grafiğinde sol tarafa çekmektedir. Yani yapıya etki eden spektral ivme maksimum değere yükselmektedir.



Şekil 4.8. Bina Tasarımında Kullanılan Spektral İvme Grafiği

Tasarım ivme spektrum grafiğinden alınan sonuçlar Çizelge 4.42’de sunulmuştur. Çizelge 4.42’den de anlaşılacağı üzere STA4CAD yazılımında hesaplanan birinci teorik periyot değerine karşılık gelen spektral ivme değeri, kalibre edilmiş modelin ilk periyot değerine karşılık gelen spektral ivme değerinden küçüktür. Ayrıca kalibre edilmiş modelin periyot değerine karşılık gelen spektral ivme değeri, spektrumun maksimum değeridir (Statik Hesap Raporu, 2013).

Çizelge 4.42. İncelenen Modellerde Periyot Değerlerine Karşılık Gelen Spektral İvme Değerleri

STA4CAD			SAP2000			Fark (%)
T ₁ (sn.)	f ₁ (Hz)	Sa ₁ (m/s ²)	T ₁ (sn.)	f ₁ (Hz)	Sa ₁ (m/s ²)	
0,43	2,301	7,10	0,33	2,985	7,50	5,6

Çizelge 4.42'deki sonuçlar değerlendirildiğinde ilk olarak yapıya etki edecek ivmedeki artış görülmüştür. Bu durum yapıya etki edecek yeni taban kesme kuvvetlerini ve kapasite hesaplarını akıllara getirmiştir. Bununla birlikte statik hesap raporundan elde edilmiş kesme kuvveti kapasite hesaplarının da C25 sınıfı beton için yapıldığı ve uygulamada dayanımın C30 olarak gerçekleştiği bilinmektedir. Çok genel bir yaklaşımla bu beton dayanım artışının, taşıyıcı elemanların kesme kuvveti taşıma kapasitesini az da olsa artırdığı ifade edilebilir. (TS500, 2000) uyarınca betonarme kesitlerin kesme kuvveti taşıma kapasite hesabında beton tasarım çekme dayanımı kullanılmaktadır. Bu parametre; kesitte beton tarafından taşınacak kuvvet hesabında $0.65f_{ctd}$ değerinde hesaba katılmaktadır. (TS500, 2000) hesap kuralları gereği f_{ctd} değeri C25 için 1.17 MPa ve C30 için 1.28 MPa'dır ve bu durumda imal edilen yapıda kullanılan beton çekme dayanımı tasarıma nazaran %9.5 oranında artmıştır. Bir adım daha ileri gidildiğinde; C30 sınıfı betonun yerinde tayin edilen net değer olduğu biliniyorsa; tasarım dayanımı hesaplarken malzeme katsayısına bölme zorunluluğu olmadığı kabul edilebilir. Zira, tasarım aşamasında malzeme katsayılarının kullanılmasının amacı imalatla muhtelif nedenlerle hedeflenen dayanımın altında kalınmasına karşı önlem alınmasıdır. Burada, yapı inşasında kullanılan beton dayanımının net olarak 30 MPa olduğu, hatta farklı zamanlarda dökülen katlar arasında beton dayanımı farkı olmadığı, tayin edilmiştir. Bu durumda, imalatla elde edilen beton çekme dayanımının (malzeme katsayısına bölünmeksizin) 1.92 MPa olduğunu ifade etmek mümkündür. Bu değer üzerinden; tasarımda öngörülen ve kesme kapasitesi hesabında kullanılan beton çekme dayanımında %64.3 oranında artış olduğu söylenebilir. Bu bilgi toparlandığında, statik hesap raporundan alınan kesme kuvveti kapasitelerinin imalatın C30 sınıfı beton ile gerçekleşmiş olması nedeniyle bu değerlerden daha fazla olduğunu söylemek mümkündür. Bu durumda inceleme altındaki yapıların depremde maruz kalmaları beklenen deprem kuvvetlerinde artış olacağı düşünülmüş olsa da; bu durumun güncel kapasite hesapları ile yeniden değerlendirilip; herhangi bir yapısal deprem güvensizliğinin olup olmadığı kontrol edilmelidir.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Tez çalışması kapsamında tip projede üretilmiş 2 adet betonarme bina için yapım kalitesi kontrollerinin tahribatsız deneysel yöntemlerle gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Bu araştırma kapsamında materyal olarak seçilen betonarme binalara araştırma yöntemi olarak teorik ve OMA yöntemleri kullanılmıştır. Çıkış noktası, yapıda herhangi bir tahribat oluşturmaksızın yapım pratiklerinin OMA yöntemi ile kontrollerinin sağlanabilmesidir. Çalışma boyunca incelenen binalar Erzurum Teknik Üniversitesi lojmanlarının 8. ve 9. bloklarıdır. Çalışmada OMA yöntemi kullanılarak binaların farklı yapım aşamalarındaki dinamik davranış parametreleri belirlenmiştir. Ek olarak beton malzemenin de yapım kontrolünün sağlanması adına tahribatsız dayanım belirleme deneyleri de yapılmıştır. Araştırma sonucunda varılan sonuçlar ve öneriler aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir.

- Laboratuvar kırım sonuçları ile tahribatsız Schmidt Sertlik Çekici ve Ultra Ses Yöntemi uygulamalarından elde edilen basınç dayanımı sonuçlarının örtüştüğü görülmüştür. Bu yöntemlerin, imalat aşamasında kalite kontrolü amacıyla kullanılabileceği düşünülmektedir.
- Tasarım aşamasında C25 olarak seçilmiş beton malzeme dayanımının, sahada her iki bina için de C30 olarak gerçekleştiği tespit edilmiştir. Beton malzeme sınıfının her iki bina için aynı olduğu, katlar arası malzeme dayanımı farkının olmadığı belirlenmiştir. Bu durumda; beton yapı malzemesi kalitesinin her iki bina için aynı olduğu sonucuna varılmıştır.
- Yapılan OMA çalışmaları sonucunda elde edilen dinamik davranış parametreleri, teorik modal analiz sonuçları ile %90 uyumluluk göstermiştir. Bu durumun sonucu olarak binalardaki beton dökümünün ve beton bakımının, kurallara uygun bir şekilde yapılmış olduğu düşünülmektedir. Ek olarak bina davranışına belirgin bir katkısı olan dolgu duvar imalatının başarılı bir şekilde yapıldığı düşünülmektedir.
- OMA sonuçlarına bağlı olarak yapılan sonlu eleman modellerinin güncellenmesinin sonucu olarak dolgu duvar malzemesinin elastisite modülü değerinin, TBDY-2018'e göre belirlenen değerden 4 kat daha fazla değer aldığı tespit edilmiştir.
- Elde edilen deneysel periyotların binanın tasarımının yapıldığı teorik periyot değerlerinden ortalama %40 daha düşük olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Buna ek olarak deneysel sonuçlar spektral ivmenin yaklaşık %5, taban kesme kuvvetinin yaklaşık %7

arttığını da göstermiştir. Bu durumda yapıda yeniden bir deprem analizi yapılması gerekliliğini düşündürmüştür.

- Sonlu eleman modeli oluşturulması aşamasında, zemin etüt raporunun dikkatle incelenmesi ve zemin yatak katsayısı dikkate alınarak temel modellemesi yapılması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu sonuç, araştırma konusu olan yapılar için, teorik ve OMA sonuçları ile desteklenmiştir.
- Tip proje üzerinden imal edilen betonarme binalar üzerinde gerçekleştirilen OMA çalışması neticesinde elde edilen dinamik davranış parametreleri; yapıların her iki dolgu duvar durumu için oldukça yakın sonuçlar içermektedir. Bu durum, yüklenici firmanın saha çalışmalarında her iki yapı için aynı kalitede imalat yaptığı değerlendirilmesinin yapılmasını sağlamıştır. Ülkemizde yoğun olarak yürütülen kentsel dönüşüm uygulamaları dâhilinde tip proje üzerinden üretilen toplu konut yapıları, vb. uygulamalarda OMA yöntemiyle elde edilecek modal davranış parametrelerinin karşılaştırılmasının bir yapım kalitesi kontrolü yöntemi olabileceği düşünülmektedir.
- Ülkemiz mevzuatlarında betonarme binaların imalatlarındaki “Yapı Denetim” kontrol mekanizmalarının nihai bina kabul aşamalarından birisinin de OMA yöntemiyle dinamik davranış parametrelerinin kontrolü olması önerilebilir.
- Çok katlı betonarme bir yapıda, OMA yöntemi ile modal davranış parametreleri deneysel olarak belirlenirken teorik modal analize uygun şekilde sensör yerleşim planı oluşturulması gerekmektedir. Binanın dinamik davranış parametrelerinin belirlenmesi için gereken titreşim ölçümlerini almak için sınırlı sayıda ivmeölçerle çoklu kat kurulumu yapılarak referans sensör yöntemi kullanılması önerilmektedir.
- İncelenen binaların teorik ve OMA sonuçları, genel olarak, dolgu duvarların yapı modal davranışı üzerindeki etkisini gösterir niteliktedir. Dolgu duvarlar, yanal rijitliği artırmakta ve modal davranış parametrelerini değiştirmektedir. Bu durumda, dolgu duvarların yapısal analiz aşamasında dikkate alınması önerilmektedir.
- Üzerinde tasarıma esas yapısal analizlerin gerçekleştirileceği sonlu eleman modellerinde dolgu duvarların, kütle ve rijitlik etkisinin “alan elemanlar” kullanılarak tanımlanabileceği sonucuna ulaşılmıştır.
- OMA çalışması esnasında bina titreşim kayıtları alınırken kablosuz ölçüm cihazlarından oluşan sistemlerin kullanım kolaylığı olduğu deneyimlenmiştir. Kablolu ivmeölçer sensörlerle titreşim kaydı yapılması durumunda, özellikle ~15 m

ve daha uzun kablolar kullanıldığında kablo kalitesi ve sağlığının ölçümü doğrudan etkilediği görülmüştür.

- Yapım aşamalarındaki binalar nispeten daha az deprem yükü alacak olsa da; dolgu duvar imalatı yarıda kalmış yapılarda yumuşak kat düzensizliği olduğu OMA çalışmaları neticesinde bariz bir şekilde görülmüştür. Bu durumda, bu tür yapıların inşaat sezonuna ara verilen dönem öncesi dolgu duvar imalatlarının tamamlanması ya da tamamlanamayacaksa imalata hiç başlanmaması önerisi sunulabilmektedir.

Tez çalışması neticesinde, tahribatsız bir yöntem olan OMA uygulaması ile betonarme yapılarda yapım kalitesi ve statik proje kontrolü yapılabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Bununla birlikte, bu tür uygulamaların sayısının artması ile yöntemin teknik olarak olgunlaşacağı açıktır. Bu alanda, daha fazla çalışma yapılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- AFPS-90, 1990. Recommendations for the Redaction of Rules Relative to the Structures and Installations Built in Regions Prone to Earthquakes, French Association of Earthquake Engineering, Paris, France.
- Algerian Seismic Code, 1988. Algerian Earthquake Resistant Regulations, Ministry of Town planning and Construction, Algiers, Algeria
- Allemang, R.J., 2003. The modal assurance criterion–twenty years of use and abuse, Sound and vibration, 37.8: 14-23.
- Altunışık, A.C., 2010. Karayolu Köprülerinin Yapısal Davranışlarının Analitik ve Deneyisel Yöntemlerle Belirlenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 218, Trabzon
- Altunışık, A.C., Karahasan, O.Ş., Genç, A.F., Okur, F.Y., Günaydın, M., Kalkan, E., Adanur, S. 2018. Modal parameter identification of RC frame under undamaged, damaged, repaired and strengthened conditions, Measurement 124, 260–276.
- Anonim, 2013. Erzurum İli, Yakutiye İlçesi, İstasyon Mahallesi, Erzurum Teknik Üniversitesi Lojman İnşaat Alanı Zemin ve Temel Etüt Raporu. Murat Şimşek Mühendislik
- Anonim, 2019. Web Sitesi: www.tdg.com.tr/tr/urunler/4/e-quake, Erişim tarihi: 09.10.2019
- Anonim, 2019. Web Sitesi: www.tdg.com.tr/tr/urun/8/testbox2010?category_id=3, Erişim tarihi: 09.10.2019
- Anonim, 2019. Web Sitesi: http://www.tdg.com.tr/tr/urun/13/sensebox702x-703x-?category_id=8, Erişim tarihi: 09.10.2019
- Anonim, 2019. Web Sitesi: www.tdg.com.tr/tr/urun/8/testbox2010?category_id=3, Erişim tarihi: 09.10.2019
- Anonim, 2019. Web Sitesi: <https://www.erzurum.bel.tr/ebb-kentsel-mic/4/5027/9059.html> Erişim tarihi: 25.06.2019

Anonim, 2019. Web Sitesi: <http://blog.dta.com.tr/tag/modal-analiz/>, Erişim tarihi: 25.06.2019

Anonim, 2019. Web Sitesi: <https://insapedia.com/turkiye-bina-deprem-yonetmeligi-b1-komsu-katlar-arasi-dayanim-duzensizligi-zayif-kat/>, Erişim tarihi: 25.06.2019

Anonim, 2019. Web Sitesi: <http://www.betonvecimento.com/betonarme-yapilar/deprem/depreme-karsi-12-altin-kural>, Erişim tarihi: 04.07.2019

Anonim, 2019. Web Sitesi: <https://insapedia.com/kisa-kolon-nedir-nasil-olusur-ne-onlem-alinir/>, Erişim tarihi: 04.07.2019

Anonim, 2019. Web Sitesi: <https://www.accuweather.com/tr/tr/erzurum/317825/month/317825?monyr=1/01/2019> Erişim Tarihi: 15.07.2019

Anonim, 2019. Web Sitesi: <https://www.accuweather.com/tr/tr/erzurum/317825/may-weather/317825?monyr=5/1/2019> Erişim Tarihi: 15.07.2019

Anonim, 2019. Web Sitesi: <https://www.accuweather.com/tr/tr/erzurum/317825/month/317825?monyr=6/01/2019> Erişim Tarihi: 15.07.2019

Anonim, 2019. Web Sitesi: http://www.svibs.com/resources/ARTEMIS_Modal_Help/Generic%0Modal%20Assurance%20Criterion%20Window.html. Erişim tarihi: 09.10.2019

Anonim, 2019. Web Sitesi: <https://tdth.afad.gov.tr/TDTH/main.xhtml> Erişim Tarihi: 10.09.2019

Anonim, 2019. Web Sitesi: <http://www.erzurumhaber25.com/haber/erzurum-deprem-riskiartan-6-il-arasinda-8130.html> Erişim Tarihi: 09.09.2019

Anonim, 2019. Web Sitesi: <https://www.serdarkorkut.com/2017/05/16/modal-analiz-nedir-nede-n-onemlidir/> Erişim Tarihi: 09.08.2019

Anonim, 2019. Web Sitesi: <https://www.accuweather.com/tr/tr/erzurum/317825/june-weather/317825?year=2019> Erişim Tarihi: 09.08.2019

- Artemis Modal Pro v5.0, Operasyonel Modal Analiz Yazılımı, Erzurum Teknik Üniversitesi, 2020.
- Asgarian, A., McClure, F. 2017. Using ambient vibration measurements to generate experimental floor response spectra and inter-story drift curves of Reinforced Concrete (RC) buildings, *Procedia Engineering* 199, 92–97.
- Aydın, F. Sarıbıyık, M. 2010. Correlation between Schmidt Hammer and destructive compressions testing for concretes in existing buildings, *Scientific Research and Essays*, Vol. 5(13), pp. 1644-1648.
- Bakır, P.G., Şafak, E., Ekşioğlu, E.M. 2011. Gerçek zamanlı sistem tanıma teknikleri ve sonlu eleman modeli güncellemesi yöntemleriyle mevcut binalarda hasar belirlenmesi, 107M573 Nolu Tübitak Projesi.
- Baradan, B., Türkel, S., Yazıcı, H. 2012. Beton. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, 824, İzmir.
- Başka, M. A. 2006. Betonun Basınç Dayanımının Belirlenmesi ve Değerlendirilmesi, Yüksek lisans tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, 103, Erzurum.
- Başpolat, E., Bayraktar, A., Başağa, H.B., ve Türker, T., 2013. Deriner Beton Kemer Barajının Deneysel Dinamik Özelliklerinin Belirlenmesi, 2. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, ss.1-10, Hatay.
- Bayraktar, A., Türker, T., Altunışık, A.C., Sevim, B. 2010. Evaluation of blast effects on reinforced concrete buildings considering Operational Modal Analysis results, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30, 310–319.
- Bayraktar, A., Türker, T., Altunışık, A.C., Sevim, B. ve Özcan M. 2010. Binaların dinamik parametrelerinin operasyonel modal analiz yöntemiyle belirlenmesi, *İMO Teknik Dergi*, pp. 5185-5205
- Bayraktar, A., Türker, T., Özcan, M., Akköse, M., Adanur, S., Ateş, Ş. 2009. Yapısal hasarların deneysel ve operasyonel modal analiz yöntemleriyle belirlenmesi proje no : 106m038.

- Bayülke, N., 2003. Betonarme Yapının Dolgu Duvarı, TMH – Türkiye Mühendislik Haberleri, 4(326), 85-98.
- Beskyroun, S., Navabian, N., Wotherspoon, L., Ma, Q., 2019. Dynamic Behaviour of a 13-Story Reinforced Concrete Building Under Ambient Vibration, Forced Vibration, and Earthquake Excitation, Journal of Building Engineering, doi: <https://doi.org/10.1016/j.job.2019.101066>.
- Bingöl, Ş. 2013. Beton Basınç Dayanımının Birleştirilmiş Tahribatsız Yöntemlerle Belirlenmesi, Yüksek Lisan Tezi, Gümüşhane Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 84, Gümüşhane.
- Birinci, F. 2010. Taş Kemer Köprülerin Sonlu Eleman Modellerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 100, Trabzon.
- Boru, E. O., Kutanis, M. 2015. Çevrel Titreşim Kayıtları Kullanılarak Yapı Dinamik Parametrelerinin Belirlenmesi, SAÜ Fen Bil Dergisi, 19(1), 59-66.
- Breysse, D. 2012. Non-destructive evaluation of concrete strength: An historical review and a new perspective by combining NDT methods, Construction and Building Materials, Volume 33, P 139-163.
- Brincker, R., Andersen, P., & Zhang, 2000. Modal Identification From Ambient Responses Using Frequency Domain Decomposition. Paper presented at the 18th International Modal Analysis Conference (XVIII IMAC), 7-10 February 2000, San Antonio, Texas.
- Bru D, Reynau R, Baeza FJ, Ivorra S. 2018. Structural damage evaluation of industrial masonry chimneys. Mater. Struct. vol51, 34.
- Celep, Z. 2014. Yapı Dinamiği. Beta Basım Yayım, 477, Türkiye.
- Chauhan, S., 2008. Parameter Estimation and Signal Processing Techniques for Operational Modal Analysis, PhD Dissertation, University of Cincinnati, 256 Ohio, USA.

- Chauhan, S., 2008. Parameter Estimation and Signal Processing Techniques for Operational Modal Analysis, PhD Dissertation, University of Cincinnati, Ohio, USA.
- Choi, S., Park, S., Hyun, C.H., Kim, M.S., and Choi, K.R., 2010. Modal Parameter Identification Of A Containment Using Ambient Vibration Measurements, Nuclear Engineering and Design, 240, pp.453-460.
- Compán V, Pachón P, Cámara M, Lourenço PB, Sáez A. Structural safety assessment of geometrically complex masonry vaults by non-linear analysis. The Chapel of the Würzburg Residence (Germany). Eng Struct 2017;140:1–13.
- Cunha, A., Caetano, E., Brincker, R., Andersen, P. 2004. Identification from the Natural Response of Vasco da Gama Bridge, Proc. 22nd Int. Modal Analysis Conference, Deaborn, USA.
- Çakıroğlu, M., Erenoğlu, E., Kasap, S., Ekiz, Y. 2011. Çelik Lif Katkılı Betonların Tahribatsız Deney Yöntemleriyle Elde Edilen Basınç Dayanımının ANFİS Metoduyla Tahmini, Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi , 3 (3) , 14-22 .
- Çayiroğlu, İ. 2012, Mekanizma Tekniği Temel Kavramlar Ders Notu, Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği.
- Çelik, M, Aykan, M. 2004. Tank Namlusunun Operasyonel Modal ve Deplasman Analizi. Makina Tasarım ve İmalat Dergisi, 6 (1), 50-57.
- Demirtaş, A, Bayraktar, M. 2019. Free Vibration Analysis Of An Aircraft Wing By Considering As A Cantilever Beam. Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim Ve Teknoloji Dergisi, 7 (1), 12-21.
- Demirtaş, B., 2014. Çok Katlı Betonarme Binaların Deneysel Dinamik Karakteristiklerinin ve Yakın Fay Yer Hareketi Etkisindeki İzolatörlü Davranışlarının Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY), 2007. T.C. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara.

- Dönmez, C, Karakan, E. 2009. Köprülerde Deneysel Modal Analiz Uygulamaları. Teknik Dergi, 20 (99), 4851-4863.
- El-Borgi, S., Smaoui, H., Cherif, F., Bahlous, S., Gharairi, A., 2004, Modal Identification and Finite Element Model Updating of a Reinforced Concrete Bridge, Emirates Journal for Engineering Research, Vol. 1, No. 1, 83-101
- Erdal, M., Şimşek, O. 2003. Betonun Kalite Kontrolünde İleri Teknoloji Kullanımı, 3RD International Advanced Technologies Symposium, 18-20 Ağustos, Gazi Üniversitesi, Özetler Kitabı, 65-73 Ankara.
- Ergün, A., Kürklü, G. 2005. Mevcut Betonarme Yapılarda Beton Dayanımının Belirlenmesi, Kocaeli 2005 Deprem Sempozyumu, 23 - 25 Mart, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli.
- European Committee of Standardization, 2003. Euro code 8: Design of Structures for Earthquake Resistance-Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings, preen 1998-1, Brussels, Belgium.
- Foti, D., Diaferio M., Gianoccaro N.I. and Mongelli M., 2012. Ambient vibration testing, dynamic identification and model updating of a historic tower. NDT&E International, 47, 88-95.
- Gara, F., Regni, M., Carbonari, S., Balducci, A., Dezi, L. Dynamic behaviour of a retrofitted school building subjected to the after-shock sequence of the 2016 Central Italy earthquake, Procedia Engineering 199, 2084–2089.
- Gargaro, D., Rainieri, C., Fabbrocino, G. 2017. Structural and seismic monitoring of the “Cardarelli” Hospital in Campobasso, Procedia Engineering 199, 936–941.
- Garip, Z. Ş., Eren, E., Erdem, F., Bozdoğan, M. N. 2017. Deprem Etkisindeki Betonarme Binalarda Yumuşak Kat Düzensizliğine Perde Duvar Etkisi, 5th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science, 29-30 September, Bakü – Azerbaijan.

- Grosel, J., Sawicki, W., Pakos, W. 2014. Application of Classical and Operational Modal Analysis for Examination of Engineering Structures, *Procedia Engineering* 91, 136 – 141.
- Güçlüer, K., Günaydın, O., Tekin, Ö., Şahan, M. (2017). Farklı Tipte Agregasyonunun Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisinin Araştırılması, *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6 (1) , 107-114 .
- Heerah, A.R.P., 2009. Field Investigation of Fundamental Frequency of Bridges Using Ambient Vibration Measurements, Master of Engineering Thesis, McGill University, 148, Montreal, Canada.
- Jacobsen, N.J., Andersen, P. 2008. Operational Modal Analysis on Structures with Rotating Parts, International Conference on Noise and Vibration Engineering (ISMA), 15-17 September, Book of Proceedings, Vol 1, 2491-2506, Heverlee Belgium.
- Jacobsen, N.J., Andersen, P. ve Brincker, R., 2006. Using Enhanced Frequency Domain Decomposition as a Robust Technique to Harmonic Excitation in Operational Modal Analysis, *Proceedings of ISMA2006: International Conference on Noise and Vibration Engineering*, Leuven, Belgium.
- Kaplan, S. A., 2008. Dolgu Duvarların Betonarme Taşıyıcı Sistem Performansına Etkisi, *TMH – Türkiye Mühendislik Haberleri*, 6(452), 49-62.
- Kheder, G. F. 1999. A two stage procedure for assessment of in situ concrete strength using combined non-destructive testing, *Materials and Structures*, 32, 410-417.
- Kömür, M, Deneme, İ, Yerli, H. 2016. Düzlem Çelik Çerçeve Sistemlerin Operasyonel Modal Analizi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 30 (2), 73-80.
- L.J. Sánchez-Aparicio, L.F. Ramos, J. Sena-Cruz, J.O. Barros, B. Riveiro, Experimental and numerical approaches for structural assessment in new footbridge designs (SFRSCC–GFPR hybrid structure), *Compos. Struct.*134. (2015) 95–105,

- Leshchinsky, A.M. 1992. Non-destructive testing of concrete strength: statistical control, *Materials and Structures*, Volume 25, Issue 2, pp 70–78.
- Lewis, R., and Wrisley, D. 1950. A System for the Excitation of Pure Natural Modes of Complex Structures, *J. Aeronautical Sci.*, Vol.17, No. 11, pp. 705-722.
- Li, Q.S., Wu, J.R., Liang, S.G., Xiao, Y.Q., ve Wong, C.K., 2004. Full-Scale Measurements and Numerical Evaluation of Wind-Induced Vibration of a 63-Story Reinforced Concrete Tall Building, *Engineering Structures*, 26, 12, 1779-1794.
- López, J.J.O., Reyes, L.V., Vera, C.O. 2017. Structural health assessment of a R/C building in the coastal area of Concepción, Chile, *Procedia Engineering* 199, 2214–2219.
- M. Link. 1993. Updating of analytical models-procedures and experience, in: proceedings of the Conference on Modern Practice in Stress and Vibration Analysis, Sheffield Academic Press, pp 35–52.
- Naffa, S. O., Goueygou, M., Piwakowski B., Buyle-Bodin, F. 2002. Detection of chemical damage in concrete using ultrasound, *Ultrasonics* 40, 247–251.
- Nigbor RL. Full-scale ambient vibration measurements of the Golden Gate suspension bridge _ instrumentation and data acquisition. In: 8WCEE, vol. 6. 1984.
- NSCP, 1992. National Structural Code of Philippines, Vol. 1, Fourth Edition, The Board of Civil Eng. of the Professional Reg. Commission, Manila, Philippines
- Okuyucu, D. 2011. Effects Of Frame Aspect Ratio On The Seismic Performance Improvement Of Panel Strengthening Technique, PhD Thesis, Middle East Technical University, The Graduate School Of Natural And Applied Sciences, Civil Engineering, 384, Ankara.
- Öziçer, S., Uyanık, O.2017. Beton Dayanımının Yerinde P Dalga Hızından Belirlenmesi ve İzmir Örneği. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 9, 1-16
- Pastor, M., Binda, M., Harcarik, T. 2012. Modal Assurance Criterion, *Procedia Engineering*, Volume 48, Pages 543-548

- Pavic, A., Hartley, M. J., Waldron, P. 1998. Updating of the analytical models of two footbridges based on modal testing of full-scale structures, *Proceedings of Isma23*, Volume 3, pp. 1111–1118.
- Pınar, D., 2017. İvmeölçer Sinyallerinin İleri Yöntemlerle Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Başkent Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Polimeno, M.R., Roselli, I., Luprano, V.A.M., Mongelli, M., Tati, A., De Canio, G. 2018. A non-destructive testing methodology for damage assessment of reinforced concrete buildings after seismic events. *Engineering Structures*, 163(2018), 122-136.
- Qasrawi, H.Y. 2000. Concrete strength by combined nondestructive methods simply and reliably predicted, *Cement and Concrete Research*, Volume 30, Issue 5, Pages 739-746
- R. Brincker, C. Ventura, *Introduction to Operational Modal Analysis*, John Wiley & Sons Ltd, West Sussex, UK.
- R. Cantieni, “Experimental methods used in system identification of civil engineering structures,” *Proc. 1st Int. Operational Modal Analysis Conf.*, Copenhagen, Denmark, 2005, pp. 249-260.
- Ramos, J.L.F., 2007. Damage Identification on Masonry Structures Based on Vibration Signatures, PhD Thesis, Minho University, 378, Portugal.
- Rieger, N. F. 1986. The Relationship Between Finite Element Analysis and Modal Analysis. *New York : Journal of Sound & Vibration*, 20 , p. 16 (Jan.).
- Riskli Yapıların Tespit Edilmesine İlişkin Esaslar, 2019. T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara.
- Safak E, Celebi M. Recorded seismic response of Pacific Park Plaza. II: system identification. *J Struct Eng* 1992;118:1566–89.
- SAP2000 v19, Yapısal Analiz Yazılımı, Erzurum Teknik Üniversitesi, 2020.

- Shi, W., Shan, J. ve Lu, X., 2012. Modal identification of Shanghai World Financial Center both from Free and Ambient Vibration Response. *Engineering Structures*, 36, 14-26.
- SI-413, 1995. Design Provisions for Earthquake Resistance of Structures, The Standards Institution of Israel, Tel-Aviv, Israel.
- Soyoz, S., Taciroglu, E., Orakcal, K., Nigbor, R., Skolnik, D., Lus, H., and Safak, E., 2013. Ambient and Forced Vibration Testing of a Reinforced Concrete Building before and after Its Seismic Retrofitting, *J. Struct. Eng.* 139, SPECIAL ISSUE: Real-World Applications for Structural Identification and Health Monitoring Methodologies, 1741–1752.
- Statik Hesap Raporu, 2013. Erzurum Teknik Üniversitesi Lojmanlar Uygulama Projesi, Volkan Mühendislik Mimarlık İnşaat ve Ticaret LTD. ŞTİ, İstanbul.
- Şahin, Ö., Çağlar, N., Çelebi, E. 2017. Küçük Ölçekli Sarsma Tablası Test Modelleri için Uygun Ölçeklendirme Katsayısının Araştırılması, 5th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science, 29-30 September, Bakü – Azerbaijan.
- Şengezer, B.S. 1993. 13 Mart 1992 Erzincan Kentinde Meydana Gelen Hasarın Mahallelere Gore İrdelenmesi, 2. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 10-13 Mart 1993, İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, Bildiri Özetleri Kitabı, ÇDT-42, 395-403, İstanbul.
- TestLab, Operasyonel Modal Analiz Yazılımı, Erzurum Teknik Üniversitesi, 2020.
- Thibert, K., Ventura, C.E., Turek, M., ve Guerrero, S., 2007. Dynamic Soil-Structure Interaction Study of a Reinforced Concrete High-Rise Building. In *Procs. of the 2nd International Operational Modal Analysis Conference (IOMAC)*, Copenhagen, Denmark.
- TS 500, 2000. Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

- TÜİK, Ekonomik Göstergeler-2012, Türkiye İstatistik Kurumu, TÜİK Matbaası, ISBN 978-975-195632-3, Ankara
- Türker, T., 2005. Çelik Çerçeve Sistemlerin Dinamik Karakteristiklerinin Deneysel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 115, Trabzon.
- Türker, T., 2011. Çevresel Titreşim Verileri Kullanılarak Yapıların Hasar Durumlarının Tespiti ve Değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY), 2018, T.C. İçişleri Bakanlığı, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.
- Uçak, Ş., 2012. Tarihi Yığma Kubbelerin Dinamik Davranışlarının Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Ventura, C., Brinker, R., Dascotte, E., and Anderson, P., 2001. FEM Updating of the Heritage Court Building Structure, Proceedings of the 19th International Modal Analysis Conference, 324-330.
- Ventura, C.E. ve Thibert, K.M., 2007. Dynamic Properties of a 32-Storey Building Determined from Different Analysis Methods of Ambient Vibration Test Data. In Proceedings of The Second International Operational Modal Analysis Conference, Copenhagen, Denmark, 557-564.
- Ventura, C.E., Lord, J., Simpson, R.D. 2004. 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.
- Yanık, Y, Yılmaz, G.K., Türker, T. 2018. Betonarme Binalarda Hasar Tespiti ve Hasar Belirleme Yöntemleri. Journal of Investigations on Engineering and Technology, 1 (2), 30-36.

- Yeniceli, S.C. 2014. Hava Aracı Geliştirme Projelerinde Yer Titreşim Testi Süreci ve Önemi, V. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı, 8-10 Eylül 2014, Erciyes Üniversitesi, Kayseri
- Yetkin, M. 2016. Betonarme Yapıların Çevresel Titreşim Verileri Kullanılarak Dinamik Davranışlarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 68, Elazığ.
- Yetkin, M., Calayır, Y., Erkek, H. 2016. Çevresel Titreşim Verileri Kullanılarak Yapıların Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi Ve Sonlu Eleman Modellerinin Güncelleştirilmesi. Doğal Afet ve Afet Yönetimi Sempozyumu (DAAYS'16), 2-4 Mart 2016, Karabük, Türkiye
- Zhang, J., Maes, K., Roeck, G.D., Reynders, E., Lombaert, G. 2017. Experimental verification of optimal sensor placement for multi-setup modal testing, Procedia Engineering, 199, 1068–1073.
- Zhou, Y., Yi, W.J., 2008. Ambient Vibration Measurement And Earthquake Resistant Behavior Analysis on a Two tower Tall Building with Enlarged Base. The 14 th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China.
- Zhu, Y.C., Xie, Y.L. and Au S.K. 2018. Operational Modal Analysis of an eight-storey building with asynchronous data incorporating multiple setup. Engineering Structures, 165, 50-62.

EKLER

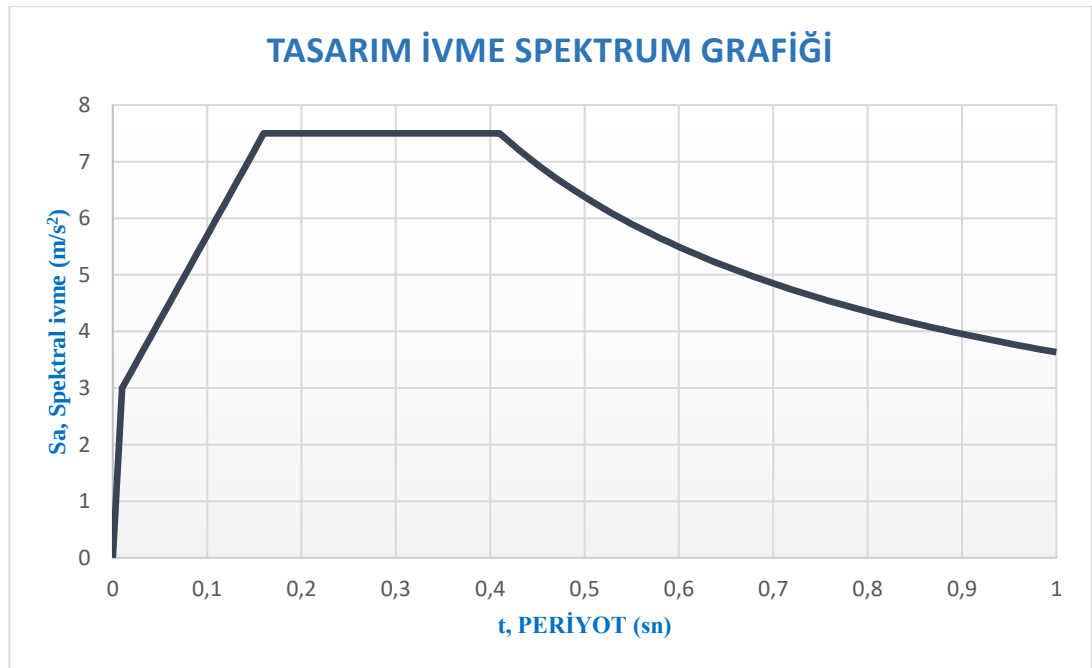
EK-1

t (sn.)	S (Spektrum Katsayısı)	A ₀ Etkin Yer İvme Katsayısı	I Bina Önem Katsayısı	Spektral İvme m/s ²
0,00	1,00	0,30	1	3,00
0,01	1,10	0,30	1	3,30
0,02	1,20	0,30	1	3,60
0,03	1,30	0,30	1	3,90
0,04	1,40	0,30	1	4,20
0,05	1,50	0,30	1	4,50
0,06	1,60	0,30	1	4,80
0,07	1,70	0,30	1	5,10
0,08	1,80	0,30	1	5,40
0,09	1,90	0,30	1	5,70
0,10	2,00	0,30	1	6,00
0,11	2,10	0,30	1	6,30
0,12	2,20	0,30	1	6,60
0,13	2,30	0,30	1	6,90
0,14	2,40	0,30	1	7,20
0,15	2,50	0,30	1	7,50
0,16	2,50	0,30	1	7,50
0,17	2,50	0,30	1	7,50
0,18	2,50	0,30	1	7,50
0,19	2,50	0,30	1	7,50
0,20	2,50	0,30	1	7,50
0,21	2,50	0,30	1	7,50
0,22	2,50	0,30	1	7,50
0,23	2,50	0,30	1	7,50
0,24	2,50	0,30	1	7,50
0,25	2,50	0,30	1	7,50
0,26	2,50	0,30	1	7,50
0,27	2,50	0,30	1	7,50
0,28	2,50	0,30	1	7,50
0,29	2,50	0,30	1	7,50
0,30	2,50	0,30	1	7,50
0,31	2,50	0,30	1	7,50
0,32	2,50	0,30	1	7,50
0,33	2,50	0,30	1	7,50
0,34	2,50	0,30	1	7,50
0,35	2,50	0,30	1	7,50
0,36	2,50	0,30	1	7,50

0,37	2,50	0,30	1	7,50
0,38	2,50	0,30	1	7,50
0,39	2,50	0,30	1	7,50
0,40	2,50	0,30	1	7,50
0,41	2,45	0,30	1	7,35
0,42	2,40	0,30	1	7,21
0,43	2,36	0,30	1	7,08
0,44	2,32	0,30	1	6,95
0,45	2,28	0,30	1	6,83
0,46	2,24	0,30	1	6,71
0,47	2,20	0,30	1	6,59
0,48	2,16	0,30	1	6,48
0,49	2,13	0,30	1	6,38
0,50	2,09	0,30	1	6,27
0,51	2,06	0,30	1	6,18
0,52	2,07	0,30	1	6,08
0,53	1,99	0,30	1	5,99
0,54	1,97	0,30	1	5,90
0,55	1,94	0,30	1	5,81
0,56	1,91	0,30	1	5,73
0,57	1,88	0,30	1	5,65
0,58	1,88	0,30	1	5,57
0,59	1,83	0,30	1	5,50
0,60	1,81	0,30	1	5,42
0,61	1,78	0,30	1	5,35
0,62	1,76	0,30	1	5,28
0,63	1,74	0,30	1	5,21
0,64	1,72	0,30	1	5,15
0,65	1,70	0,30	1	5,09
0,66	1,68	0,30	1	5,02
0,67	1,66	0,30	1	4,96
0,68	1,64	0,30	1	4,91
0,69	1,62	0,30	1	4,85
0,70	1,60	0,30	1	4,79
0,71	1,58	0,30	1	4,74
0,72	1,56	0,30	1	4,69
0,73	1,56	0,30	1	4,64
0,74	1,53	0,30	1	4,58
0,75	1,51	0,30	1	4,54
0,76	1,50	0,30	1	4,49
0,77	1,48	0,30	1	4,44
0,78	1,47	0,30	1	4,40
0,79	1,45	0,30	1	4,35
0,80	1,44	0,30	1	4,31
0,81	1,42	0,30	1	4,27

0,82	1,41	0,30	1	4,22
0,83	1,39	0,30	1	4,18
0,84	1,38	0,30	1	4,14
0,85	1,38	0,30	1	4,10
0,86	1,36	0,30	1	4,07
0,87	1,34	0,30	1	4,03
0,88	1,33	0,30	1	3,99
0,89	1,32	0,30	1	3,96
0,90	1,31	0,30	1	3,92
0,91	1,30	0,30	1	3,89
0,92	1,28	0,30	1	3,85
0,93	1,27	0,30	1	3,82
0,94	1,26	0,30	1	3,79
0,95	1,25	0,30	1	3,75
0,96	1,24	0,30	1	3,72
0,97	1,23	0,30	1	3,69
0,98	1,22	0,30	1	3,66
0,99	1,21	0,30	1	3,63
1,00	1,20	0,30	1	3,60

Not: Gri dolgulu alanda, Z2 zemin sınıfı için DBYBHY 2007 yönetmeliğinde belirlenmiş Spektrum Karakteristik Periyotlarının ve aralığının gösterimi yapılmıştır.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı-Soyadı : Gökçe Kaan SAVAŞ
Uyruğu : T.C.
Doğum Tarihi ve Yeri : 23.06.1995 – Niğde/Bor
Medeni Hali : Bekar
Telefon : +90541 946 00 51
e-mail : kaansavas4@gmail.com

Eğitim

Derece	Üniversite	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Erzurum Teknik Üniversitesi	2020
Lisans	Erzurum Teknik Üniversitesi	2017
Lise	Niğde Yavuz Sultan Selim Anadolu Lisesi	2013

Yayınlar

- Okuyucu, D., **Savaş, G., K.**, Gedik, B., Şuşarlıoğlu, M.F., Kara, T., “Sokaktan Tarama Yöntemiyle Binaların Bölgesel Deprem Risk Dağılımının Belirlenmesi: Erzurum – Yenişehir Örneği”, Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 30(1), 2018, 219-231.(ISBN: 1308-9072)
- Savaş, G., K.**, Gedik, B., Şuşarlıoğlu, M., F., Kara, T., ve Okuyucu, D., “Sokaktan Tarama Yöntemiyle Bina Risk Durumu Değerlendirmesi: Erzurum – Palandöken Bölgesi Uygulaması”, II. International Conference on Advanced Engineering Technologies, 21-23 Ekim 2017, Bayburt.
- Okuyucu, D., Kazaz, İ., Çodur, M., Y., Kocaman, İ., **Savaş, G., K.**, and Kara, T., “An Investigation on Effects of Traffic Induced Ground Vibrations on Historic Structures Examples of Erzurum Lala Mustafa Pasha Mosque and Yakutiye Madrasah”, 36th General Assembly of the European Seismological Commission, 2-7 Eylül 2018, Malta.
- Okuyucu, D., Kazaz, İ., Çodur, M., Y., Kocaman, İ., **Savaş, G., K.**, and Kara, T., “An Evaluation on Effects of High Level of sound on Historic Structures Examples of Erzurum Lala Mustafa Pasha Mosque And Yakutiye Madrasah”, 36th General Assembly of the European Seismological Commission, 2-7 Eylül 2018, Malta.
- Okuyucu, D., Kazaz, İ., Çodur, M., Y., Kocaman, İ., **Savaş, G., K.**, and Kara, T., “Gerçek Yapılar Üzerinde Deneysel Yapı Mekaniği Çalışmalarına Bir Örnek: TÜBİTAK1001 – 114M280” Ulusal Yapı Mekaniği Laboratuvarları 6. Toplantısı, 17-18 Kasım 2017, Trabzon.