

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÜÇLENDİRİLMİŞ BİR BETONARME YAPIDA YAPI
SAĞLIĞI İZLEME VERİLERİYLE ÖZGÜN DEPREM
DAVRANIŞLARININ ÇALIŞILMASI

HABİB FERHAT KURTAY
YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
DEPREM VE YAPI MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI

GEBZE
2022

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÜÇLENDİRİLMİŞ BİR BETONARME
YAPIDA YAPI SAĞLIĞI İZLEME
VERİLERİYLE ÖZGÜN DEPREM
DAVRANIŞLARININ ÇALIŞILMASI

HABİB FERHAT KURTAY
YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
DEPREM VE YAPI MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI

DANIŞMANI
DR. ÖĞR. ÜYESİ AHMET ANIL DİNDAR

GEBZE

2022

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

**ASSESSMENT OF DYNAMIC
CHARACTERISTICS OF A REINFORCED
CONCRETE BUILDING BY
STRUCTURAL HEALTH MONITORING
DATAS**

HABİB FERHAT KURTAY
**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE**
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
EARTHQUAKE AND STRUCTURAL ENGINEERING PROGRAMME

THESIS SUPERVISOR
ASSIST. PROF. DR. AHMET ANIL DİNDAR

GEBZE

2022



YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 13.01.2022 tarih ve 2022/03 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 21.01.2022 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Habib Ferhat KURTAY'ın tez çalışması İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Deprem ve Yapı Mühendisliği Programında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI)

: Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Anıl DİNDAR

ÜYE

: Dr. Öğr. Üyesi Ahu MUTLU

ÜYE

: Prof. Dr. Kemal BEYEN

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Bu çalışmada betonarme bir binanın güçlendirme işlemi öncesi ve sonrası meydana gelen depremlerden elde edilen ivme veri setlerinin yapı tanımlama algoritmaları kullanılarak dinamik karakteristikleri belirlenmektedir. Yapı sağlığı izleme metotlarıyla elde edilen verilerin yapı tanımlama algoritmalarıyla elde edilen sonuçlara göre, yapıdaki hasar mertebeleri ve güçlendirmenin işleminin yapıya etkisi hakkında değerlendirmeler yapılmaktadır. Bunun yanı sıra matematiksel model ile elde edilen dinamik karakteristikler, yapı tanımlama algoritmalarından elde edilen sonuçlara göre güncellenip, gerçeğe daha yakın sonuçlar elde edilmiştir. Böylece yapıda meydana gelen rijitlik değişimlerinden kaynaklanan yapının güncel dinamik karakteristikleri elde edilebilmektedir. Güncellenen yapı sistemlerinde deprem güvenlik analizleri gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yapısal Sağlık İzleme (YSİ), Operasyonel Modal Analiz (OMA), Deprem Güvenlik Analizi.

SUMMARY

In this work, the dynamic characteristics of a retrofitted concrete building are determined by using frequency domain decomposition methods of the acceleration data sets recorded during earthquakes that occurred before and after the seismic retrofitting. According to these results obtained as a result of the Operational Modal Analysis (OMA), damage levels in the structure and the effect of the seismic retrofitting has evaluated. Dynamic characteristics obtained with Theoretical Modal Analysis were updated according to the Operational Modal Analysis results. Thus, the current dynamic characteristics of the structure can be obtained due to the assumptions accepted at the design stage, errors in the manufacturing stage and existing structural damages in the structure. The demand/capacity ratio and displacement of modal updated models evaluated.

Key Words: Structural Health Monitoring (SHM), Operational Modal Analysis (OMA), Earthquake Safety Analysis.

TEŞEKKÜR

Başta bu çalışmanın ortaya çıkmasında yüksek lisans eğitimim süresince bana yol gösteren danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Anıl DİNDAR'a ve PRJ2713-SHM kapsamında birlikte grup çalışması yürüttüğümüz Dr. Öğr. Üyesi Ahu KÖMEÇ MUTLU, Samet AYSİN, Ahmet Furkan UĞUR ve Anıl ZAFER'e,

Beni bu çalışma alanına yönlendiren değerli meslektaşım İnş.Yük.Müh. Ahmet SERT'e, çalışma hayatımda desteğini esirgemeyen İnş. Müh. Ramazan AKKAYA'ya ve meslek hayatının henüz başında olan değerli iş arkadaşım İnş. Müh. Ümitcan Uygun'a

Hayatıma önemli tecrübeleri ile yön veren Abim Vahit Refik KURTAY'a ve beni daima destekleyen aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
TABLolar DİZİNİ	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1. Genel Bilgiler	1
1.2. Kapsam ve İçerik	2
1.3. Literatür Taraması	2
2. YAPILARIN GÜVENLİĞİNİN TESPİT EDİLMESİ İÇİN YAPI SAĞLIĞI YAKLAŞIMI	5
2.1. Hesaplama Yöntemi	5
2.2. Hesaplama Adımları	9
2.3. Yapı Güvenliği	12
2.4. Deprem Tehlikesi	14
2.5. Yapı Sağlığı İzleme Sistemleri	16
2.5.1. YSİ Sistemlerinin Gelişimi	16
2.5.2. YSİ Sistemlerinde Kullanılan Donanımlar	17
2.5.3. YSİ Sistemlerinde Sensör Yerleşimi ve Hesaplama Algoritması	18
2.5.4. Dünyadaki ve Ülkemizdeki Uygulamalar	20
2.6. Ülkemizdeki ve Dünyadaki Yönetmelikler	21
3. YÖNTEM	24
3.1. Mevcut Yapılarda YSİ ile Veri Analizi Yöntemleri	24
3.2. Sonlu Elemanlar Modelinin Güncellenmesi	25
3.3. MAC Tablosunun Elde Edilmesi	26
3.4. Operasyonel Modal Analiz	27

4. ANALİTİK ÇALIŞMA	29
4.1. Çalışılan Bina Hakkında Bilgiler	29
4.2. Binanın Yapısal Modeli	32
4.2.1. Mevcut Yapının Modeli ve Özellikleri	35
4.2.2. Güçlendirmiş Yapının Modeli ve Özellikleri	36
4.3. Kaydedilen Titreşim Verilerinin Açıklanması	37
4.3.1. Birinci Ölçüm	38
4.3.2. İkinci Ölçüm	39
4.3.3. Üçüncü Ölçüm	40
4.4. Yapının Titreşim Değerlerinin Elde Edilmesi	41
4.5. YSİ Ölçümlerin İstatistiksel Karşılaştırılması	43
4.5.1. Güçlendirilmemiş Yapının FEM ve SHM Sonuçları	43
4.5.2. Güçlendirilmiş Matematiksel Modelin Güncellenmesi	46
4.5.3. Güçlendirilmemiş Matematiksel Modelin Güncellenmesi	48
4.5.4. Güçlendirilmemiş Modelin Güncelleme Sonrası Bigbear (1992) Depreminde ZTA Değerlendirilmesi	50
4.5.5. Güçlendirilmemiş Modelin Güncelleme Sonrası Bigbear (1992) Depreminde EKO Değerlendirilmesi	52
4.5.6. Güçlendirilmemiş Modelin Güncelleme Sonrası Northridge (1994) Depreminde ZTA Değerlendirilmesi	54
4.5.7. Güçlendirilmemiş Modelin Güncelleme Sonrası Northridge (1994) Depreminde EKO Değerlendirilmesi	55
4.5.8. Güçlendirilmiş Matematiksel Modelin Güncellenmesi	58
4.5.9. Güçlendirilmiş Modelin Güncelleme Sonrası Encino (2014) Depreminde ZTA Değerlendirilmesi	59
4.5.10. Güçlendirilmiş Modelin Güncelleme Sonrası Encino (2014) Depreminde EKO Değerlendirilmesi	60
4.5.11. Etki Kapasite Oranlarının Değerlendirilmesi	63
4.5.12. Zaman Frekans Alanında Güç Yoğunlukları Grafiklerinin Değerlendirilmesi	64
5. SONUÇ ve ÖNERİLER	70
5.1. Sonuçlar	70
5.2. Öneriler	71

KAYNAKLAR	72
ÖZGEÇMİŞ	75
EKLER	76



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler ve Açıklamalar:

Kısaltmalar:

$\ddot{x}$	: İvme
$\dot{x}$	: Hız
x	: Deplasman
m	: Kütle
c	: Sönüm
k	: Rijitlik
R	: Dayanım Etkisi
F	: Yükleme Koşulları
g	: Yer çekimi ivmesi
Hz	: Hertz
Sn	: Saniye
MPa	: megapascal
Vs30	: En üst 30 m zemin için ortalama kayma dalga hızı
ASCE	: American Society of Civil Engineers
ASD	: Allowable Stress Design
CESMD	: Center of Engineering Strong Motion Data
CFDD	: Curve-fitting Frequency Domain Decomposition
EFDD	: Enhanced Frequency Domain Decomposition
FDD	: Frequency Domain Decomposition
FEM	: Finite Element Method
GPS	: Global Position System
LRFD	: Load and Resistance Factor Design
MAC	: Modal Assurance Criteria
MPa	: megapascal
OMA	: Operasyonel Modal Analiz
PGA	: Peak ground acceleration
SDOF	: Single Degree of Freedom
SHM	: Structural Health Monitoring
TBDY2018	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018

TDY2007 : Türkiye Deprem Yönetmeliği 2007

TSDS : Tek Serbestlik Dereceli Sistem

UDAP : Ulusal Deprem Araştırma Programı

USGS : United States Geological Survey



ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Tek serbestlik dereceye sahip sistem modeli.	6
2.2: Tek serbestlik dereceli sönümsüz salınımı.	7
2.3: Sönümlü sistemin serbest titreşim hareketi.	8
2.4: Sönüm azaldıkça rezonans bağlı olarak genlik amplifikasyonu.	8
2.5: Teorik ve deneysel modal analiz aşamaları.	10
2.6: Malzeme ve yük etkisinin idealize edilmiş dağılımı.	12
2.7: Yıkılma etkisinin olasılık aralığı.	13
2.8: Tasarım spektrumlarının karşılaştırılması.	15
2.9: 0.1 sn-0.6 sn periyotlu yapıların tasarım spektrumlarının karşılaştırılması.	15
2.10: Yapılarda ivmeölçer yerleşimi.	19
2.11: Yönergede belirtilen ivmeölçer yerleşim prensipleri.	22
3.1: Örnek çalışmaya ait MAC değerlerinin tablosu.	26
3.2: Örnek çalışmaya ait MAC değerlerinin görselleştirilmiş grafiği.	27
4.1: Van Nuys Otel binası kesit.	29
4.2: Van Nuys Otel binası kolon yerleşim planı.	30
4.3: Van Nuys Otel binası güçlendirme amaçlı cephelere eklenen betonarme perdeler.	31
4.4: Yapının günümüzdeki doğu ve batı cephesi görünümüleri.	31
4.5: Yapının günümüzdeki kuzey cephesi görünümü.	32
4.6: Yapının günümüzdeki güney cephesi görünümü.	32
4.7: SAP2000 malzeme tanımlanması.	33
4.8: Tipik kolon donatı detayları.	33
4.9: SAP2000 kolon konatılarının tanımlanması 1.	34
4.10: SAP2000 kolon donatılarının tanımlanması 2.	34
4.11: Güçlendirilmemiş mevcut yapının SAP2000 modeli.	35
4.12: Güçlendirilmiş yapının SAP2000 modeli.	36
4.13: İvme sensörlerinin yerleşimleri.	37
4.14: Bigbear (1992) depremine ait ivme veri seti.	38
4.15: Northridge (1994) depremine ait ivme veri seti.	39

4.16: Encino (2014) depremi ait ivme veri seti.	40
4.17: Güçlendirme öncesi durumun Artemis modeli.	41
4.18: Güçlendirme öncesi yapının hasar aldığı durumun Artemis modeli.	42
4.19: Güçlendirme sonrası durumun Artemis modeli.	42
4.20: Güçlendirme öncesi sonlu elemanlar modeli 1. modu.	43
4.21: Güçlendirme öncesi sonlu elemanlar modeli 2. modu.	44
4.22: Bigbear (1992) depremi yapı spektral güç yoğunluğu.	44
4.23: Güçlendirme öncesi Bigbear (1992) depremi YSİ 1.mod.	45
4.24: Güçlendirme öncesi Bigbear (1992) depremi YSİ 2.mod.	45
4.25: Güçlendirme sonrası sonlu elemanlar modeli 1. modu.	46
4.26: Güçlendirme sonrası sonlu elemanlar modeli 1. modu.	46
4.27: Encino (2014) depremi yapı spektral güç yoğunluğu.	47
4.28: Güçlendirme sonrası Encino (2014) depremi YSİ 1.mod.	47
4.29: Güçlendirme sonrası Encino (2014) depremi YSİ 2.mod.	48
4.30: Python tabanlı modal güncelleme algoritmasına ait akış şeması.	49
4.31: Güçlendirme öncesi modelin güncellenmesi.	50
4.32: Bigbear (1992) depremi x yönünde etkitilen ivme-zaman serisi (CH16) (PGA:0.023g).	50
4.33: Bigbear (1992) depremi y yönünde etkitilen ivme-zaman serisi (CH14) (PGA:0.02g).	51
4.34: Bigbear (1992) FEM & SHM tepe noktası x yönü yer değiştirme grafiği.	51
4.35: Bigbear (1992) FEM & SHM tepe noktası y yönü yer değiştirme grafiği.	51
4.36: Bigbear (1992) depremi zemin sensör kayıtlarından elde edilen %5 sönüm oranına sahip tasarım spektrumları.	52
4.37: Bigbear (1992) depremi elastik tepki spektrumuna göre kolonların etki-kapasite oranları (PMM).	53
4.38: Bigbear (1992) depremi elastik tepki spektrumuna göre kolonların etki-kapasite oranları dağılımı (PMM).	53
4.39: Northridge (1994) depremi x yönünde etkitilen ivme-zaman serisi (CH16) (PGA:0.453g).	54

4.40: Northridge (1994) depremi y yönünde etkitilen ivme-zaman serisi (CH14) (PGA:0.400g).	54
4.41: Northridge (1994) FEM & SHM tepe noktası x yönü yer değiştirme grafiği.	55
4.42: Northridge (1994) FEM & SHM tepe noktası y yönü yer değiştirme grafiği.	55
4.43: Northridge (1994) depremi zemin sensör kayıtlarından elde edilen %5 sönüm oranına sahip tasarım spektrumları.	56
4.44: Northridge (1994) depremi elastik tepki spektrumuna göre kolonların etki-kapasite oranları (PMM).	57
4.45: Northridge (1994) depremi elastik tepki spektrumuna göre kolonların etki-kapasite oranları dağılımı (PMM).	57
4.46: Güçlendirme sonrası modelin güncellenmesi.	58
4.47: Encino (2014) depremi x yönünde etkitilen ivme-zaman serisi (CH16) (PGA:0.14g).	59
4.48: Encino (2014) depremi y yönünde etkitilen ivme-zaman serisi (CH14) (PGA:0.057g).	59
4.49: Encino (2014) FEM & SHM tepe noktası y yönü yer değiştirme grafiği.	60
4.50: Encino (2014) FEM & SHM tepe noktası y yönü yer değiştirme grafiği.	60
4.51: Encino (2014) depremi zemin sensör kayıtlarından elde edilen %5 sönüm oranına sahip tasarım spektrumları.	61
4.52: Encino (2014) depremi elastik tepki spektrumuna göre kolonların etki-kapasite oranları (PMM).	62
4.53: Encino (2014) depremi elastik tepki spektrumuna göre kolonların etki-kapasite oranları dağılımı (PMM).	62
4.54: Bigbear (1992), Northridge (1994) ve Encino (2014) depremleri etki kapasite oranları.	63
4.55: Van Nuys yapısının kronolojik olarak maruz kaldığı depremlere göre yapı frekanslarındaki değişim.	65
4.56: Depremlerin kronolojik şeması.	66
4.57: Bigbear (1992) depremi x doğrultusu spektogram.	66

4.58: Bigbear (1992) depremi y doğrultusu spektogram.	67
4.59: Northridge (1994) depremi x doğrultusu spektogram.	67
4.60: Northridge (1994) depremi y doğrultusu spektogram.	68
4.61: Encino (2014) depremi x doğrultusu spektogram.	68
4.62: Encino (2014) depremi y doğrultusu spektogram.	68
4.63: Aynı doğrultudaki spektogramların karşılaştırılması.	69



TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Sensör seçimine yönelik dikkat edilmesi gereken teknik özellikler.	18
2.2: Yüksekliğe göre kullanılacak kanal sayısı.	22
2.3: Kullanılacak ivme ölçer özellikleri.	22
4.1: Matematiksel model elastisite modülleri.	33
4.2: Bigbear (1992) depremi teknik özellikler.	38
4.3: Northridge (1994) depremi teknik özellikleri.	39
4.4: Encino (2014) depremi teknik özellikleri.	40
4.5: Islam 1996 göre zamana göre yapıya ait periyodların değişimi.	64

1. GİRİŞ

1.1. Genel Bilgiler

Depremsellik bakımından birçok yeri aktif kuşakta olan ülkemiz ve özellikle sanayileşmenin Marmara Bölgesinde bulunduğu da göz önünde bulundurulduğunda, deprem öncesi ve sonrası yapıların durumunun belirlenmesi, sosyal ve ekonomik güvenlik açısından büyük bir önem arz etmektedir. Yerinde inşa edilen yapılar, hesap yöntemlerindeki bir takım idealize edilmiş kabuller bunun yanı sıra imalat sürecinden kaynaklanan olumsuz şartlar söz konusu olmaktadır. Yapıların bu belirsizliklerden kaynaklanan gerçeğe daha yakın periyod, frekans, mod şekilleri ve sönüm oranı gibi dinamik karakteristikleri Yapısal Sağlık İzleme (bundan sonra YSİ olarak anılacaktır) ile belirlenebilmektedir. Yapı katları arası ötelenmeler, deprem hareketi önce ve sonrası yapı performansları eş zamanlı izlemek adına yapılarda belirlenen prensipler doğrultusunda, YSİ kullanılmaktadır. Havacılık ve uzay alanında sıklıkla kullanılan tahribatsız muayene ve tespit yaklaşımlarını da içeren YSİ sistemleri, günümüzde inşaat mühendisliği alanında da sıklıkla kullanılmaktadır. Özellikle, yakın mesafelerde meydana gelen depremler sonrasında mevcut binaların durumlarının tespit edilmesi amacıyla ele alınan bu yaklaşımların geliştirilmesi ve farklı tekniklerin uyarlanması önemlidir. Bu amaçla yapıda konumlandırılan ivmeölçer donanımları vasıtasıyla yapıya ait ivme verileri toplanmakta, ilgili analitik hesaplamalar sonucunda yapının dinamik karakteristiği veya depremden kaynaklı hasarlar çok ivedi bir şekilde saptanabilmektedir. Bu şekilde yapının güvenliğinden kaynaklı tekrar kullanımına çok kısa bir şekilde karar verilebilmektedir, böylelikle kullanımın uzun süre aksamasından kaynaklı ekonomik kayıpların önüne de geçilebilmektedir. Bunun yanı sıra deprem olmaksızın rüzgâr gibi periyodu daha büyük veya diğer çevresel titreşimlerden kaynaklı kaydedilen verilerin analitik yöntemlerle işlenmesiyle yapının güncel durumunun gözlemlenmesini de eş zamanlı olarak mümkün kılmaktadır. Dünya çapında birçok yüksek yapının durumunu izlemek adına kullanılan YSİ, ülkemizde de TBDY 2018 13.8.1 kısmında belirtildiği gibi Deprem tasarım sınıfı 1,1a,2,2a ve $h > 105$ m olan yapılarda kullanılması belirlenen yönetmeliklerce YSİ sisteminin kurulması zorunlu kılınmıştır [1].

1.2. Kapsam ve İçerik

Bu çalışmanın kapsamı Yapısal Sağlık İzleme (YSİ) sistemleri ile ilgili daha önce yapılmış çalışmalara yönelik literatürün taranması ve bunların değerlendirilmesidir. Bunun yanında çalışmada California’da bulunan Van Nuys Hotel yapısının güçlendirme öncesi ve güçlendirme sonrasında maruz kaldığı çeşitli depremlerden yapısal sağlık izleme metotlarıyla elde edilen ivme veri setlerinin yapı tanılama algoritmalarıyla dinamik karakteristiklerin belirlenmesi ve analitik modelin, dinamik özelliklerinin güncellenmesini ele almaktadır. Güncellenen yapının farklı deprem etkileri altında yapısal durumu değerlendirilecektir.

Yapının güçlendirme öncesi ve sonrası sayısal yapı modelleri, CSI SAP 2000 makro sonlu elemanlar programı olan yapısal analiz programında modellenmiştir. Matematiksel modellemede doğrusal elastik malzeme özellikleri kullanılmıştır. Yapının maruz kaldığı 3 farklı depremden yapı üzerindeki ivme sensörlerinin kaydettiği ivme veri setleri ile yapının güçlendirme öncesi ve güçlendirme sonrasındaki dinamik karakteristiklerine göre doğrusal modelin Python dilinde yazılmış bir algoritma ile güncellenecektir.

Titreşim verilerini analitik olarak hesaplayan dinamik analiz programı olan Artemis Modal – Structural Vibration Solutions programı yardımıyla bu kayıtlar analitik hesaplamaları sonucunda yapıya ait gerçek dinamik karakteristikler belirlenmiştir ve matematiksel model bu bilgiler ışığında yapının dinamik özellikleri güncellenecektir. Bu işlem MAC (Modal Assurance Criterion) olarak anılmıştır. Çalışma sonunda yapılacak çözümlemeler ile güçlendirmenin etkinliğini göstermek çalışmanın başarı ölçütüdür.

1.3. Literatür Taraması

Bu bölümde Yapısal Sağlık İzleme ve Yapı Tanılama Algoritmalarıyla ilgili geçmişte yapılan bazı çalışmalardan bahsedilmektedir. İlk zamanlarda makine ve uzay araçları gibi kısıtlı alanlarda kullanılan bu uygulamalar son 30-40 yıllık gelişiminde inşaat mühendisliği alanlarında da kendine yer edinmiştir.

Şafak E. (1991) Sistem tanılama algoritmaları kullanılarak, 12 katlı bir yapının 1971 San Fernando depreminde elde edilen ivme veri kayıtları ayırık zamanlı doğrusal filtreler ile yapının dinamik karakteristikleri tanımlanmıştır [2].

Çelebi M. (2000) GPS teknolojisi kullanılarak kaydedilen yer değiştirme verileri ile yapı tanılama algoritmalarıyla yapının dinamik karakterisYapı Sağlığı İzleme yöntemi olarak, köprü ve yüksek binalar gibi uzun periyoda sahip yapıların, GPS teknolojisi kullanılarak ölçülen veriler üzerine bir çalışma yapmıştır [3].

Krawinkler (2005) Van Nuys Hotel yapısını üzerine kapsamlı bir çalışma gerçekleştirmiştir ve çalışma kapsamında dinamik özellikler elde edilmiştir ve yapı için 3 farklı güçlendirme önerisi sunulmuştur [4].

Bayraktar ve diğ (2009) Tarihi Trabzon Ayasofya Camii, iki farklı zamanda çevresel titreşim tepkilerinden modal tanımlaması yapılmıştır ve bunun sonucunda iki farklı mod şekilleri ve sönüm oranları elde edilmiştir. Dolayısıyla yapının iki ölçüm arasında hasar aldığı sonucuna ulaşılmıştır [5].

Gürkan ve Diğerleri (2013) Yapı Sağlığı İzleme sisteminde kullanılabilecek düşük bütçeli donanımlar kurmuşlardır. Kurulan donanımlar 100 milisaniye hassasiyete sahip ve kablosuz veri aktarımı yapabilmektedir. Sarsma tablasından toplanan veriler ile yapının yer değiştirmeleri elde edilmiştir [6].

Soyoz ve Diğerleri (2013) Boğaziçi Merkez kampüsünde bulunan yapının çevresel titreşimler altında, güçlendirme öncesi ve sonrası mod şekilleri, frekansları ve sönüm oranları gibi dinamik karakteristikleri belirlenmiş ve karşılaştırılmıştır, Sonuç olarak güçlendirme öncesi, güçlendirme çalışmaları kapsamında taşıyıcı olmayan depremlerin yıkılması esnasında ve güçlendirme çalışmaları sonrasında dinamik özellik değişimleri incelenmiştir [7].

Boru E. (2015) Sakarya’da bulunan ve 1975 Deprem yönetmeliğine göre inşa edilmiş mevcut bir yapının teorik ve deneysel modal analizlerinin karşılaştırılmış ve sonlu elemanlar modeli güncellenmiştir. Güncelleme öncesi ve sonrasında elde edilen sonlu elemanlar modeli doğal titreşim frekansları ile deneysel modal analiz doğal titreşim frekansları arasında modal güvence kriterleri belirlenmiştir [8].

Beyen K. (2017) Tarihi Fatih Camisinin güçlendirme öncesi ve sonrası dinamik katılımlarını, hasarsız bir yöntem olan çevresel titreşimlerin ölçümü ve işlenmesi ile güçlendirme işleminin sağlaması yapılmıştır. Çalışma sonucunda bahçe duvarlarının güçlendirilmesinin modal davranışa etkisi olmadığı, buna karşın yapısal özellik taşıyan yapı elemanlarının güçlendirilmesinin modal davranışa olumlu yönde katkısı

olduğu zaman frekans tanım alanında yapılan değerlendirmeler sonucunda elde edilmiştir [9]. Sert ve Beyen (2018) Zaman tanım alanında, 4 katlı bir yapının doğrusal ve doğrusal olmayan matematiksel modellerinden ivme zaman grafikleri elde edilmiştir. Bu veriler sistem tanılama algoritmalarıyla çözülmüş ve matematiksel modelin dinamik özellikleri hakkında bilgi verilmiştir [10]. Sert (2019) Yapı tanılama algoritmalarıyla 5 Katlı Betonarme bir yapının doğrusal olmayan analiziyle, dinamik karakteristiklerinin tahmininin yapılması ve YSİ gelişmelerin kullanılabilecek alanlarına yönelik bir çalışmadır [11].

Aytulun ve Soyoz (2020) İstanbul’da bulunan 3 farklı yükseklikteki binaya YSİ sistemi kurulmuş, verilerin eş zamanlı olarak değerlendirilmesine yönelik yazılım geliştirilmiş ve bu 3 farklı yapının dinamik özellikleri belirlenmiştir. Yapıların 6 Eylül 2019 Marmara Denizinde meydana gelen 5.7 büyüklüğündeki depremden sonraki güvenlik durumları belirlenmiştir [1].

2. YAPILARIN GÜVENLİĞİNİN TESPİT EDİLMESİ İÇİN YAPI SAĞLIĞI YAKLAŞIMI

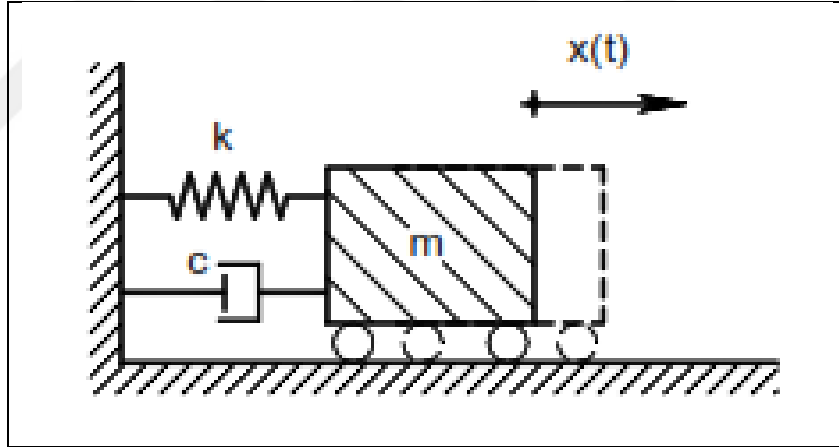
Titreşim gibi genlik ve frekansa sahip olan tekrarlı titreşimlere maruz kalan yapıların statik analizi kadar dinamik analizi de çok büyük önem teşkil etmektedir. Dinamik karakteristiklerin belirlenmesi için yapının modal analizleri gerçekleştirilir. Modal analiz, teorik ve deneysel olmak üzere ikiye ayrılır. Deneysel modal analiz, teorik modal analize çok önemli bir alternatiftir. Ayrıca teorik modal analizden elde edilen sonuçları doğrulama ve sağlamasında etkili bir yöntemdir. Uzun yıllardan beri uzay ve makine alanları gibi titreşimden oldukça etkilenen yapıların frekans ve sönüm oranı gibi dinamik özelliklerini belirlemek ve/veya doğrulanması için deneysel modal analiz kullanılmıştır. Aynı yıllarda yapıların dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi için laboratuvar çalışmaları yapılmıştır. Elektronik alanındaki gelişmeler, ekonomik ve daha hassas ölçüm yapabilen donanımların üretilmesine olanak vermiştir. Böylelikle deneysel modal analiz yapısal sağlık izleme sistemlerinde daha aktif kullanılmaya başlanmıştır. Yapılan birçok çalışma özellikle yapıların, her iki doğrultusundaki basit eğilme modlarının farklılıklarını analitik olarak ortaya koymuştur. Yine yapılan çalışmalar, çoğu yapı şartnamesinde betonarme yapılar için %5, çelik yapılar için ise %2 olarak kabul edilen sönüm oranları, her bir mod için farklı oranlar elde edilmiştir. Böylelikle yapıların dinamik karakteristikleri operasyonel modal analizle daha doğru bir şekilde hesaplanabilmektedir. Operasyonel modal analiz sonucunda elde edilen sonuçlar doğrultusunda teorik modal analizin hesaplandığı sayısal modeller MAC yöntemiyle güncellenmiştir. Operasyonel modal analizleriyle frekans-güç yığılmaları hasar tanılama algoritmalarıyla yapısal hasarlar fiziki olarak gözlemlenemese bile analitik olarak belirlenebilmektedir. Depreme karşı yapılan güçlendirme faaliyetlerinin etkinliği ortaya konabilmektedir. Son olarak deprem sonrası kullanılması gereken stratejik yapıların deprem sonrası hizmet durumu hızlı ve pratik bir şekilde belirlenebilmektedir.

2.1.Hesaplama Yöntemi

Yapıların mod şekli, frekansları ve sönüm oranları gibi dinamik karakteristikleri, modal analiz ile belirlenmektedir. Modal analiz, teorik modal analiz ve özellikle

yaklaşık son 30 yılda gelişme sağlayan deneysel modal analiz ile belirlenebilmektedir. Yapısal Sağlık İzlemeden elde edilen verilerin genel çözümleme prensibi yapı tanılama metotları kullanılmak üzere deneysel modal analizdir. Deneysel modal analizin anlamlandırabilmesi açısından, teorik modal analiz hakkında bildiklerimiz bize bu konuda ışık tutacaktır [11],[12].

Teorik modal analiz sonucunda, yapının doğal titreşim özellikleri matematiksel olarak elde edilmektedir. Doğal titreşim değerleri, deprem, rüzgar gibi periyodik dış etkilerden bağımsız olarak yapının kendi özellikleri olan kütle [m], rijitlik [k] ve sönümün [c] zamana bağlı diferansiyel denkleminde, elde edilir. Sistem idealize edilmiş şekilde tek serbestlik dereceli veya gerçeğe daha uygun çok serbestlik dereceye sahip olabilir. Tek dereceli serbestliğe sahip olan sistemler sadece bir diferansiyel denklemle ifade edilirken, çok dereceli serbestliğe sahip sistemlerde bilinmeyenler, matris takımlarıyla ifade edilir. Şekil 2.1.'de tek serbestlik dereceli bir modelin gösterimi bulunmaktadır [13].



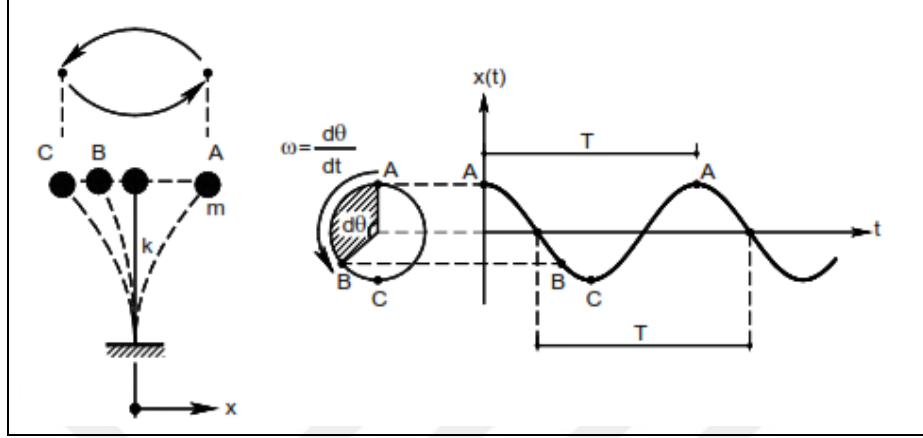
Şekil 2.1: Tek serbestlik dereceye sahip sistem modeli.

Yer değiştirmeye bağlı hareket bağıntısı, denklem 2.1.'deki gibi ifade edilir. Denklem 2.1.'de [m] topaklanmış kütle, $\ddot{x}$ sistemin ivmesini, [k] sistem rijitliğini, $\dot{x}$ sistem hızını, [c] sistemin sönümünü ve x sistem yer değiştirmesini ifade eder.

$$f(t) = m\ddot{x}(t) + k\dot{x}(t) + cx(t) \quad (2.1)$$

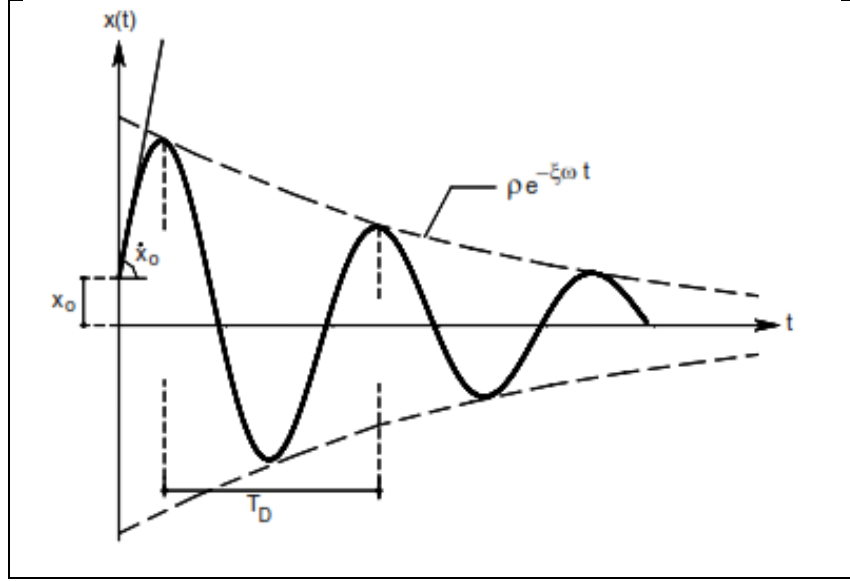
Yapı titreşimi, sistem denge konumundan uzaktayken serbest bırakılmasına verdiği tepki olarak tanımlanabilir. Sistemin denge durumundan uzaklaşıp denge

durumunu korumasına kadar geçen süre sistemin periyodunu belirler. Şekil 2.2.'de gösterildiği gibi sönümün bulunmadığı sistemde, genlik sönümlenmeden çevirim devam eder [13].



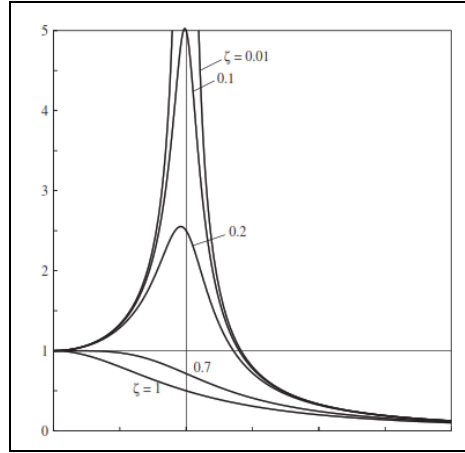
Şekil 2.2: Tek serbestlik dereceli sönümsüz salınımı.

Sönümün bulunduğu sistemlerde ise genlik her çevrimde Şekil 2.3.'de gösterildiği gibi azalmakta ve sonuçta hareket sonlanmaktadır. Sönümü ekspansiyonel bir denklem ifade eder ve gerçekte her yapının malzemesine, geometrisine, plastikleşmiş bağlantılara ve taşıyıcı olmayan elemanların sisteme sağladığı dirence bağlıdır. Yapı tasarım şartnamelerinde çelik yapılar için sönüm oranı %2, betonarme yapılarda ise bu oran %5 olarak tasarım esaslarına katılmaktadır. Deneysel modal analizde sönüm oranlarının hesaplanması farklı analitik yöntemler ile gerçekleştirilir. Deneysel modal analiz sonuçlarında her yapı için sönüm oranların farklı olduğu, bu farklılığın yapı türüne, birleşim hesaplarına, mevcut hasarlara bağlı olarak her bir doğal titreşim modu için farklı olduğu ortaya konmuştur [13].



Şekil 2.3: Sönümlü sistemin serbest titreşim hareketi.

Zorlanmış titreşimde ise sistem maruz kaldığı tekrarlı yükleme altında bulunmaktadır. Maruz kaldığı tekrarlı yüklemenin periyodunun, kendi dinamik periyoduna oranına bağlı olarak, titreşimin genliği sönüm oranına bağlı olarak her bir dönüşte artar, genlik teorik olarak sonsuz büyüklüğe ulaşır. Büyütme etkisi Şekil 2.4.'de gösterilmiştir [14].



Şekil 2.4: Sönüm azaldıkça rezonans bağlı olarak genlik amplifikasyonu.

Bu kısma kadar teorik modal analizin hesap prensipleri ve esaslarından bahsedilmiştir. Teorik modal analizde kütlelerin belirli yerlerde toplanması, rijitliğin sistem boyunca sabit ve dış etkilerden izole olduğu, en fazla değişkenlik gösteren parametre olan sönümün sabit olarak kabul edilmesi gibi kabulleri içerdiğini belirtmek

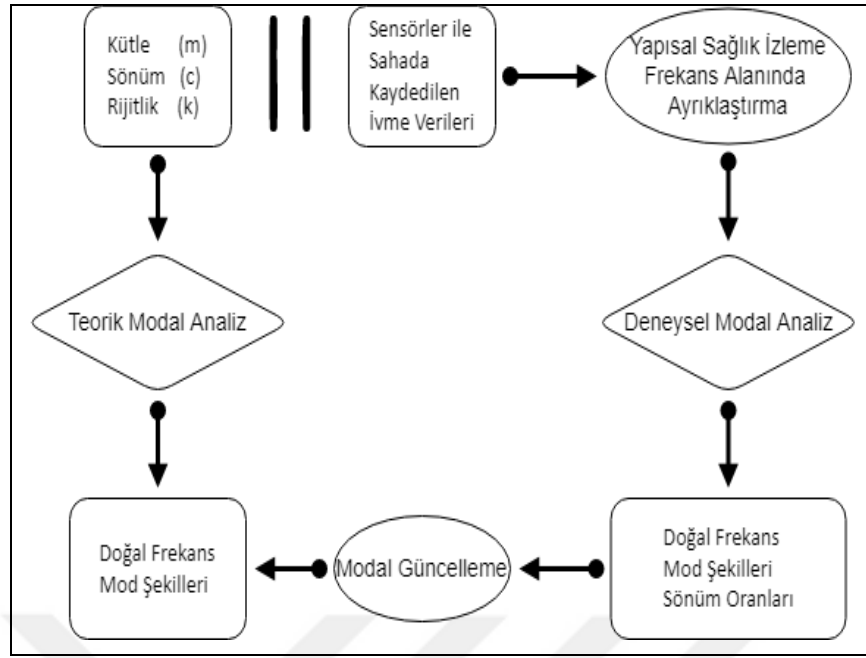
gerekir. Deneyisel modal analiz bir bakıma teorik modal analizin sağlamasıdır. K t le, rijitlik, sönüm oranı gibi parametreler teorik modal analizde olduğu gibi girdi olarak kullanılmaz. Saha şartlarında sistemin belirli yerlerinden alınan çevresel titreşimlere bağlı ivme kayıtları sistem tanılama algoritmaları yardımıyla analiz edilir ve dinamik karakteristikler belirlenir.  ıkan sonuçlara göre teorik modal analiz güncellenir ve gerçeğe yakın bir şekilde güncellenmiş matematiksel model elde edilir [11],[13],[14].

Deneyisel modal uygulama prensiplerine ait hesaplama adımları řu şekildedir; Yapıya ait geometrinin oluşturulması, ölçümleri için ivme l  rlerin yerleştirilmesi, yapı ivme tepkilerin kaydedilip davranış fonksiyonlarının bulunması. Bu fonksiyonlar sonucunda dinamik karakteristiklerin saptanması ve matematiksel modelin buna uygun şekilde güncellenmesidir [11].

Sonuç olarak, teorik modal analiz, yapıya ait belli geometrik ve malzeme özelliklerinin bir takım hesaplamalar sonucunda dinamik karakteristiklerinin tümevarım yöntemiyle elde edilmesini hedeflerken, deneyisel modal analiz bu yöntemin aksine yapıdan elde edilen ivme verilerinin hesaplanmasına dayalı tümdengelim yöntemidir. Bu anlamda deneyisel modal analiz bir bakıma, teorik modal analizin sağlamasıdır. Bir sonraki bölümde deneyisel modal analizin hesap adımlarından ve bulgulardan bahsedilmektedir.

2.2. Hesaplama Adımları

Deneyisel modal analizin hesap adımları sırasıyla beş temel esastan oluşmaktadır. Yapının matematiksel modelinin kurulması, yapı sisteminin YS  prensiplerine uygun olacak şekilde ivme l  rler ile donatılması, donatılan yapıdan çevresel titreşim etkileriyle ivme verilerinin dinamik veya statik olarak kaydedilmesi, kaydedilen ivme verilerin analitik olarak işlenmesi, elde edilen dinamik karakteristiklerin matematiksel model ile karşılaştırılması ve matematik modelin buna uygun bir şekilde güncellenmesidir. Şekil 2.5.'de teorik ve deneyisel modal analizin işlem akışı şematik olarak gösterilmiştir [11].



Şekil 2.5: Teorik ve deneysel modal analiz aşamaları.

Matematiksel model oluşturma'nın mümkün olmadığı yapılarda da deneysel modal analiz verileri tanılama algoritmalarıyla çözümlenerek, dinamik karakteristikler belirlenebilir. Daha önceki bölümlerde bahsedildiği gibi deneysel modal analizde herhangi bir kabul söz konusu olmadığı için sonuçlar daima gerçeğe daha yakındır. Deneysel modal analizler, Deneysel modal analiz ve operasyonel modal analiz olarak ikiye ayrılır. Deneysel modal analizde yapıya etkiyen titreşimler titreştiriciler vasıtasıyla oluşturulur ve titreşim özellikleri bilinir. Operasyonel modal analizde ise yapıya özellikleri bilinmeyen çevresel titreşimler etkir. Çevresel titreşimlere örnek olarak deprem, rüzgâr, taşıt trafiği ve yapı içerisinde insan hareketleri örnek gösterilebilir. Operasyonel modal analizde oluşan titreşimler, deneysel modal analize görece daha düşük genliklere sahiptir. Elektronik alanındaki gelişmeler ile birlikte son dönemlerde üretilen donanımlar düşük frekanstaki ivme verilerini ölçebilecek hassasiyete sahiptir. Bu sayede donanımlar çevresel titreşimlerin etkisinden kaynaklanan, yapı titreşimlerini kaydedebilmekte olup titreştirici kullanma gereksinimini kaldırmaktadır. Yapıda matematiksel olarak anlam ifade edecek büyüklükteki ivme verilerini, yapıya herhangi bir tahribat vermeden elde etmek mümkün olduğundan, inşaat alanında çevresel titreşimler ile operasyonel modal analiz (OMA) kullanılır. OMA daha ekonomik ve pratik bir çözüm sunmaktadır. Bu yöntem dinamik karakteristiklerin belirlenmesinin dışında, zaman ve frekans ortamında hasar

tanılama algoritmaları kullanılarak, yapıda oluşan hasarların tespit edilmesinde de kullanılır. Fiziki olarak tespit edilemeyen hasarlar bu yöntemle hızlı bir şekilde tespit edilebilmektedir [8],[9],[11].

Yapıya konumlandırılan donanımlar binada ivme verilerini sürekli veya belirli aralıklarla kaydetmeye programlanabilir. Yapının dinamik karakteristiklerini saptamaya yönelik aralıklı ivme kayıtları yeterli olmaktadır. Devamlı kayıtlar ile takip edilen yapılarda ise ivme kayıtlarının analiz edilmesi ile yapının hedeflenen kat deplasmanları ve kat ivmeleri eş zamanlı olarak takip edilebilmektedir. Belirlenen sınırlar dışına çıkıldığında uyarı oluşturacak yazılımlar bu tür kontrolleri sağlamaktadır [1],[15].

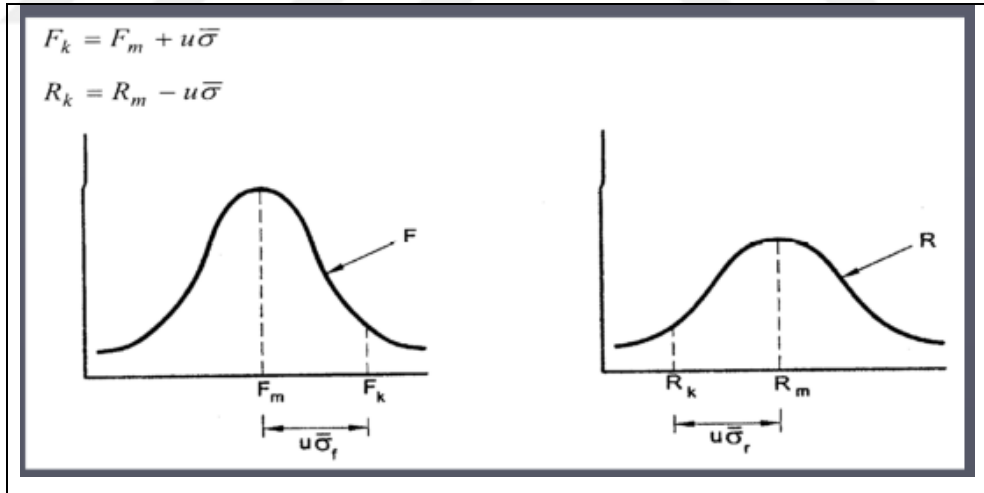
Tasarım aşamasında yapılan bir takım kabuller, imalat esnasında veya sonrasındaki çevresel etmenler yapının dinamik karakteristiklerinin farklı hesaplanmasına neden olmaktadır. Bu farklılıklara neden olan bir takım nedenler aşağıdaki gibidir,

- Yapı-zemin etkileşiminin ihmal edilip yapı sınırının dönme, ötelenmelere karşı tamamen tutulu olması bunun sonucunda mesnetlik şartının sağlanamaması.
- Çelik yapılarda yarı rijit olan bağlantı türlerinin dönmeye karşı tamamen tutulu veya tamamen serbest olarak kabul edilmesi sonucunda global rijitliğin belirlenememesi.
- Yapısal hasar sonucunda birleşim elemanlarında oluşan plastik mafsalların ön görülememesi.
- İmalat hatalarından kaynaklı yapıda meydana gelen geometrik ve/veya malzeme rijitliği kaybı.

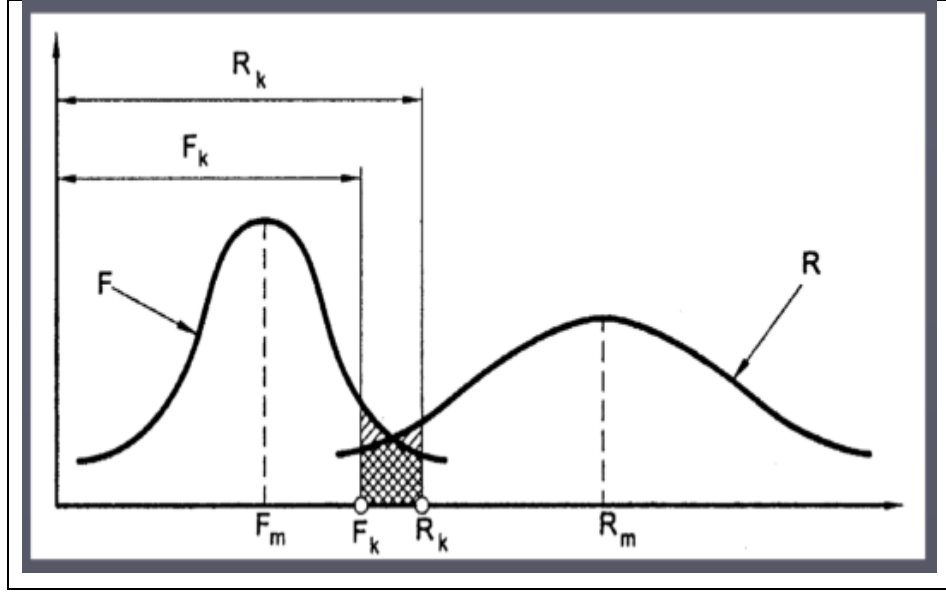
Operasyonel modal analiz sonucunda elde edilen dinamik karakteristikler yukarıda sayılan veya benzer nedenlerden ötürü sayısal modelden farklı olabilmektedir. OMA sonucunda elde edilen dinamik karakteristikler bu farklılıklara karşın bir sağlama aracı olarak kullanılabilir. Modal Güvence Kriteri (Modal Assurance Criteria,MAC) yöntemiyle sayısal model güncellenerek daha güvenilir sonuçlar elde edilmektedir. Bu yöntemle teorik modal analizin sayısal olarak sağlanması mümkün olmaktadır.

2.3. Yapı Güvenliği

Yapı güvenliği en temel tabiriyle yapıya etkiyen statik ve dinamik yüklemelerden kaynaklı oluşacak eksenel, kesme ve eğilme etkilerinin, yapı sistemini oluşturan elemanlarının güvenli yer değiştirme ve dönmeler sınırları içerisinde karşılaşması esasına dayanır. Dayanım etkisini R ve yükleme koşullarını F ile gösterecek olursak; $R > F$ koşulunun sağlanması gerekir. Malzeme kalitesinin ön görülebilmesi, belirlenen malzemenin kalitesinin dış etkilerden dolayı zamanla değişmesi, mesnet koşullarının teorik anlamıyla tamamen sağlanamaması gibi çoğaltılabilecek birçok nedenden ötürü, bu ilişkinin net bir şekilde kurulması mümkün olmamaktadır. Her iki faktörün de rastgele olaylar olmasından ötürü, 1970'lerden itibaren yapılan çalışmalar, malzeme etkisi ve yük etkisinin istatistiksel bir bağlamda değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymuştur. Dayanım ve malzeme etkisi Şekil 2.6.'da idealize edilen, çan eğrileri denklemleriyle ifade edilmektedir. Şekil 2.7.'de malzeme ve dayanım etkilerinin kesişimi ise yıkılma etkisinin olasılık aralığını ifade etmektedir [16].



Şekil 2.6: Malzeme ve yük etkisinin idealize edilmiş dağılımı.



Şekil 2.7: Yıkılma etkisinin olasılık aralığı.

Yıkılma olasılığı R_k ve F_k değerleri arasında kalan bölge olarak ifade edilir. Bu olasılık R ve F etkilerinin belirsizliğinden ötürü hiçbir zaman ortadan kaldırılamaz. Fakat mühendislik disiplinlerince kabul edilebilir mertebelere düşürülebilir. Yapılarda güvenliğin sağlanması R_k değerinin F_k değerinden büyük olmasına bağlıdır. Yıkılma riskinin azaltılmasına yönelik yük etkilerinin artırılması ve/veya malzeme etkisinin azaltılmasına yönelik malzeme ve yük katsayıları kullanılır [16].

Betonarme yapılar konvansiyonel yapılar arasında oldukça yaygın kullanılmaktadır. Betonarme yapıları inşaat çeliği ve beton oluşturur. Betonarme çeliğinin homojen bir malzeme olmasına karşın, beton homojen bir yapıda değildir. İmalat aşamasında dahi alınan deney numuneleri farklı dayanımlarda çıkmaktadır. Ayrıca üretim şartları da beton dayanımında oldukça etkilidir. Yapı tasarımında genel kabul gören yapı güvenliği prensibine göre, yükleri artırma ve/veya malzemeyi azaltma katsayıları kullanılır.

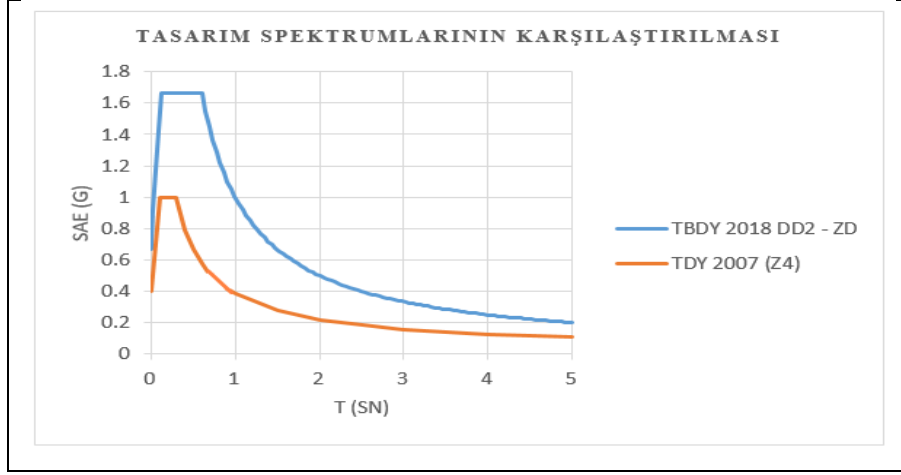
American Institute of Steel Construction (AISC) ve American Society of Civil Engineers (ASCE) gibi dünyada hâkim olan yönetmeliklerde yükleme prensipleri ASD (allowable stress design) ve LRFD (load reduction factor design) olarak tanımlanmıştır. Kombinasyon ve malzeme katsayıları buna göre tanımlanır. LRFD için genel prensip farklı yükleme koşullarını farklı katsayılarla artırıp, malzeme mukavemet değerlerini bir miktar düşürülerek hesaplanır. ASD yönteminde farklı yükleme tiplerinin katsayısı aynı katsayılarla değerlendirilip var olan malzeme özelliği kullanılır. Ülkemizde 2016'da yenilenen çelik yapıların tasarımı şartnamesinde

LRFD Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım, ASD Güvenlik Katsayıları ile Tasarım olarak uygulanmaktadır. Ülkemizde betonarme yapıların tasarımında kullanılan TSE 500 şartnamesinde betonarme çeliğin homojen bir yapıya sahip olmasından ötürü karakteristik dayanımını 1.15 katsayı ile azaltılırken, homojen bir yapıya sahip olmayan betonun karakteristik dayanımı 1.5 katsayısı ile azaltılır. Böylelikle R_k ve F_k faktörü arasında kalan istatiksels alan kabul edilebilir seviyeye düşürülür.

2.4. Deprem Tehlikesi

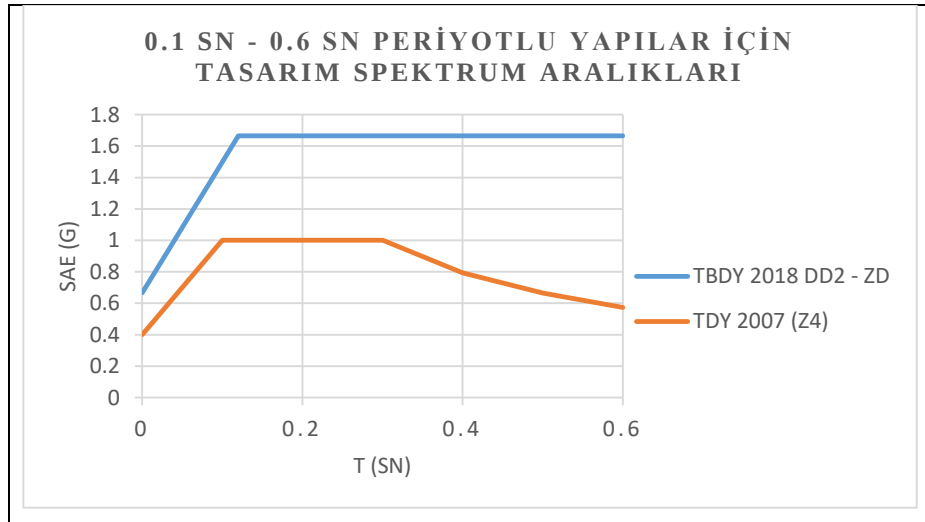
Deprem günümüz gelişmeleri göz önünde bulundurulduğunda çoğu zaman etkileri engellenemeyen bir afettir. Ülkemizde nüfusun önemli çoğunluğu aktif deprem kuşağında yaşamaktadır. Ayrıca endüstriyel alanlar yine aktif deprem kuşağında bulunmaktadır. 17 Ağustos 1999 İzmit depreminde, deprem kamu güvenliğinin yanında ekonomik olarak ulusal mertebede etkisini hissettirmiştir. Depremden kaynaklı meydana gelecek zararları en aza indirmek, kamu bilinci oluşturmak ve doğru yapılaşma ile mümkündür.

Türkiye’de ilk deprem şartnamesi 1940 yılında kullanılmaya başlanmıştır. İlk şartnamelerde deprem kuvveti taban kesme kuvveti olarak hesaplanarak yapılara etkitilmektedir. Yıllar içerisinde süregelen gelişimle birlikte yönetmelikler güncellendi ve kapsamı artırıldı, 1997 yılındaki güncelleme ile şartnameye eş değer deprem yükü yöntemi (idealize edilmiş eğilme modu), mod süperpozisyonu yöntemi ve doğrusal olmayan tasarım yöntemi eklenmiştir. Gelişim 2007 deprem yönetmeliğinde mevcut binaların güçlendirilmesi ve itme-kapasite spektrumu eklenmesi ile devam etti. Son olarak 2018 Deprem yönetmeliğinde ise bölgelerin depremselliği yerel zemin sınıf tanımlarının kapsamı ile genişletildi. şekil değiştirmeye göre tasarım eklendi. Deprem konusunda kapsam önceki yönetmeliklere göre genişletildi. Ayrıca yüksek yapılar, sismik izolatörlü yapılar ve yapı sağlığı gibi konulara ilk defa yer verildi. 1975 yılındaki deprem yönetmeliği 37 sayfadan oluşuyorken 2018 deprem yönetmeliği 417 sayfadan oluşmaktadır. Bu deprem yönetmeliklerinin gelişimi konusunda bize anlam ifade etmektedir [17].



Şekil 2.8: Tasarım spektrumlarının karşılaştırılması.

Kocaeli İzmit ilçesinde $V_{s30} = 200$ m/sn özelliğe sahip zeminde tasarlanacak yapı için, TBDY 2018 ve TDY 2007 yönetmeliklerinde belirlenen elastik spektral ivme grafikleri Şekil 2.8.'deki gibidir. Güncellenen şartnamede spektral ivme eğrisinin eski yönetmelik elastik spektral ivme değerlerinin üstünde kaldığı gözlemlenebilir. Geleneksel betonarme binaların periyodlarının, basit bir yaklaşımla 0.1 sn ile 0.6 sn arasında olacağı varsayılabilir. Şekil 2.9.da de görüleceği üzere bu aralıktaki spektral ivme değerleri TBDY 2018 elastik tasarım spektral ivme değeri 1.63 g değerindedir. TDY 2007 yönetmeliğine göre elastik tasarım spektral ivme değeri 0.3 sn periyot değerine kadar 1.00 g, plato sonrasında ise azalan bir eğriye sahiptir.



Şekil 2.9: 0.1 sn-0.6 sn periyotlu yapıların elastik tasarım spektrumlarının karşılaştırılması.

2.5. Yapı Sağlığı İzleme Sistemleri

2.5.1. YSİ Sistemlerinin Gelişimi

Yapı sağlığı izleme sistemlerinin teorik arka planını deneysel modal analiz oluşturmaktadır. Önceki bölümlerde de değinildiği gibi yirminci yüzyılın ortalarından itibaren uzay ve makine alanlarında başlıca olmak üzere birçok alanda uygulanmaktadır. Son yıllarda yazılım anlamında kat edilen gelişmeler olsun, ekonomik anlamda donanımların daha erişebilir olması bu sistemleri laboratuvar ortamından dış dünyaya çıkmasını sağlamıştır. Bunun yanı sıra dışarıdan tahrik gerekmeyen, çevresel titreşimler ile çalışılan operasyonel modal analizin gelişimi de yapılar üzerinde tahribatsız takip imkânı sunmuştur. Böylelikle yapı sağlığı izleme sistemi sadece stratejik önem arz eden yapılarda değil, genel nüfusun yaşadığı yapılarda da birçok amaçla kullanılabilir. YSİ izleme sistemlerinin daha erken dönemlerdeki amacı ölçüm alınan yapının dinamik karakteristiğinin belirlenmesi ve matematiksel modelinden elde edilen sonuçların sağlanmasının yapılmasıydı. Böylelikle bu çalışmada da konu alınan, güçlendirme safhasındaki bir binanın öncesi ve sonrasındaki yapısal durumu güvenilir bir şekilde karşılaştırılabilir. İlerleyen zamanlarda ise yapılardan sürekli alınan verilerin depolanacağı alanların artması, toplanan bu verileri işleyecek yazılımların gelişmesi ve elde edilen sonuçların ilgili ortamlara eş zamanlı iletilmesini sağlayacak bilişim olanakları gelişmiştir. Bu sayede yapıların sürekli bir şekilde izlenip durumlarının takip edilmesi mümkün olmuştur. Deprem sonrası hastane gibi kesintisiz kullanım açısından önem arz eden yapıların kullanımına güvenli bir şekilde devam etmesine, hızlı ve otomatik olarak karar verilebilmektedir. Son yıllarda özellikle yaya ve araç trafiği gibi titreşimleri, deprem titreşimlerinden ayırt edecek yapay zekâ ve derin öğrenme yazılımları hazırlanmıştır. Gelecekte sigortacılık sektöründe sigortalama işlemi doğrultusunda yapı riskinin belirlenmesinde de etkin bir çözüm olarak kullanılabilir. Böylelikle yapının karşı karşıya olduğu ekonomik ve sosyal riskler doğrultusunda, yapının sigortacılık kapsamındaki maliyetleri belirlenebilecektir [11],[15],[18].

2.5.2. YSİ Sistemlerinde Kullanılan Donanımlar

YSİ sistemlerinde yapıdaki yer değiştirmeler, eğrilikler ve çatlak genişlikleri gibi birçok çeşitli parametre takip edilebilir. Yapıda incelenecek amaca yönelik bahsedilen parametrelerin verilerini kaydetmeye yönelik çeşitli sensörler kullanılmaktadır. Yapıda sensörlerin konumlandırılması, enstrümantasyon yöntemini belirler. Dinamik özelliklerin belirlenmesi amaçlanan çalışmalarda, yapıda belirlenen düğüm noktalarına yerleştirilen sensörlerle kaydedilen yer değiştirme veya ivme veri kayıtlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Kayıtlar ivme ölçerler ile veya GPS teknolojisi kullanılarak, konum değiştirmeler ile elde edilebilir. Geçmişte yapılan bazı çalışmalarda GPS teknolojisi ile yapıdaki yer değiştirmeler takip edilmiştir. Toplanan bu verilerle YSİ çalışmaları yapılmıştır. Fakat GPS ile toplanacak veriler, köprü ve gökdelen tarzı yüksek periyodlara sahip yapılar için uygulanabilmektedir. Nitekim düşük periyoda sahip yapılardan GPS ile kaydedilecek yer değiştirme verileri, yapısal olarak anlam ifade eden hassasiyette değildir. Sisteme etki eden titreşimleriyle, yapıdan ölçülen tepkilerin birlikte değerlendirilmesi prensibinin geçerli olduğu deneysel modal analiz yönteminde yapıda titreşim oluşturacak sarsma tablası kullanılmaktadır. Sarsma tablasına eklenecek kütle ile titreşimin genliği ayarlanabilmektedir. Fakat yapıların büyüklüğüne uygun titreşimlerinin oluşturulmasının hem maliyetli olmasından hem de yapıda oluşturacağı risklerden dolayı güvenli bir yöntem değildir. Deneysel modal analiz, görece daha küçük plaka elemanları için daha uygundur. Yapı alanında sadece çevresel titreşimlere bağlı oluşan tepki titreşimlerini ölçmeyi hedefleyen operasyonel modal analiz tahribatsız bir metod olduğu için daha uygundur. Fakat YSİ sisteminde kullanılacak sensörlerin yapı karakteristiğine bağlı olarak oluşacak, gürültü mertebesinde çok düşük genliklere sahip titreşimleri ölçebilecek hassasiyette olması gerekmektedir. Operasyonel modal analize uygun sensörler özellikle son yıllarda elektronik alanındaki teknolojik gelişmelerle birlikte ekonomik olarak daha erişebilir hale gelmiştir. YSİ sistemi ile takip edilecek yapıların rijitliği fazla olduğundan sensörlerin hassas ve gürültü mertebesinde ayırtılabilecek ölçümler yapabilmelidir. Seçilecek sensörlerin teknik özellikleri Dinçer ve arkadaşları tarafından Tablo 2.1.'deki özellikleri sağlaması, ölçümlerin daha sağlıklı ve yapısal ölçekte anlam kazanması açısından önemlidir. [15].

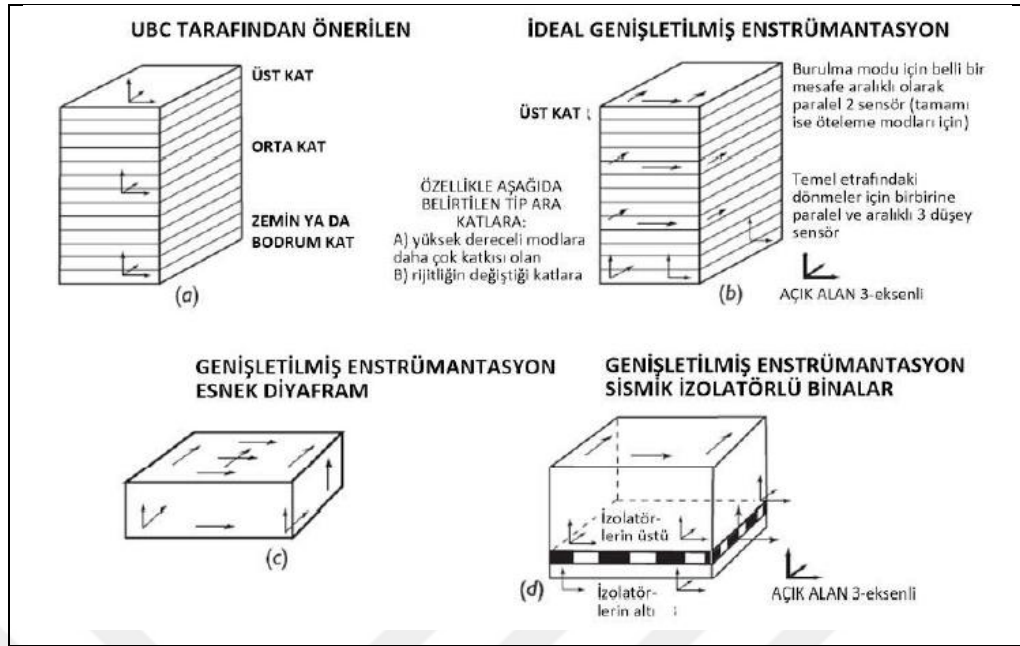
Tablo 2.1: Sensör seçimine yönelik dikkat edilmesi gereken teknik özellikler.

Teknik Özellik	Değer
Ölçüm Aralığı	$\pm 0,5 - \pm 3$ g
RMS Gürültü	$< 1\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}} - < 300\text{nano-g}/\sqrt{\text{Hz}}$
Dinamik Aralık	110 – 120 dB
Frekans Tepkisi	0 ya da 0,1- 100 Hz
Besleme Voltajı ve Sensör Tipi	Veri Toplama Sistemi ile Uyumlu
Sıcaklık ile Değişim	Makul sınırlar içinde kalmalı

Üç eksenli ivmeölçerle yapılacak kayıtlar ile yapısal ölçekte anlam ifade edecek hassasiyette ölçümler yapılabilir. YSİ sisteminde statik veya dinamik ölçüm yapılabilir. Statik ölçüm, belli zaman dilimlerinde sensörler vasıtasıyla kaydedilen verilerin, sistem tanılama algoritmalarıyla çözümlenmesi ve matematiksel modelinin güncellenmesi prensibine dayanır. Dinamik ölçümlerde ise yapının eş zamanlı takip edilmesi amaçlanır. Eş zamanlı YSİ sistemi genel olarak 3 bileşenden oluşur. Bunlar, ivme verilerini kaydedecek sensörler, verilerin kaydedileceği yerel veya uzak sunuculu bilgisayarlar ve toplanan verileri sistem tanılama algoritmalarıyla değerlendirip sonucu kullanıcıya sunacak yazılımlardır. Sensörler kablolu ve kablosuz olarak kullanılabilir. Kablosuz sensörler çalışma alanlarında çok büyük kolaylık sağlamaktadır. Fakat sayısallaştırıcılar arasında zaman senkronizasyonunun sağlanması gerekmektedir. Buna yönelik GPS zaman seri etiketleriyle kayıt yapabilen cihazlar bulunmaktadır [3],[15].

2.5.3. YSİ Sistemlerinde Sensör Yerleşimi ve Hesaplama Algoritması

YSİ sistemiyle takip edilen yapılarda kullanılacak donanımların özelliği kadar yapının enstürümasyonunun da uygun bir şekilde yapılması önem arz etmektedir. İvmeölçerlerin yapıya yerleştirilmesi prensipleri, Şekil 2.5.'de Çelebi'nin 2002'de USGS (Birleşik Amerika Jeolojik Araştırma Kurumu) için İngilizce hazırladığı, Dinçer ve arkadaşlarının kendi yayınları için içeriği Türkçeleştirilen görseli alıntılanmıştır.



Şekil 2.10: Yapılarda ivmeölçer yerleşimi.

Şekil 2.10.a.'da Uniform Building Code (UBC) yönetmeliğinde bulunan, Dinçer vd. (2015) tarafından Türkçeleştirilen ivmeölçer yerleşimi önerisi bulunmaktadır. Buna göre yapının ilk katına, orta katına ve son katına üç eksenli ivmeölçerlerin yerleştirilmesi şeklindedir. Fakat güncel çalışmalarda, bu yaklaşımın yetersiz olduğu için güncellenerek kullanılmıştır.

YSİ sisteminde yapıyla ilgili birçok yapısal davranış irdelenebilir. Bu konular başlıca, basit eğilme modları, burulma modları veya katlar arasındaki görece yer değiştirmelerin tespiti gibi birçok davranışla çoğaltılabilir. Üç eksenli ivmeölçerlerle yapılacak kayıtların donanımsal olarak daha avantajlı olacağı düşünülebilir. Fakat burulma modlarını tespit etme amacıyla takip edilen yapılar için aynı kat seviyesinde belirli aralıklar ile konumlandırılacak tek eksenli ivmeölçerlerden elde edilecek veriler, hem ihtiyaç duyulmayan veri yükünü azaltacaktır hem de daha maliyetli bir çözüm sunmaktadır. Takip edilecek yapısal davranışa göre sensörlerin en uygun yerleşiminin tespit edilmesi, çalışmayı daha başarılı bir sonuca ulaştıracaktır. Sensör yerleşimleri hakkında Dinçer ve arkadaşlarının çalışmasında genel prensipleri önerilmiştir. En üst kat seviyesine özellikle basit eğilme modlarının tespit edilmesi için mutlaka sensör yerleştirilmelidir. Modlara etkin katkısı olan ve rijitliğin değiştiği ara katlara ivmeölçerlerin yerleştirilmesi de önem taşır. Yerleştirilen sensörlerin, yatay modlara ait frekans değerlerinin hesaplanması için x ve y ekseninde yerleştirilip bu eksenlerde kayıt alması sağlanmalıdır. Burulma modlarının bulunmasına yönelik ise

aynı katlarda birbirine yakın ve paralel bir şekilde konumlandırılmalıdır. Katlarda hem tek eksenli hem de çift eksenli sensörler kullanılmasıyla basit eğilme ve burulma modları pratik bir şekilde ayrıştırılabilir. Temeldeki dönmelerin saptanması amacıyla aralıklarla temel katına düşey eksenle ölçüm yapılabilir. Önerilen sensör yerleşimleriyle YSİ sistemi için gerekecek ve birçok yapısal parametreyi değerlendirme imkânını sunmaktadır. Yapı-Zemin etkileşimi değerlendirilecek yapılarda ise önerilere ek olarak yapıya yakın konumda zemin üzerine sensör yerleştirilebilir, böylelikle yapı ve zeminden elde edilen titreşim verileri birlikte değerlendirebilecektir. Sismik yalıtımlı yapılarda ise yalıtım elemanlarının altına ve üstüne konumlandırılacak sensörler, yalıtım sisteminin hem sönüm oranları hem de yer değiştirmeleri takip edilebilecektir. Enstrümantasyon önerilere uygun bir şekilde yapıldığında, en az 12 eksenle ivmeölçer konumlandırılması gerekir. Gerekli durumlarda tek eksenli sensörlerin kullanılması maliyeti olumlu yönde etkilemektedir [15].

2.5.4. Dünyadaki ve Ülkemizdeki Uygulamalar

Bal ve arkadaşları 2019'da yayınladıkları çalışma kapsamında, İstanbul'da bulunan Avrasya tüneline, makine öğrenmesi tabanlı YSİ sistemi geliştirmiştir. Çalışmanın amacı depremden kaynaklanmayan titreşimleri ve deprem kaynaklı titreşimlerden ayırt edebilen makine öğrenmesine sahip bir yazılım geliştirmektedir. Hazırlanan yazılım titreşimleri %98 tahmin doğruluğu elde edilmiştir. Yapılan çalışma yapay zekâ ile YSİ sisteminin birlikte kullanılması adına önemli bir emsaldir [17].

Aytulun ve Soyoz (2020), UDAP “Yüksek Binalarda Kurulacak Yapı Sağlığı İzleme Sistemi Standardının Belirlenmesi ve İstanbul Örnek Uygulaması” kapsamında, İstanbul'da bulunan 3 farklı yükseklikteki binaya YSİ sistemi kurmuşlardır. Bu çalışmanın amacı yapıların dinamik kimliklerinin belirlenmesi, yapısal sağlık sisteminin takibine örnek teşkil etmesidir. Uygulamada yapıların eş zamanlı takibini sağlayacak ve gerekli zamanlarda ilgili kurumları bilgilendirecek yazılım hazırlanmıştır. Yapılar 6 Eylül 2019 Silivri (Mw=5.8) Depreminden sonraki güvenlik durumları belirlenmiş ve kesintisiz olarak hizmet etmeleri sağlanmıştır [1].

Beyen K. 2017'de yaptığı çalışmada Tarihi Fatih Camii'nin çevresel titreşimler altında 8 istasyondan veriler kaydedilmiştir. Güçlendirme öncesi ve güçlendirme

sonrası verilerden oluşturulan hasar indekslerini karşılaştırmıştır. Bu çalışmada yapıya uygulanan güçlendirme ve onarım metotlarının etkinliğinin sağlaması niteliğindedir [9].

Bari Teknik Üniversitesinde, yığma olan tarihi Bari kulesinin çevresel titreşimler altında ivme verileri kaydedilmiştir. Artemis Modal yazılımı ile yapıya ait modal frekanslar ve mod şekilleri gibi dinamik karakteristikleri başarılı bir şekilde elde edilmiştir [19].

Soyoz ve arkadaşları Boğaziçi kampüs binasında bulunan yapının, güçlendirme öncesinde, ve güçlendirme sonrasında çevresel titreşimlerden kaydedilen verilerle operasyonel modal analiz gerçekleştirmiştir. Yapıya ait sönüm ve frekans özellikleri saptanmıştır. Sonlu elemanlar modelinden elde edilen verilerle karşılaştırmışlardır. Ayrıca bölme duvarlarının yapı rijitliğine katkısı da hesaplamalar sonucunda açık bir şekilde ortaya konulmuştur [7].

Carlos ve arkadaşları 2003'te Kaliforniya'daki yükseklikleri birbirine çok yakın iki farklı yapıyı enstrümente etmiş ve Northridge (1994) depreminden ötürü yapıda oluşan veriler toplamışlardır. Yapıların dinamik karakteristikleri ortaya konmuştur. Yapıların neredeyse aynı yüksekliği sahip olmasına rağmen taşıyıcı sistemlerinin farklılıklarının, periyod ve sönüm oranları üzerindeki etkisi belirlenmiştir [20].

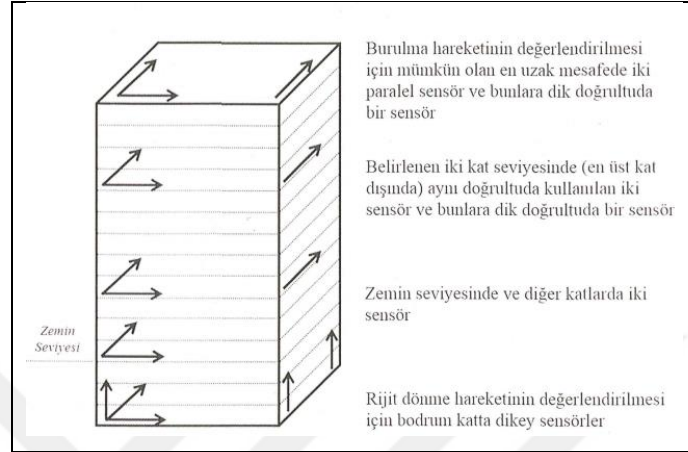
Beyen 2017'de, YSİ çalışmaları sonucunda güncellenen yapı modellerini, Türk Deprem Yönetmeliğinde tavsiye edilen hesaplama yöntemleriyle analizleri gerçekleştirilen yapıların sonuçları ile karşılaştırılmıştır. İdealize edilen hesaplamaların ne gibi farklılıkları meydana getirdiği irdelemiştir [21].

UNESCO Miras listesindeki Sivas Divriği Ulu Cami, restorasyon ve güçlendirme esnasında Türkiye'de YSİ alanında faaliyet gösteren Teknik Destek Grubu tarafından 200 sensörle izlenmiştir.

2.6. Ülkemizdeki ve Dünyadaki Yönetmelikler

Yapısal sağlık izleme sistemleri ile ilgili kural ve prensipleri içeren birçok uluslararası yönetmelikler bulunmaktadır. Ülkemizde ise bu konuya 2018'de güncellenen Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde Bölüm 13.8 kapsamında ilk defa değinilmiştir. Buna göre yüksek yapılarda YSİ sistemini, DTS 1, 1a, 2 ve 2a sınıfı binalardan yapı yüksekliği 105 metreden fazla olan yapılarda bakanlıkça yayınlanan

yönergeye uygun bir şekilde kurulacaktır. 2020’de Afet ve Acil Durum Yönetimi tarafından içişlerine Yapı Sağlığı İzleme Sistemi Uygulama Yönergesi sunulmuş ve kabul edilmiştir. Yayınlanan yönergede ivmeölçer yerleşimleri Şekil 2.11.’deki gibi belirtilmiştir [22].



Şekil 2.11: Yönergede belirtilen ivmeölçer yerleşim prensipleri.

Yayınlanan yönergeye göre YSİ sistemi kurulacak yapılarda kullanılacak minimum ivmeölçer âdeti Tablo 2.2’de belirtilmiştir [22].

Tablo 2.2: Yüksekliğe göre kullanılacak kanal sayısı.

Zemin Seviyesinin Üstündeki Bina Yüksekliği (m)	Kullanılacak Minimum Kanal Sayısı
105-155	16
156-205	24
> 205	32

Yönergede YSİ sisteminde kullanılacak ivmeölçerlerin asgari özellikleri Tablo 2.3.teki teknik özellikleri sağlayacak şekilde belirtilmiştir [22].

Tablo 2.3: Kullanılacak ivme ölçer özellikleri

Dinamik Aralık	> 144 dB+
Frekans Aralığı	0.01 – 200 Hz
Gürültü Seviyesi	< 1 µg RMS
Ölçüm Aralığı	+/- 2g

Ayrıca yönergede YSİ ile izlenen yapının dinamik ve statik izleme esasları, verilerin elde edilme kuralları ve verilerin YSİ sistemini kuran kurum tarafından belli bir periyotta AFAD'a sunulacak raporun içerikleri belirtilmiştir [22],[23].

Dr.Mehmet Çelebi'nin USGS (Birleşik Devletler Jeoloji Araştırmaları Kurumu) için hazırladığı, yapıların sismik cihazlandırılmasının yapılması (Seismic Instrumentation of Buildings) isimli bir çalışması bulunmaktadır [24].



3. YÖNTEM

3.1. Mevcut Yapılarda YSİ ile Veri Analizi Yöntemleri

Yapıda dinamik etkiler altında oluşan tesirlerini belirlemek, statik etkiler altında oluşan tesirlerinin belirlenmesine kıyasla daha zor ve karmaşık işlemler barındırır. Yapının maruz kaldığı dinamik etkilere, deprem, rüzgâr ve kıyı dalgaları gibi dış titreşim kaynakları örnek verilebilir. Özellikle tınlaşım gibi hedeflenen dayanıma ulaşmadan göçme etkisi oluşturan parametreler, dinamik etkilerin statikçe idealize edilmemesi gerektiğini, yıllar içerisinde bize öğretmiş ve mühendislik alt disiplinleri içerisindeki yeri önem kazanmıştır. Böylelikle deprem etkileri statik olarak idealize edilmeden, yapının dinamik karakteristiğine göre yapının sergileyeceği yapı davranışları irdelenmelidir. Yüksek yapı ve uzun köprüler gibi periyodu, rüzgâr hâkim periyoduna yaklaşan yapılarda yine dinamik özelliklere göre statik olmayan çözümler belirlenmektedir. Yapının dinamik özelliklerini doğru bir şekilde belirlemek, dinamik etkilerin yapıda oluşturacağı tesirlerin hassasiyetini artırmak adına önem kazanmaktadır. Teorik modal analizde, $[m]$ yapı kütlesi, $[k]$ yapı rijitliği, $[c]$ sönüm oranı hareket denklemi yardımıyla çözülür. Yapının modları öz değer ve öz vektörleri bulunur. Buna göre mod şekilleri ve mod frekansları gibi dinamik karakteristikleri belirlenir. Fakat bu denklemde girdi olarak kabul edilen değerler, bir takım idealize ve varsayımlara dayanır. Yapı için kütlenin kat seviyelerinde topaklanması, sönümün yapı türleri için sabit varsayılması, rijitliğin tüm sistem boyunca homojen olduğunun kabul edilmesi bu varsayımlara başlıca örnektir. Bunun yanı sıra imalat esnasında hatalı üretimlerinin kaliteye etkisi veya mevcut yapının hasar almış elemanlarının plastik mafsallık özelliği göstermesi rijitlik matrisinde değerleri değiştiren durumlardır. Daha önceki bölümlerde de anlatıldığı gibi, operasyonel modal analiz, yapıdan kaydedilen titreşim verilerinden, FDD (frekans tanım alanında ayrıştırma), EFDD (iyileştirilmiş frekans tanım alanında ayrıştırma), CFDD (eğri uydurma frekans tanım aralığında ayrıştırma) işlemleri sonucunda dinamik özellikleri elde edilir. Yapının kesit, malzeme ve sönüm bilgileri olmaksızın dinamik karakteristikleri bu şekilde elde edilir. Operasyonel modal analizin, teorik modal analize göre en üstün özelliği tümdengelim işlem algoritmasına sahip olmasıdır. Dolayısıyla OMA, mevcut belirsizliklerden teorik modal analizi gibi etkilenmektedir ve elde edilen sonuçlar

gerçeğe çok daha yakındır. Bilgisayar ortamında hazırlanan sonlu elemanlar modelinin, OMA sonuçlarına göre güncellenmesi matematiksel modelin hassasiyetini artıracaktır.

3.2.Sonlu Elemanlar Modelinin Güncellenmesi

Sonlu elemanlar modelinin, çevresel titreşimlerinden oluşan veri setlerin, sistem tanılama algoritmalarıyla elde edilen dinamik parametrelere göre güncellenmesi, Sonlu eleman modelinden elde edilecek sonuçların daha hassas olmasına katkı sağlar. Ayrıca deprem etkisi altında sergileyeceği gerçek yapı davranışının tespit edilmesine olanak sağlamaktadır. Modal güncellemede esas amaç, yapı tanılama sonuçlarından elde edilen mod frekansları ve mod şekillerine karşılık gelen sayısal modelden elde edilen sonuçların arasındaki farkları en aza indirmektir. Modal güncellemedeki genel prensip Young Modülü (Elastisite modülü) azaltmak ve/veya zemin özelliklerinden kaynaklanan yataklanma katsayısını değiştirmektir. Yapı-Zemin etkileşiminin sonlu elemanlar modelinde tanımlanması, yapının gerçek davranışına yaklaşmasında etkili bir etkidir. Bunun başlıca iki nedeni, zemin tanımlı modellerde davranışın yumuşatılmasıdır. Bir diğer nedeni ise zemin olmadan kurulan sonlu eleman modellerinde, özellikle alt kat seviyelerinde yüksek deprem taleplerinin oluşmasıdır. Yapı-zemin etkileşiminin yapıyı daha iyi temsil edecek şekilde modellenmesinin ardından, güncelleme parametresi olarak Young Modülü ana değişken olarak kabul edilebilir. Çevresel titreşim ve deprem etkisi altında yapının rijitliliği farklılık göstermektedir. Performans bazlı değerlendirme yapılan durumlarda, doğrusal matematiksel model kullanılıyorsa sistem tanılamadan elde edilen rijitlik değerleri kullanılmalıdır. Doğrusal olmayan modellemenin kullanılması ve sistemde oluşacak hasarları temsil edecek plastik mafsalların tanımlanması, güncellenen modelin performans değerlendirmesinde daha doğru sonuçlar verecektir. Zemin-yapı etkileşimi ve young modülüne alternatif olarak dinamik karakteristiği doğrudan etkileyen yapı kütlelerinin değiştirilmesi de bir başka parametre olarak kullanılabilir. Bu parametrelerin bağımsız veya birlikte kullanılmasına, mühendislik ön görüşüyle karar verilmelidir. Modal güncelleme sonucunda matematiksel modelle sistem tanılama sonuçları arasındaki farkları azaltılması aşamasında, kıyaslanacak dinamik karakteristikler modal frekanslar ve mod şekilleridir. Bunun yanı sıra sistem tanılama

sonuçlarından elde edilecek modal sönüm oranların güncellenmesi de matematiksel modelin gerçek yapıyla olan farkını en aza indirecektir. Başarılı bir şekilde güncellenecek matematiksel model doğrusal olmayan analizler için önemli bir temsiliyet sağlayacaktır [25].

3.3. MAC Tablosunun Elde Edilmesi

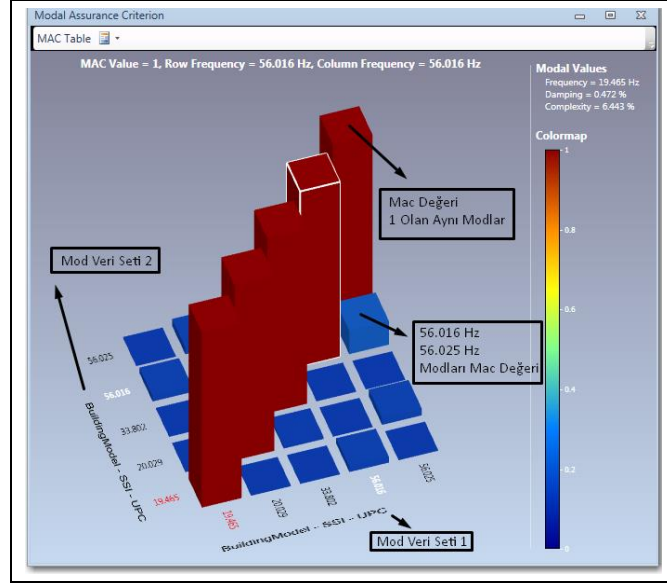
Artemis Modal programında, yapının doğrusal olmayan davranışı, veri setlerindeki hâkim gürültüler ve veri setlerinin yetersiz olmasından dolayı, operasyonel modal analiz sonucunda, bir birine yakın modlar elde edilebilir. Sayısal olarak birbirine yakın elde edilen modal frekansların, fiziksel olarak aynı olması mümkün değildir. Çünkü modlar birbirinden bağımsız olmalıdır. Bu durumda yapının gerçek modlarının doğrulanması gerekir. Modların doğrulanması için Modal Assurance Criteria (MAC-Modal Güvence Kriteri) kullanılır. MAC işleminin ana amacı yinelenen modları tespit etmektir. MAC işlemi denklem 3.1.'de matematiksel olarak hesaplanır.

$$MAC_{rs} = \frac{|\{\psi_r\}^T \{\psi_s^*\}|^2}{\{\psi_r\}^T \{\psi_r^*\} \{\psi_s\}^T \{\psi_s^*\}} \quad (3.1)$$

Denklem 3.1. anlaşılaçağı üzere aynı modların MAC değerleri 1 çıkacaktır. Uyumlu modlar için MAC değerleri 0.9 değerini aşarken, farklı modlar için bu değerler 0.05 mertebelerine kadar düşebilir. Şekil 3.1.'de Artemis yazılımının örnek bir MAC tablosu ve Şekil 3.2.'de bu değerler ile görselleştirilmiş yine Artemis yazılımına ait MAC grafiğı bulunmaktadır.

	19.465 Hz	20.029 Hz	33.802 Hz	56.016 Hz	56.025 Hz
19.465 Hz	1	0.004	0.002	0.03	0.003
20.029 Hz	0.004	1	0.013	0.004	0.039
33.802 Hz	0.002	0.013	1	0.004	0.001
56.016 Hz	0.03	0.004	0.004	1	0.135
56.025 Hz	0.003	0.039	0.001	0.135	1

Şekil 3.1: Örnek çalışmaya ait MAC değerlerinin tablosu.



Şekil 3.2: Örnek çalışmaya ait MAC değerlerinin görselleştirilmiş grafiği.

Örnekte elde edilen MAC değerlerinden modların farklı olduğu gözlemlenebilmektedir. Birbirine yakın değerlere sahip olan dördüncü mod (56.016 Hz) ve beşinci mod (56.025 Hz) frekanslarının, MAC değeri 0.05 değerinin üzerinde çıkmıştır. Böylelikle yazılımda tekrarlanan modlar belirlenebilir [24],[26],[27].

MAC değerleri Artemis Modal programı dışında literatürde bu şekilde değerlendirilmemektedir. MAC (modal güvence kriteri) ile, deneysel verileri sayısal verilerin uyumluluğuyla değerlendirmek, daha doğru bir kullanımdır.

3.4. Operasyonel Modal Analiz

Operasyonel modal analiz, tetikleyici kuvvetten titreşimlerinden bağımsız olarak yapıdan kaydedilen tepki titreşim veri setleri ile yapılır. Kaydedilen veriler, yapısal ölçekte anlam içermeyen frekans içeriğini elimine etmeye yönelik, bandpass yöntemiyle 0.1 Hz-10 Hz aralığında filtrelendirir. Operasyonel modal analizde dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde, frekans alanında bir metot olan, Frequency Domain Decomposition (Frekans Alanında Ayırıklaştırma) oldukça etkili bir yöntem olarak kullanılır. FDD (FAA) yönteminde, dinamik karakteristikleri belirlenmesi, tepe noktalarının seçimiyle yapılır. Bu yöntemle birbirine çok yakın modlar, yüksek seviyede gürültü muhtevası içerse dahi elde edilebilir. FDD (FAA) yöntemi, etki yanıt

fonksiyonunun Fourier dönüşümü (frekans yanıt fonksiyonu) yerine, sinyallerin Power Spectral Density (Güç spektral yoğunluğunu) kullanır.

FDD metodunun arkasındaki kavram, sistem tepkisini her bir mod için tek serbestlik dereceli sistemler (SDOF) kümesi olarak ifade etmektir. Ayırıştırma işlemi, doğrudan spektral yoğunluk matrisinin tekil değer ayrıştırmasına dayanır, burada tekil değerler, tek serbestlik dereceli sistemlerinin oto-spektral yoğunluğunun tahminleridir. Dolayısıyla tekil vektörler, mod şekillerinin tahminleridir. FDD metodu kolay ve hızlı tanılama algoritmalarına dayanır. Bu metotta sadece tek bir frekans hattından bilgi kullanıldığından sönümleme bilgisi elde edilememektedir.

EFDD (Enhanced Frequency Domain Decomposition- Geliştirilmiş Frekans Alanında Ayırıştırma) metodu FDD metodunun geliştirilmiş bir uzantısıdır. EFDD metodunda, bir rezonans tepe noktası etrafında tanımlanan Tek serbestlik dereceli sistem fonksiyonu, ters ayırık Fourier dönüşümü kullanılarak zaman alanına geri alınır. Doğal frekans, sıfır geçişlerin sayısının zamanın bir fonksiyonu olarak belirlenmesi ve buna karşılık gelen TSDS normalleştirilmiş otomatik korelasyon fonksiyonunun logaritmik azalma sönümlenmesiyle elde edilir. TSDF fonksiyonu, MAC'e dayalı bir korelasyon analizinde, referans vektör olarak önceki FDD tepe noktası seçme tekniğiyle belirlenen şekil kullanılarak tahmin edilir. Rezonans tepe noktası etrafındaki her frekans hattı için, referans FDD vektörü ile tekil vektör arasında bir MAC değeri hesaplanır. MAC değeri, kullanıcı tarafından belirlenen bir MAC reddetme değerinin üstündeyse, karşılık gelen tekil değer TSDF fonksiyonuna açıklamasına dahil edilir. FDD metoduyla karşılaştırıldığında, EFDD tekniği sönümleme tahminlerini de içerir ve daha gelişmiş bir doğal frekans ve mod şekli tahmini verir.

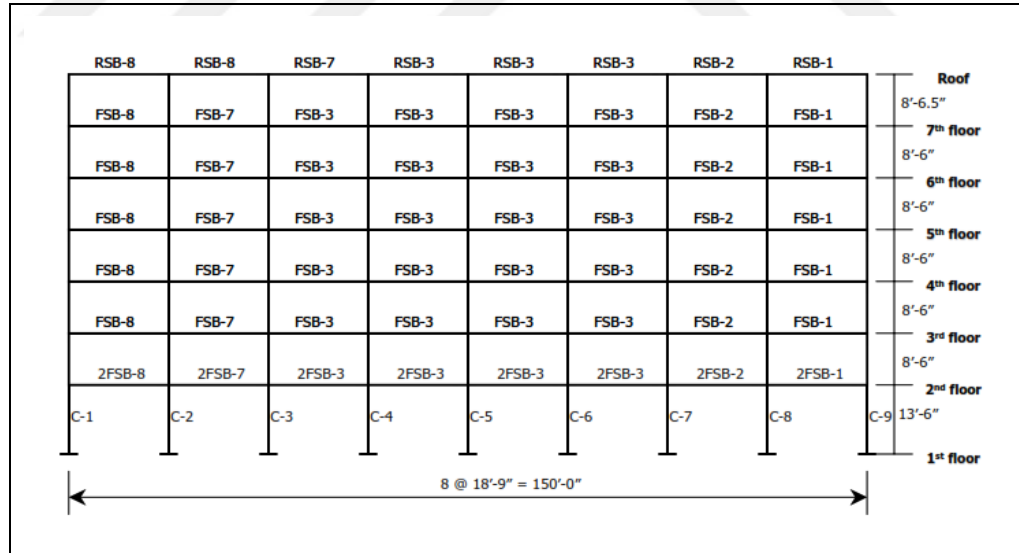
CFDD (Curve-fit Frequency Domain Decomposition / Eğri Uydurma Frekans Alanında Ayırıştırma) metodu, EFDD metodunun bir uzantısıdır. Her iki metod da mod şekillerini aynı şekilde bulur. Her iki metod da sönümleme tahminini ve doğal frekansların ve mod şekillerinin gelişmiş tahminini içerir. İki teknik arasındaki temel fark, doğal frekansları ve sönümlemeyi nasıl tahmin ettikleridir; EFDD metodu, zaman alanı yöntemlerini kullanırken, CFDD metodu frekans alanında tahmin edilen TSDS fonksiyon eğrisini uydurma yöntemini kullanır. Kısa süreli kayıt sürelerinden veya belirgin sinyallerden kaynaklanan tekil değer ayrıştırmaları gürültülü olmaktadır. Bu tarz kayıtlarda CFDD metodu, EFDD metodundan daha üstündür [26],[28],[29].

4. ANALİTİK ÇALIŞMA

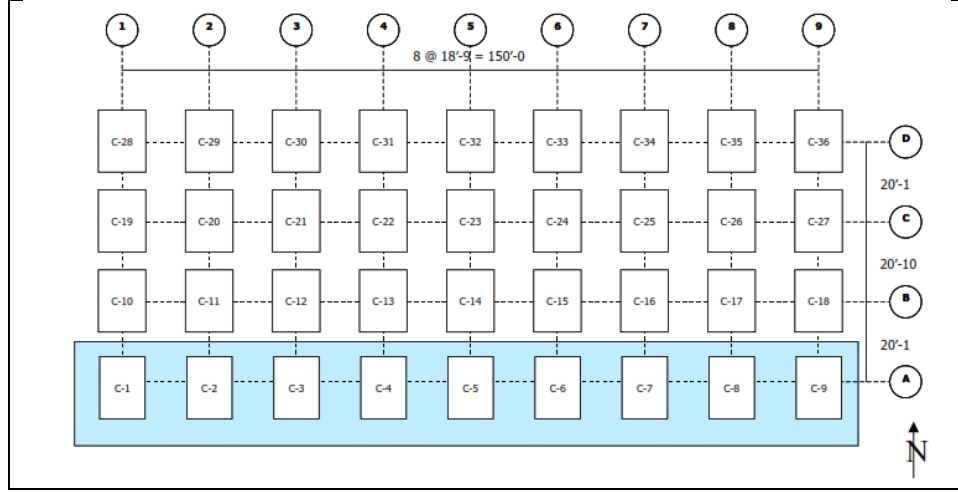
Bu bölüm güçlendirilmiş betonarme bir binanın yapısal sağlık izleme sistemleriyle dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi ve değerlendirilmesi ile ilgili olan analitik çalışmanın içeriğini, yöntemlerini ve elde edilen verileri içermektedir.

4.1. Çalışılan Bina Hakkında Bilgiler

Van Nuys, California’da bulunan 7 katlı, yerinde döküm betondan imal edilmiş, 6200 m² oturum alanına sahip bir yapıdır. Çerçeve modeli moment aktaran birleşimden oluşmaktadır. Yapıda çevrede tamamen, içlerde ise bazı yerlerde kiriş bulunmasına rağmen genel itibarıyla kirişsiz döşemeden oluşmaktadır. Birinci kat yüksekliği 4.11 metre, üst katların yüksekliği 2.59 metredir. Aks açıklıkları Şekil 4.1 ve Şekil 4.2.’deki gösterildiği gibi uzun doğrultuda 8 X 7.715 metre kısa doğrultuda 3 X 6.121 metredir [4].



Şekil 4.1: Van Nuys Otel binası kesit görünüşü.



Şekil 4.2: Van Nuys Otel binası kolon yerleşim planı.

İçeride kalan kolonların boyutları yaklaşık 45 X 45 cm, dış kolonların boyutları ise 50 X 35 cm'dir. Dış çerçeve kirişlerinin boyutları yaklaşık olarak 76 X 40 cm ve 55 X 40 cm'dir. Döşeme kalınlıkları 2. Katta yaklaşık 25 cm, daha üst katlarda ise yaklaşık 21 cm'dir. Yapının altındaki temel grup kazıklardan oluşmaktadır, yapı sınır şartları tamamen ankastre kabul edilmiştir. Yapı farklı aşamalarda imal edilmiştir, bu nedenden ötürü farklı beton sınıfları kullanmıştır. Yapı kolonlarının beton tasarım dayanımı 1. Katta 34.47 MPa, 2. Katta 27.57 MPa, 3. Kattan çatı katına kadar 20.68 MPa'dır. Yapı kiriş ve döşemelerinin beton tasarım dayanımı 1. Katta 27.57 MPa, 2. Kattan çatı katına kadar olan katlarda ise 20.68 MPa'dır [4].

Van Nuys Otel yapısı 1965 yılında "Los Angeles City Building Code / 1964" şartnamesine göre sünek detaylandırma şartları olmadan tasarlanmıştır. Yapıda deprem perdeleri bulunmamaktadır. Yapı 1966 yılında inşa edilmiştir. Yapı inşa edildiğinden beri bir takım deprem etkilerine maruz kalmıştır. 1971 yılında merkez üssü 20 km uzaklıkta olan San Fernando M6.6 depreminde yapıda hafif hasarlar meydana gelmiştir. 1994 yılında merkez üssü 4.5 km uzaklıkta olan Northridge (1994) M6.7 depreminde yapıda ağır hasarlar meydana gelmiştir. Northridge (1994) depreminden sonra yapı, betonarme perde duvarlar eklenerek Şekil 4.3.'teki gibi depreme karşı güçlendirilmiştir [4].



Şekil 4.3: Van Nuys Otel Binası güçlendirme amaçlı cephelere eklenen betonarme perdeler.

Yapıda iç aksta, doğu cephesinde ve batı cephesinde kısa doğrultuda (y doğrultusunda) mimariye olumsuz etki etmeyecek şekilde güçlendirme perdeleri eklenmiştir. Yapının bu güçlendirmelere ait güncel resimler Şekil 4.4. , Şekil 4.5. ve Şekil 4.6.’daki gibidir.



Şekil 4.4: Yapının günümüzdeki doğu ve batı cephesi görünümüleri.



Şekil 4.5: Yapının günümüzdeki kuzey cephesi görünümü.



Şekil 4.6: Yapının günümüzdeki güney cephesi görünümü.

4.2. Binanın Yapısal Modeli

Northridge (1994) depreminden sonra ağır hasar alan Van Nuys Binası, yapıya deprem perdeleri eklenerek güçlendirilmiştir. Yapının güçlendirme öncesi ve sonrası modelleri CSI SAP2000 sonlu elemanlar paket programı ile modellenmiştir. Farklı katlardaki farklı beton sınıfları için Elastisite modülleri ACI318-19'a göre Denklem 4.1.'deki gibi hesaplanarak matematiksel modelde tanımlanmıştır.

$$E_c = 4700 \sqrt{f_c} \text{ (MPa)} \quad (4.1)$$

Denkleme göre elde edilen beton sınıflarının Elastisite modüllerine ait değerler Tablo 4.1.'deki gibidir [4].

Tablo 4.1: Matematiksel model elastisite modülleri.

Basınç Dayanımı		Elastisite Modülü
(ksi)	(MPa)	(MPa)
5	34.47	27595
4	27.58	24682
3	20.68	21375

Matematiksel modele ait örnek bir malzeme tanımı Şekil 4.7.'de gösterilmiştir.

General Data

Material Name and Display Color: CONCRETE_5KSI_34.4738MPA

Material Type: Concrete

Material Grade:

Material Notes: Modify/Show Notes...

Weight and Mass

Weight per Unit Volume: 2.356E-05

Mass per Unit Volume: 2.403E-09

Units: N, mm, C

Isotropic Property Data

Modulus Of Elasticity, E: 27595.765

Poisson, U: 0.2

Coefficient Of Thermal Expansion, A: 9.900E-06

Shear Modulus, G: 11498.235

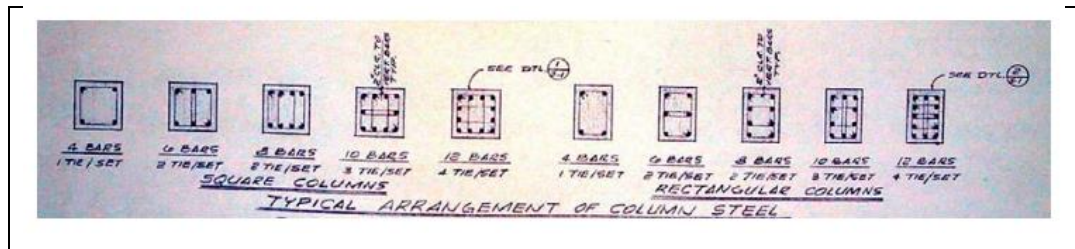
Other Properties For Concrete Materials

Specified Concrete Compressive Strength, f_c: 34.4738

Expected Concrete Compressive Strength: 34.4738

Şekil 4.7: SAP2000 malzeme tanımlanması.

Yapının malzeme özelliklerinin yanı sıra, yapıdaki taşıyıcı elemanların betonarme donatıları Şekil 4.8.'deki gibi tanımlanmıştır. Donatı malzeme özelliği A432-62T (Grade 60) olarak tanımlanmıştır [4].



Şekil 4.8: Tipik kolon donatı detayları.

Yapının sonlu elemanlar modelinde tipik bir kolona ait donatı değerleri Şekil 4.9. ve Şekil 4.10.'daki gibi tanımlanmıştır.

The screenshot shows the 'Reinforcement Configuration' dialog box for a column. The 'Reinforcement Configuration' section has 'Rectangular' selected. The 'Confinement Bars' section has 'Ties' selected. The 'Longitudinal Bars - Rectangular Configuration' section has 'Clear Cover for Confinement Bars' set to 25, 'Number of Longit Bars Along 3-dir Face' set to 4, 'Number of Longit Bars Along 2-dir Face' set to 4, and 'Longitudinal Bar Size' set to #9. The 'Confinement Bars' section has 'Confinement Bar Size' set to #3, 'Longitudinal Spacing of Confinement Bars' set to 300, 'Number of Confinement Bars in 3-dir' set to 4, and 'Number of Confinement Bars in 2-dir' set to 4. A preview diagram on the right shows a rectangular cross-section with 4 longitudinal bars on each of the 3 and 2 faces, and a tie configuration. The 'Properties' section on the right has 'Section Properties...' and 'Time Dependent Properties...' buttons.

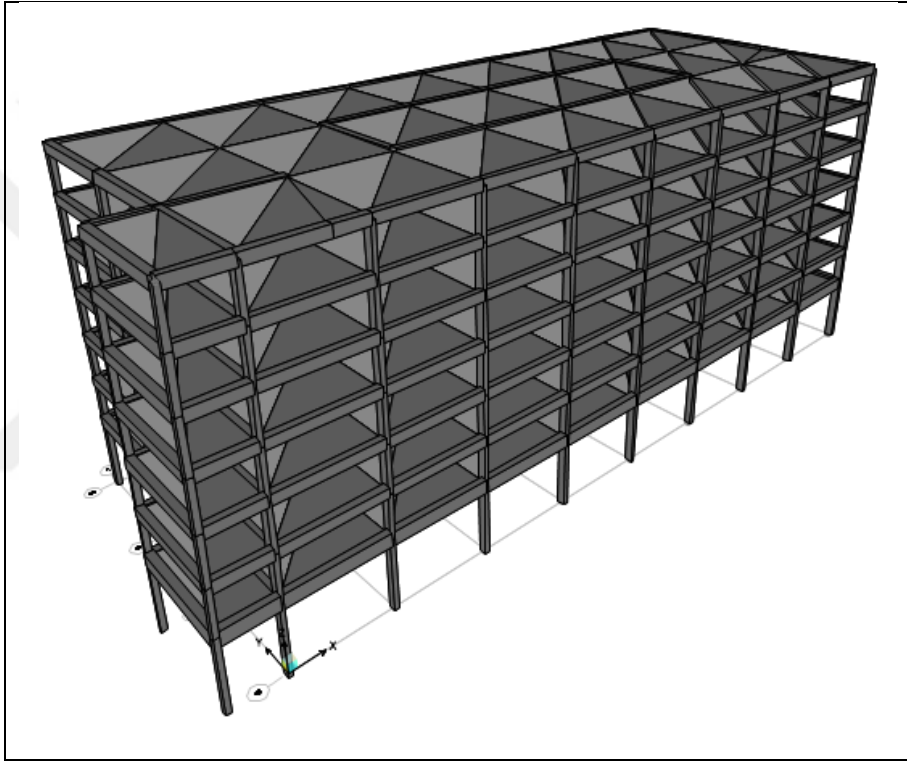
Şekil 4.9: SAP2000 kolon donatılarının tanımlanması 1.

The screenshot shows the 'Reinforcement Configuration' dialog box for a column, with the same settings as Şekil 4.9. The 'Reinforcement Configuration' section has 'Rectangular' selected. The 'Confinement Bars' section has 'Ties' selected. The 'Longitudinal Bars - Rectangular Configuration' section has 'Clear Cover for Confinement Bars' set to 0.025, 'Number of Longit Bars Along 3-dir Face' set to 3, 'Number of Longit Bars Along 2-dir Face' set to 5, and 'Longitudinal Bar Size' set to #9. The 'Confinement Bars' section has 'Confinement Bar Size' set to #3, 'Longitudinal Spacing of Confinement Bars' set to 0.3, 'Number of Confinement Bars in 3-dir' set to 4, and 'Number of Confinement Bars in 2-dir' set to 4. A preview diagram on the right shows a rectangular cross-section with 3 longitudinal bars on the 3-dir face, 5 on the 2-dir face, and a tie configuration. The 'Properties' section on the right has 'Section Properties...' and 'Time Dependent Properties...' buttons.

Şekil 4.10: SAP2000 kolon donatılarının tanımlanması 2.

4.2.1. Mevcut Yapının Modeli ve Özellikleri

Yapının ilk inşa edilmiş haline ait matematiksel model, yapıya ait belirtilen kolon, kiriş ve döşeme özelliklerine göre CSI SAP 2000 programında doğrusal malzeme özellikleri doğrultusunda modellenmiştir. Böylelikle yapının tasarım kabullerine göre teorik modal analiz sonuçlarına göre dinamik karakteristikleri belirlenebilmektedir. Mevcut yapının matematiksel modeline ait ekran görüntüsü Şekil 4.11.'deki gibidir.

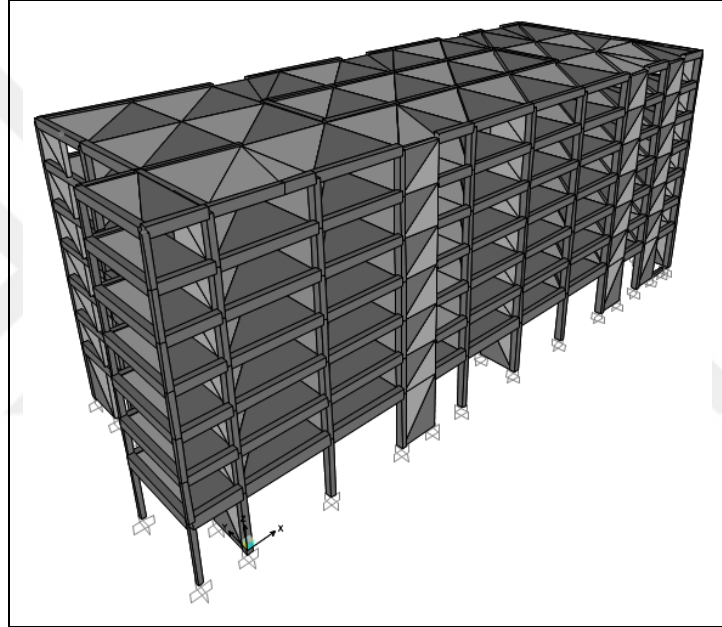


Şekil 4.11: Güçlendirilmemiş mevcut yapının SAP2000 modeli.

Matematiksel model sonucunda elde edilen dinamik veriler, deneysel modal analiz sonuçları ile elde edilen dinamik karakteristiklerine göre güncellenebilmektedir. Bunun yanı sıra matematiksel modelin, mevcut yapısal özelliklerini hangi mertebede temsil ettiği konusunda veriler sunmaktadır. Matematiksel modelin sağlamasının yapılması amacıyla, zemin katta sensörler tarafından, doğu-batı ve kuzey-güney doğrultusunda kaydedilen ivme verileri ile modele zaman tanım alanında analiz yapıp deplasman değerleri ile yapı davranışı irdelenmektedir.

4.2.2. Güçlendirmiş Yapının Modeli ve Özellikleri

Yapının Northridge (1994) depreminde hasar aldıktan sonra güçlendirilmiş haline ait matematiksel model, yapıya ait belirtilen kolon, kiriş, perde ve döşeme özelliklerine göre CSI SAP 2000 programında doğrusal malzeme özellikleri doğrultusunda modellenmiştir. Böylelikle güçlendirilmiş yapının tasarım kabullerine göre teorik modal analiz sonuçlarına göre dinamik karakteristikleri belirlenebilmektedir. Güçlendirilmiş yapının matematiksel modeline ait ekran görüntüsü Şekil 4.12.'deki gibidir.

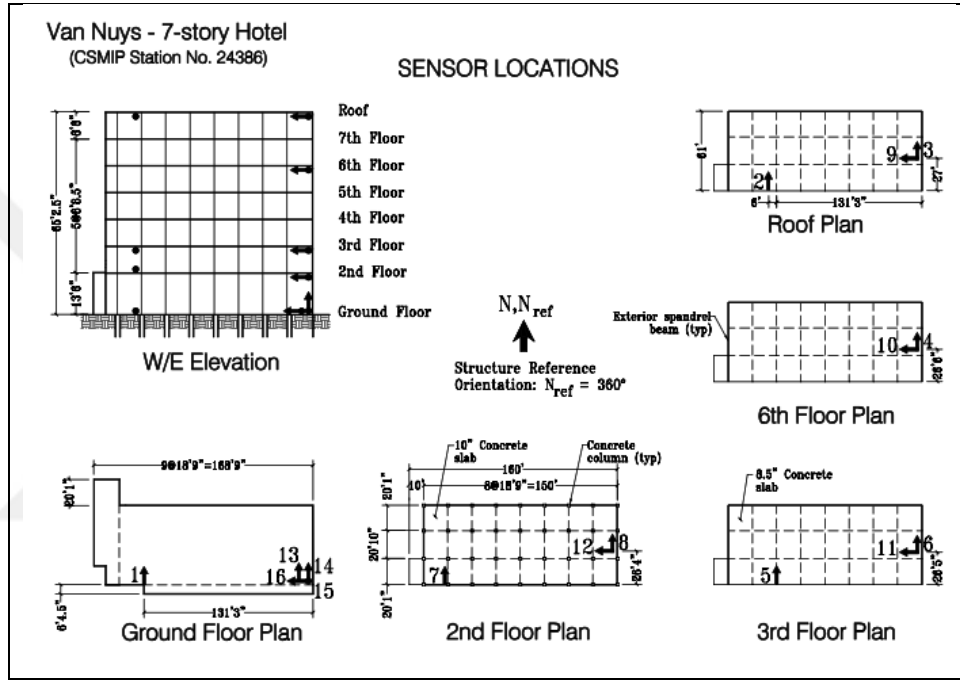


Şekil 4.12: Güçlendirilmiş yapının SAP2000 modeli.

Matematiksel model sonucunda elde edilen dinamik veriler, deneysel modal analiz sonuçları ile elde edilen dinamik karakteristiklerine göre güncellenebilmektedir. Bunun yanı sıra matematiksel modelin, mevcut yapısal özelliklerini ne mertebede temsil ettiği konusunda veriler sunmaktadır. Matematiksel modelin sağlamasının yapılması amacıyla, zemin katta sensörler tarafından, doğu-batı ve kuzey-güney doğrultusunda kaydedilen ivme verileri ile modele zaman tanım alanında analiz yapıp deplasman değerleri ile yapı davranışı irdelenmektedir.

4.3. Kaydedilen Titreşim Verilerinin Açıklanması

Van Nuys Otel binası bir sınaama ortamı yapısıdır. Bu yapının farklı katlarında farklı doğrultularda yapıya ait titreşim verilerini kaydeden 16 adet ivme sensörleri yerleştirilmiştir. Bu ivme ölçerler 11 farklı deprem süresince ivme verilerini kaydetmiştir. Bu ivme verileri CESMD web sitesinde arşivlenmektedir. İvme sensörlerinin yapıda yerleşimi Şekil 4.13.'deki gibidir [4].



Şekil 4.13: İvme sensörlerinin yerleşimleri.

Yapının hasar seviyesinin tahmin etmek için Van Nuys sınaama ortamında çalışan PEER araştırmacıları yapıya ait modal frekanslar, modal şekiller ve sönüm oranları gibi dinamik karakteristiklerini yapısal sağlık izleme yöntemiyle, sistem tanılama algoritmalarıyla belirlemeye çalışmaktadır. Bu çalışmada da sensörler, üç farklı depremden elde edilen ivme verileriyle, yapının dinamik karakteristikleri belirlenmektedir. Bahsedilen üç farklı aşama, güçlendirme öncesi Bigbear (1992) deprem ivme veri kayıtları, yapının hasar aldığı Northridge (1994) deprem ivme veri kayıtları ve yapının güçlendirme sonrası Encino (2014) deprem ivme veri kayıtlarıdır. Bu deprem kayıtlarından elde edilen ivme verilerinin teknik özellikleri alt başlıklarda açıklanmıştır.

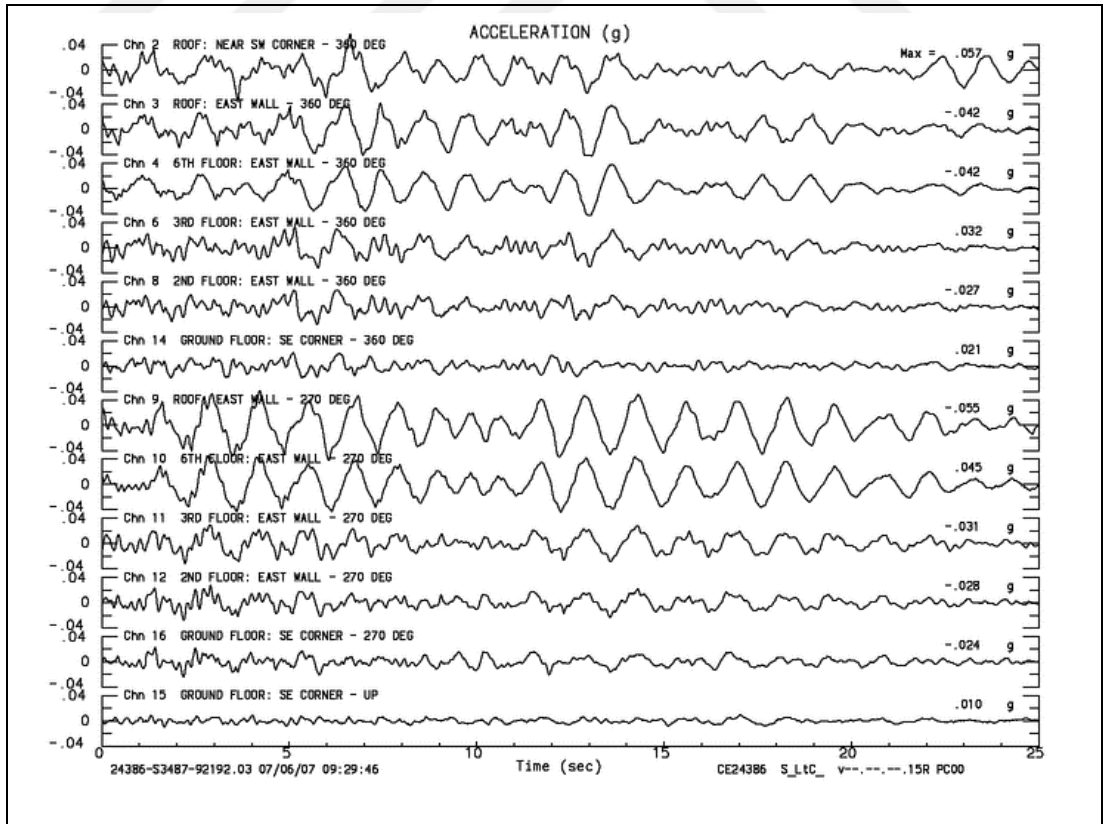
4.3.1. Birinci Ölçüm

Güçlendirme öncesinde meydana gelen Bigbear (1992) depreminden elde edilen ivme veri setleri CESMD arşivinden elde edilmiştir. Deprem esnasında tüm sensörler çalışmaktadır ve ivme verileri sağlıklı bir şekilde elde edilmiştir. Depreme ait teknik özellikler Tablo 4.2.'de gösterildiği gibidir.

Tablo 4.2: Bigbear (1992) depremi teknik özellikler.

Deprem Kaydı:	Bigbear (1992)	Yer Tepe İvmesi:	0.03 g
Merkez Üssü Uzaklık:	151.6 km	Yapı Tepe İvmesi:	0.06 g
Fay Mesafesi:	-	Büyüklik:	6.5Ml
Deprem Zamanı:	1992-06-28 15:05:31		

İvme veri setlerinin görselleştirilmiş hali Şekil 4.14.'teki gibidir [31].



Şekil 4.14: Bigbear (1992) depremine ait ivme veri seti.

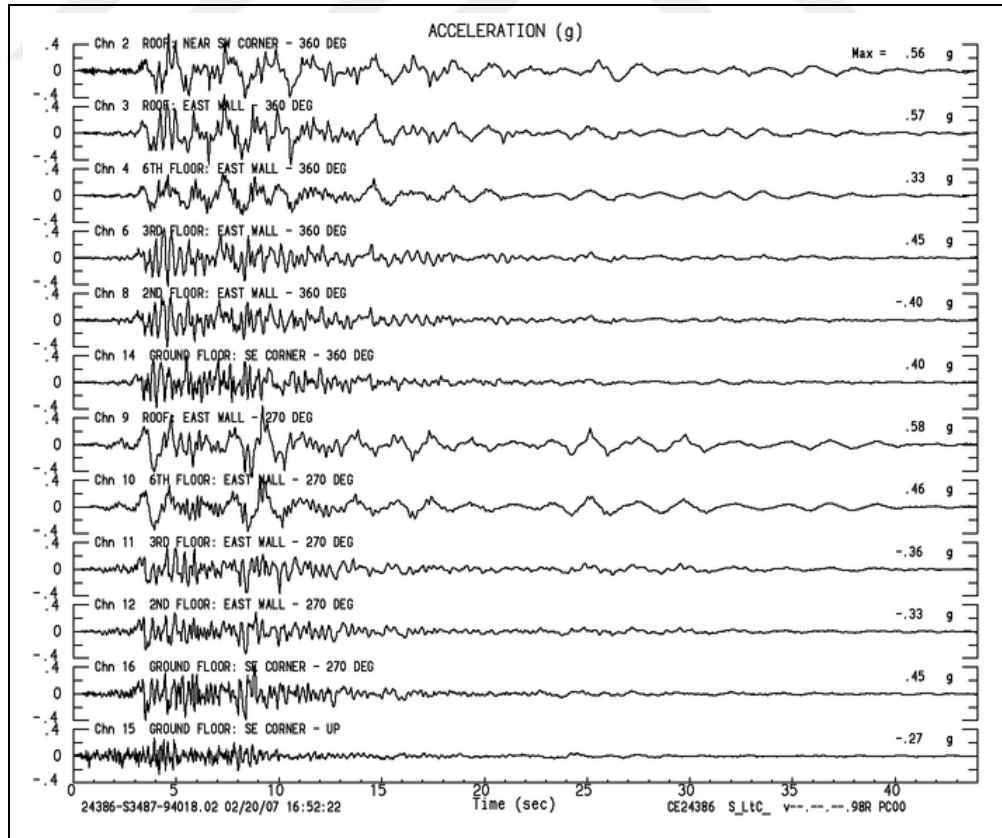
4.3.2. İkinci Ölçüm

Yapının ağır hasara uğradığı Northridge (1994) depreminden elde edilen ivme veri setleri CESMD arşivinden elde edilmiştir. Deprem esnasında tüm sensörler çalışmaktadır ve ivme verileri sağlıklı bir şekilde elde edilmiştir. Depreme ait teknik özellikler Tablo 4.3.'te gösterildiği gibidir.

Tablo 4.3: Northridge (1994) depremi teknik özellikleri.

Deprem Kaydı:	Northridge (1994)	Yer Tepe İvmesi:	0.47 g
Merkez Üssü	7 km	Yapı Tepe İvmesi:	0.59 g
Uzaklık:			
Fay Mesafesi:	1.7 km	Büyükölük:	6.4Ml
Deprem Zamanı:	1994-01-17 12:30:55		

İvme veri setlerinin görselleştirilmiş hali Şekil 4.15.'teki gibidir [31].



Şekil 4.15: Northridge (1994) depremine ait ivme veri seti.

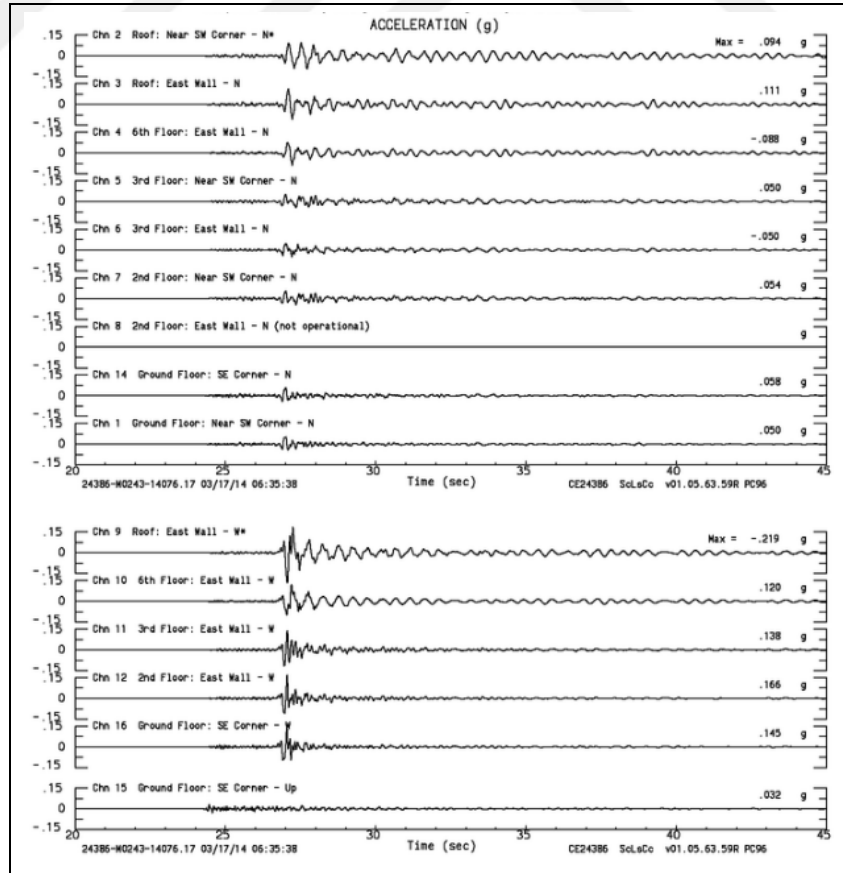
4.3.3. Üçüncü Ölçüm

Güçlendirme sonrasında meydana gelen Encino (2014) depreminden elde edilen ivme veri setleri CESMD arşivinden elde edilmiştir. Deprem esnasında sadece 14 sensörden ivme verileri sağlıklı bir şekilde elde edilmiştir. Depreme ait teknik özellikler Tablo 4.4.'te gösterildiği gibidir.

Tablo 4.4: Encino (2014) depremi teknik özellikleri.

Deprem Kaydı:	Encino (2014)	Yer Tepe İvmesi:	0.144 g
Merkez Üssü Uzaklık:	9.8 km	Yapı Tepe İvmesi:	0.219 g
Fay Mesafesi:	-	Büyüklik:	4.4Mw
Deprem Zamanı:	2014-03-17 13:25:37		

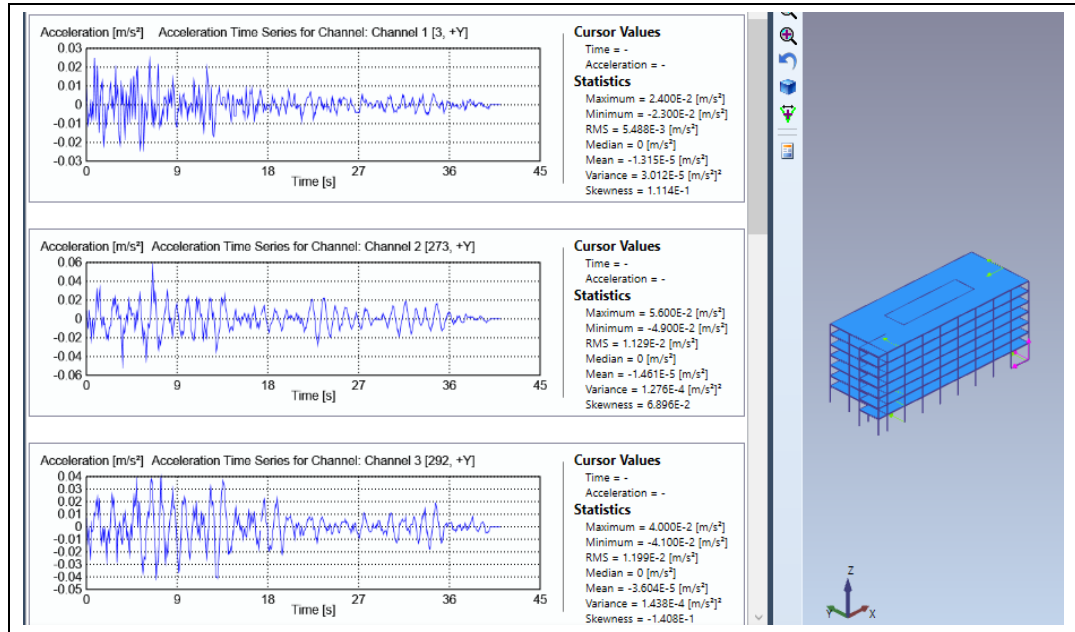
İvme veri setlerinin görselleştirilmiş hali Şekil 4.16.'daki gibidir [31].



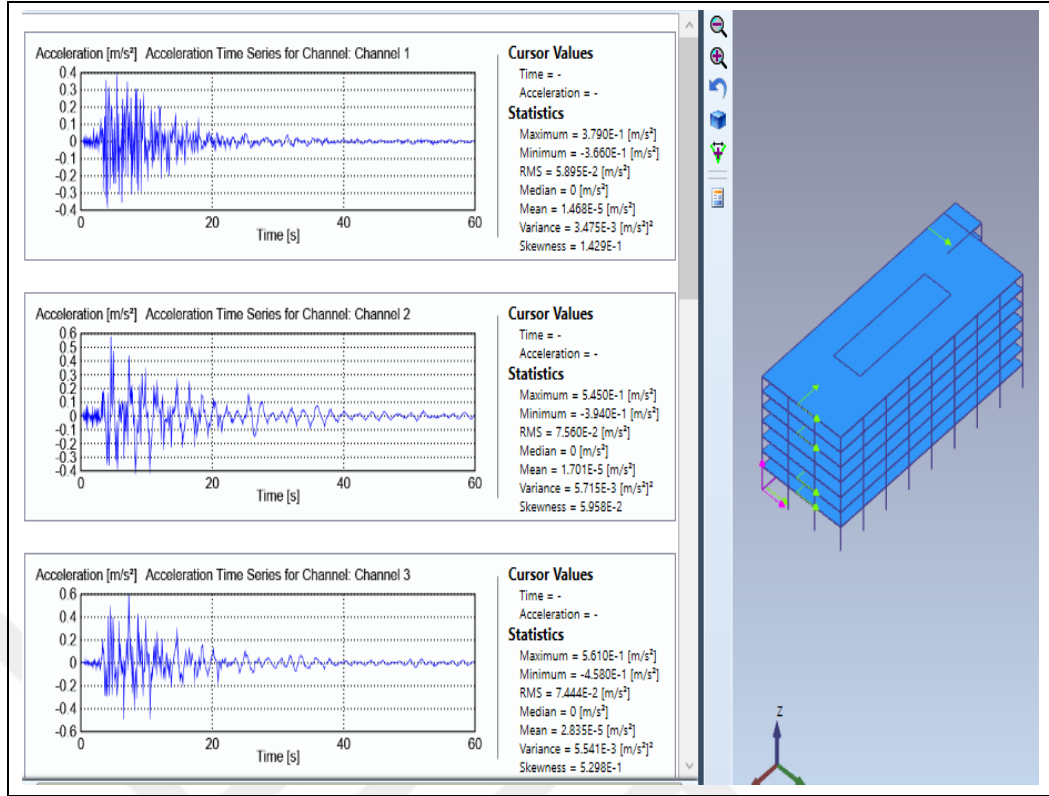
Şekil 4.16: Encino (2014) depremi ait ivme veri seti.

4.4. Yapının Titreşim Değerlerinin Elde Edilmesi

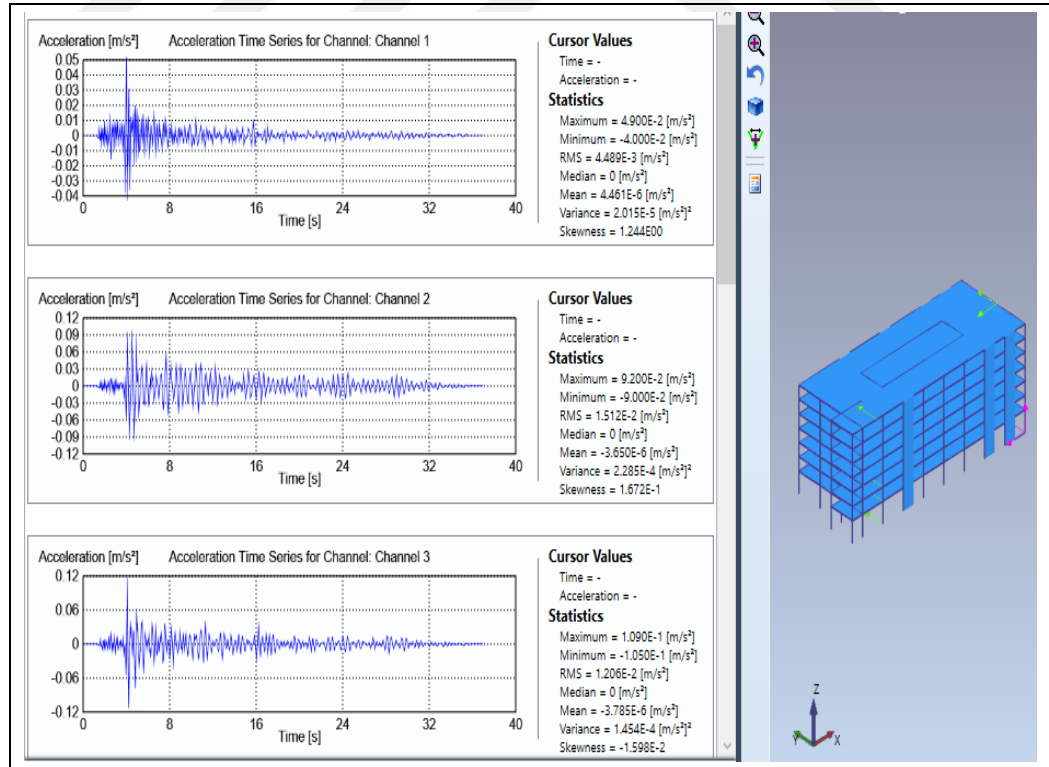
Yapıdan elde edilen titreşim veri setleri, Artemis Modal adlı yazılım ile sistem tanılama algoritmaları kullanılarak, yapıların dinamik özellikleri elde edilmektedir. Yazılım frekans alanında ayırıklaştırma, iyileştirilmiş frekans alanında ayırıklaştırma ve eğri-uydurma ile frekans alanında ayırıklaştırma metotlarını kullanarak, doğal frekanslar, sönüm oranları ve mod şekilleri gibi dinamik parametreleri belirleyebilmektedir. Yazılımda yapı geometrisi ve ivme veri setleri tanımlanmıştır. Bunun yanı sıra mod şekil faktörlerini elde edebilmek için düğüm ilişki eşitlikleri (slave nodes equations) tanımlanmıştır. Bu çalışma kapsamında üç farklı aşamada modeller oluşturulmuştur. Bu modeller sırasıyla, güçlendirme öncesi durum, yapının hasar aldığı durum ve yapı güçlendirme sonrası durum modellenmiştir. Frekans tanım alanında elde edilen grafiklerde, eğrinin zirve yaptığı değerler genel itibariyle frekansları işaret etmektedir. Zirve yapan değerlerde sağ ve sol tarafında yapılan bacalama işlemi ile de sönüm oranları elde edilebilmektedir. Yazılımdan zaman, frekans ve güç yoğunluğu ilişkisi spektogramlar ile görselleştirilebilmektedir. Böylelikle zamana bağlı frekans muhteviyatı incelenebilmektedir[4,27]. Şekil 4.17, Şekil 4.18. ve Şekil 4.19.'da Artemis Modal yazılımda hazırlanan modeller gösterilmektedir.



Şekil 4.17: Güçlendirme öncesi durumun Artemis modeli.



Şekil 4.18: Güçlendirme öncesi yapının hasar aldığı durumun Artemis modeli.



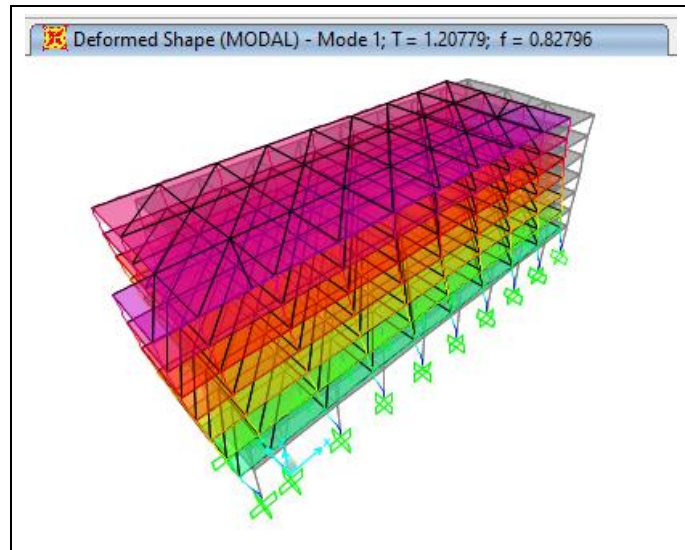
Şekil 4.19: Güçlendirme sonrası durumun Artemis modeli.

4.5. YSİ Ölçümlerin İstatistiksel Karşılaştırılması

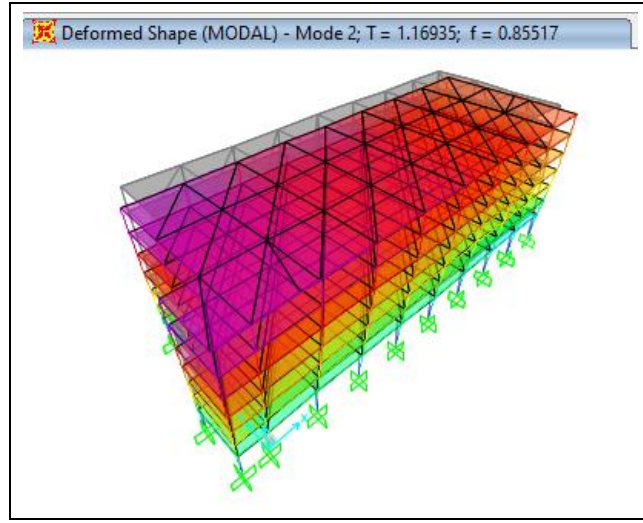
Güçlendirme öncesi durumda Bigbear (1992) depreminden elde edilen ivme verileri ile güçlendirme sonrası duruma karşılık gelen Encino (2014) depreminden elde edilen ivme verileri kullanılan model ile karşılaştırıldı. Sayısal modellerin görelî kat ötelenmeleri, etki kapasite oranları, yapı rijitliği özellikleri belirtilmiştir. Aynı şekilde modal güncelleme işlemleri yine bu depremlerin kullanıldığı modeller için yapılmıştır. Northridge (1994) depremi çalışılan modelde ise herhangi bir güncelleme işlemi yapılmamıştır. Yapı Northridge (1994) depreminde ağır hasar aldığı için sadece modal özellikleri ve zaman, frekans ve güç yoğunluğu grafiklerinden, periyod değişiklikleri dolayısıyla hasar alınan anlar yorumlanmaya çalışılmıştır.

4.5.1. Güçlendirilmemiş Yapının FEM ve SHM Sonuçları

Bu bölümde güçlendirme öncesi modelin, teorik modal analizden ve operasyonel modal analizden edilen frekans değerleri ve mod şekilleri sonuçları sunulmuştur. Güçlendirme öncesi durum için Bigbear (1992) deprem ivme setleri kullanılmıştır. Teorik modal analiz sonucunda 1. doğal titreşim modu Şekil 4.20.'de gösterildiği gibi 1.20 sn (0.82 Hz), 2. Doğal titreşim modu ise Şekil 4.21.'de gösterildiği gibi 1.16 sn (0.85 Hz) olarak elde edilmiştir.

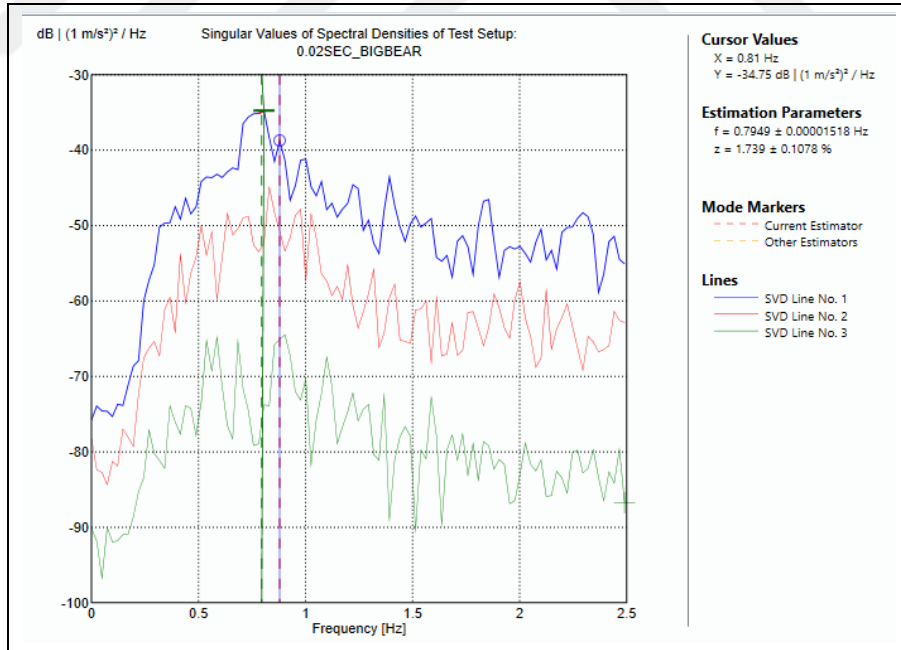


Şekil 4.20: Güçlendirme öncesi sonlu elemanlar modeli 1. modu.



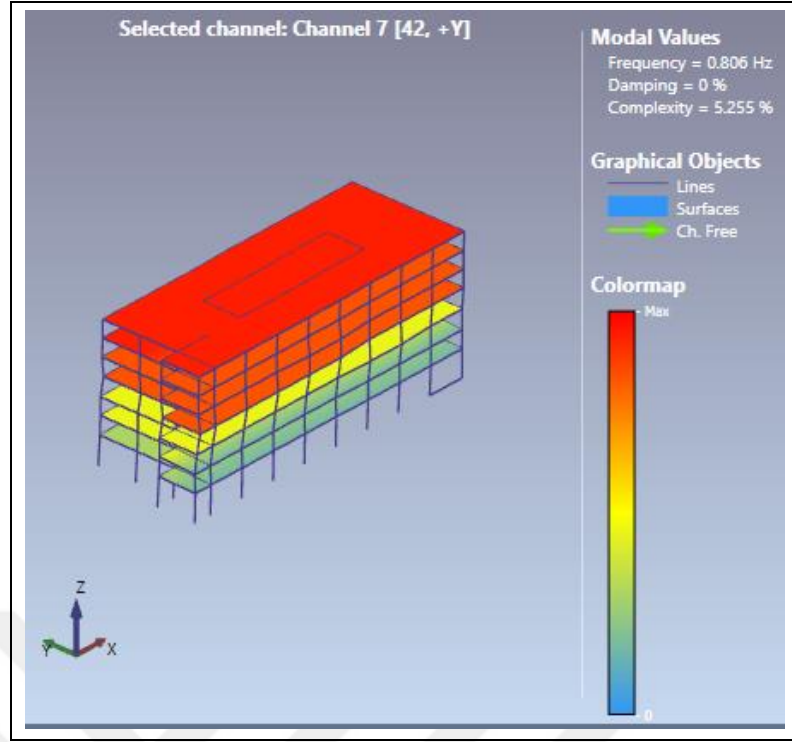
Şekil 4.21: Güçlendirme öncesi sonlu elemanlar modeli 2. modu.

Yapı sağlığı izleme metoduyla, Bigbear (1992) deprem kayıtları kullanılarak güçlendirme öncesi durum için, elde edilen spektral güç yoğunluğu grafiği Şekil 4.22.'deki gibidir.

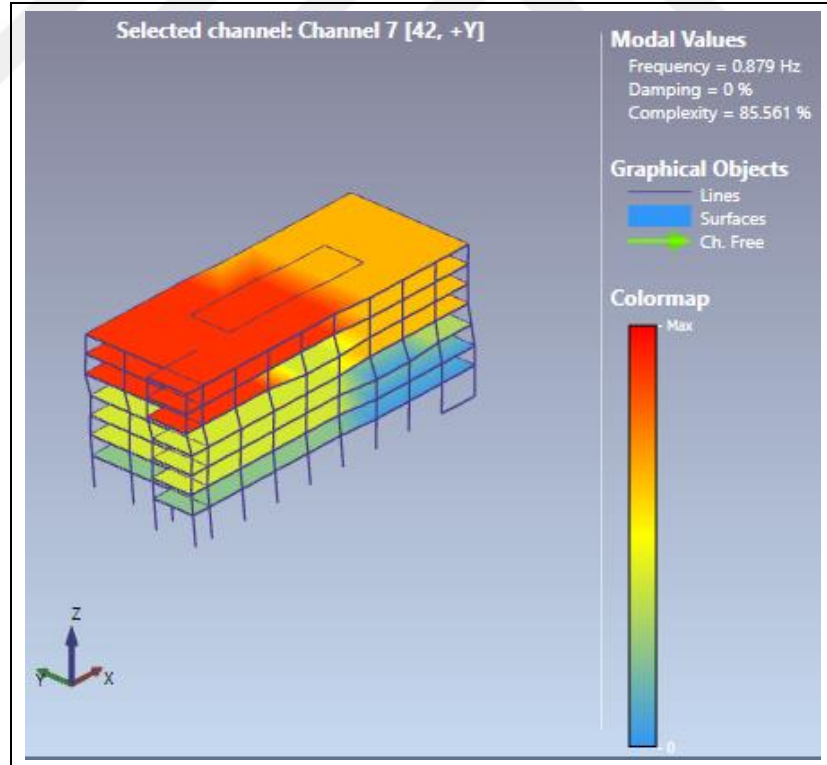


Şekil 4.22: Bigbear (1992) depremi yapı spektral güç yoğunluğu.

Deneyisel modal analiz sonucunda 1. doğal titreşim modu Şekil 4.23.'de gösterildiği gibi 1.24 sn (0.806 Hz), 2. Doğal titreşim modu ise Şekil 4.24.'de gösterildiği gibi 1.13 sn (0.879 Hz) olarak elde edilmiştir.



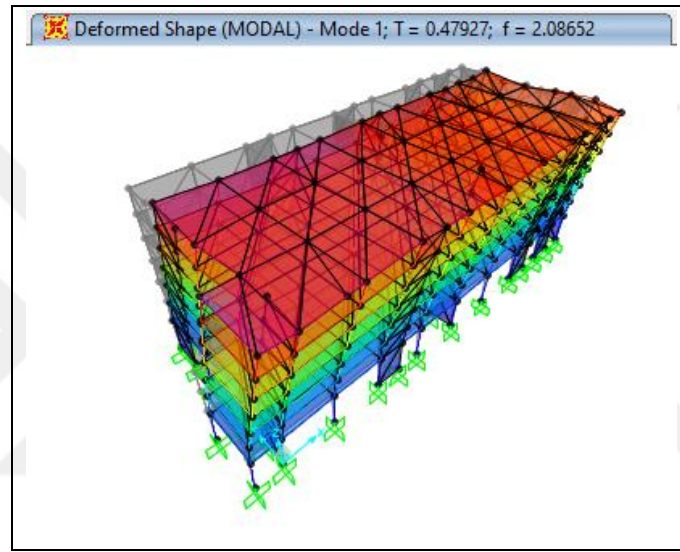
Şekil 4.23: Güçlendirme öncesi Bigbear (1992) depremi YSI 1.mod.



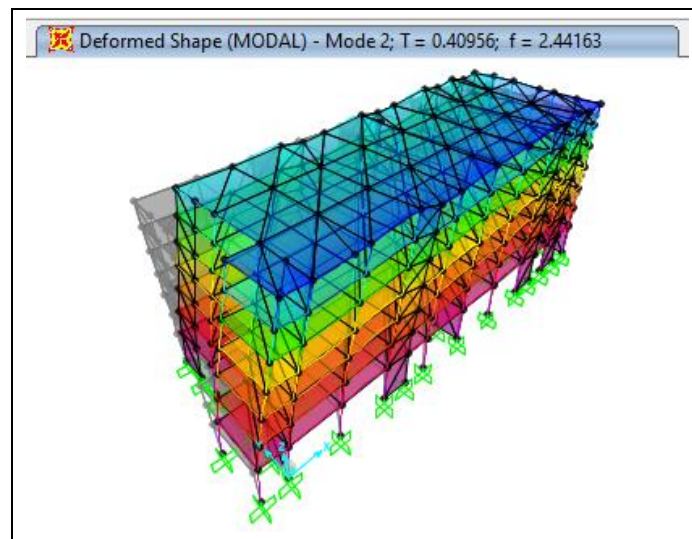
Şekil 4.24: Güçlendirme öncesi Bigbear (1992) depremi YSI 2.mod.

4.5.2. Güçlendirilmiş Yapının FEM ve SHM Sonuçları

Bu bölümde güçlendirme sonrası modelin, teorik modal analizden ve operasyonel modal analizden edilen frekans değerleri ve mod şekilleri sonuçları sunulmuştur. Güçlendirme sonrası durum için Encino (2014) deprem ivme setleri kullanılmıştır. Teorik modal analiz sonucunda 1. doğal titreşim modu Şekil 4.25.'te gösterildiği gibi 0.47 sn (2.08 Hz), 2. Doğal titreşim modu ise Şekil 4.26.'da gösterildiği gibi 0.40 sn (2.44 Hz) olarak elde edilmiştir.

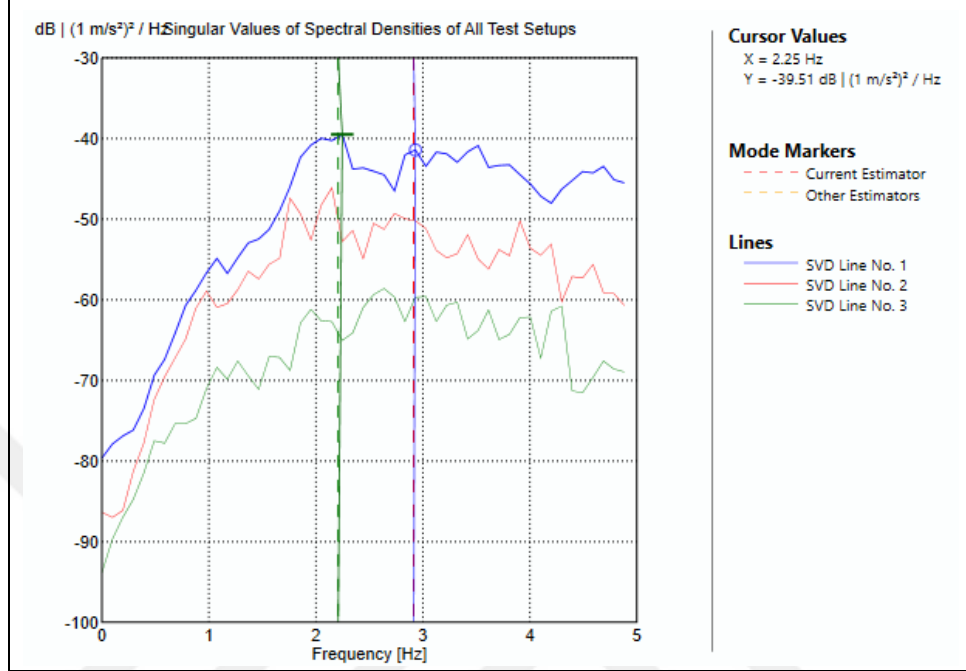


Şekil 4.25: Güçlendirme sonrası sonlu elemanlar modeli 1. modu.



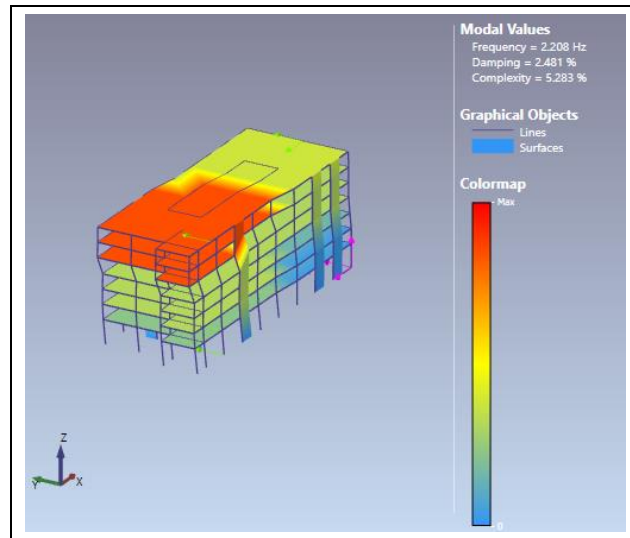
Şekil 4.26: Güçlendirme sonrası sonlu elemanlar modeli 1. modu.

Yapı sağılığı izleme metoduyla, Encino (2014) deprem kayıtları kullanılarak, güçlendirme sonrası durum için elde edilen spektral güç yoğunluğu grafiği Şekil 4.27.'teki gibidir.

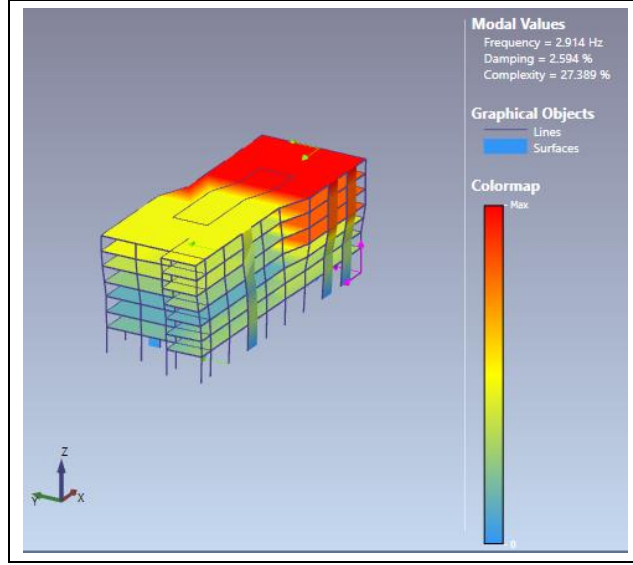


Şekil 4.27: Encino (2014) depremi yapı spektral güç yoğunluğu.

Deneyisel modal analiz sonucunda 1. doğal titreşim modu Şekil 4.28.'de gösterildiği gibi 0.45 sn (2.208 Hz), 2. Doğal titreşim modu ise Şekil 4.29.'da gösterildiği gibi 0.34 sn (2.914 Hz) olarak elde edilmiştir.



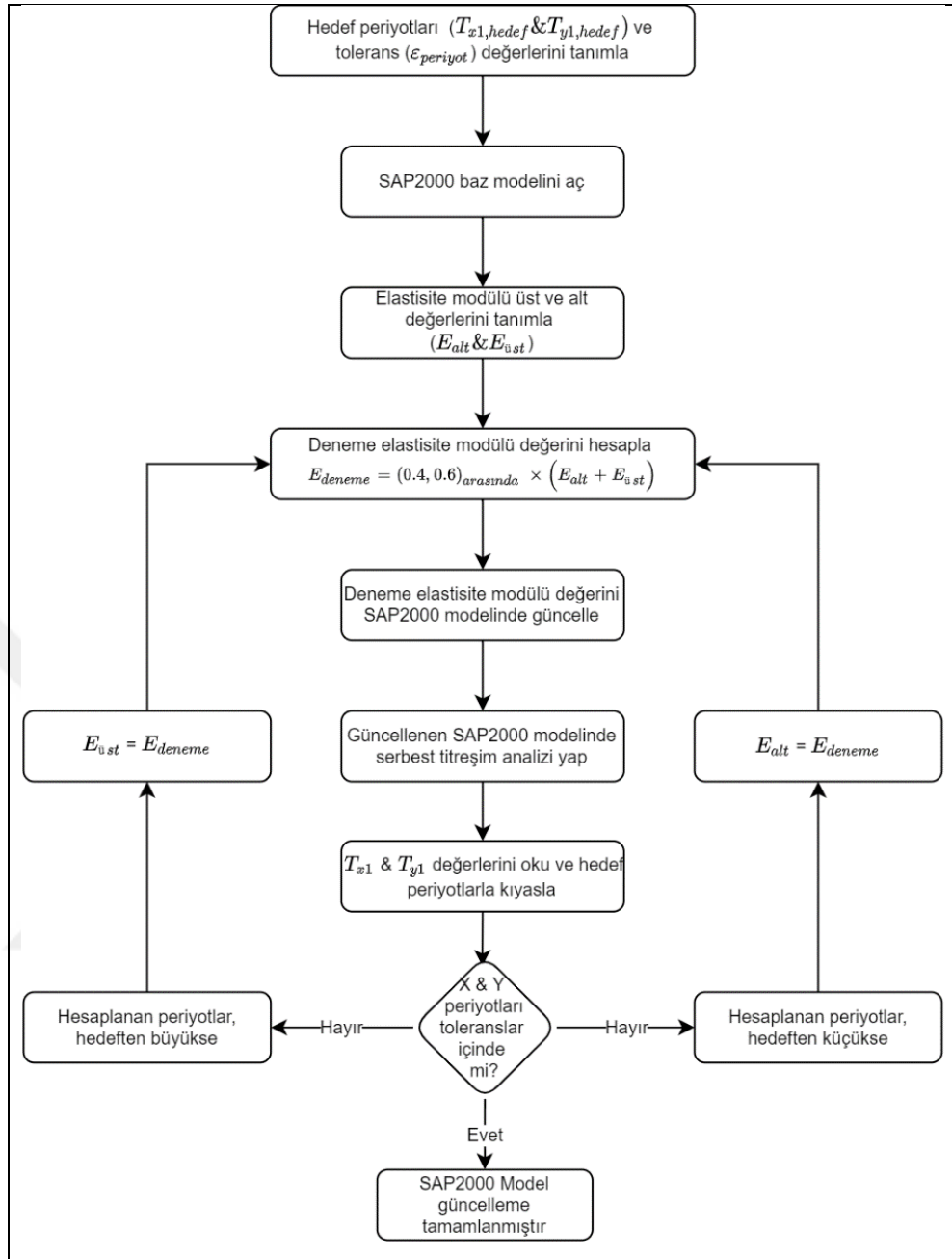
Şekil 4.28: Güçlendirme sonrası Encino (2014) depremi YSI 1.mod.



Şekil 4.29: Güçlendirme sonrası Encino (2014) depremi YSI 2.mod.

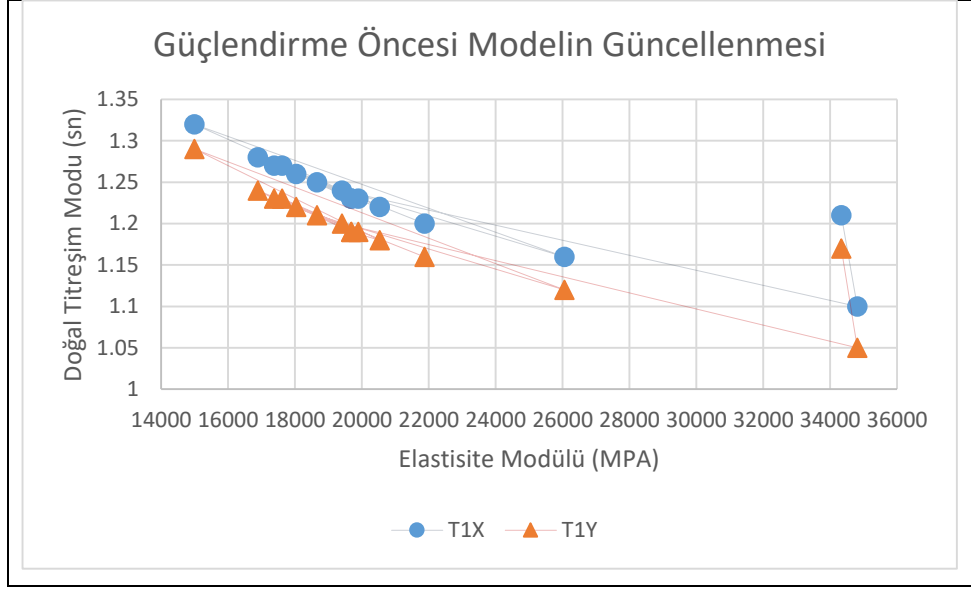
4.5.3. Güçlendirilmemiş Matematiksel Modelin Güncellenmesi

Betonarme perde eklenmemiş yapının matematiksel modeline ait birinci ve ikinci modlarına ait periyodları 1.20 Sn (0.82 Hz) ve 1.16 Sn (0.85 Hz)'dir. Sahada yapıdan elde edilen titreşim veri setlerinin, yapı sağlığı izleme sistemleri ile tanımlanması ardından elde edilen dinamik karakteristiklerine göre birinci ve ikinci modlarına ait periyodları 1.24 Sn (0.806 Hz) ve 1.13 Sn (0.879 Hz)'dir. Bu çalışma kapsamında matematiksel model sahadan elde edilen veriler ışığında modal olarak güncellenip, doğruluğu artırılmış matematiksel modelin, zaman tanım alanında doğrusal değerlendirilmesi ve kolonların karşılıklı etkileşim diyagramlarına göre yapı güvenliği değerlendirilecektir. Modal güncelleme işlemi birçok parametrenin tek başına veya birlikte kullanılması ile gerçekleştirilebilmektedir. Bu çalışma kapsamında, etkin parametre Elastisite modülü olarak kabul edilmiştir. Modal güncellemeyi yapmak adına Python tabanlı bir Algoritma hazırlanmıştır. Bu algoritma CSI SAP2000 programına API aracılığıyla bağlanıp, hedef dinamik karakteristikler elde edilene dek iterasyonlara devam etmektedir. Algoritmanın işlem akış şeması Şekil 4.30.'daki gibidir.



Şekil 4.30: Python tabanlı modal güncelleme algoritmasına ait akış şeması.

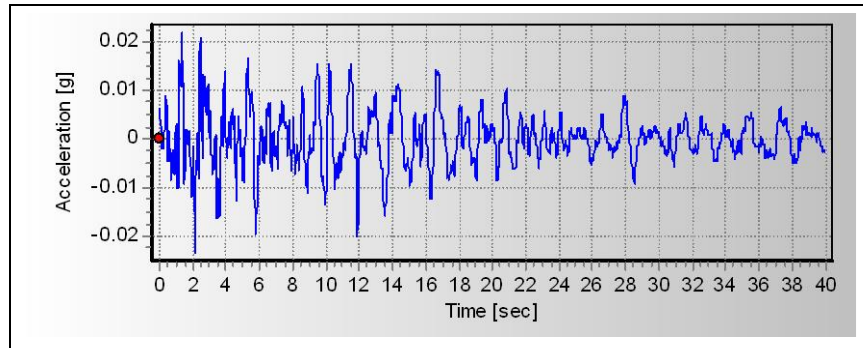
Güçlendirilmemiş model, modal güncelleme işlemine ait Python dilinde hazırlanan kodlar ekte sunulmuştur. Güçlendirilmemiş model, modal güncelleme işlemine ait Python dilinde hazırlanan kodlar ekte sunulmuştur. Güncelleme iterasyonları sonucunda değişken olarak kabul edilen “CONCRETE_3KSI_20.68428MPA” malzemenin elastisite modülü, yeterli periyod yaklaşıklığı sağlanarak 21875 MPA olarak bulunmuştur ve matematiksel modeller buna göre güncellenmiştir. İterasyonlara ait güncelleme Şekil 4.31.’deki gibidir.



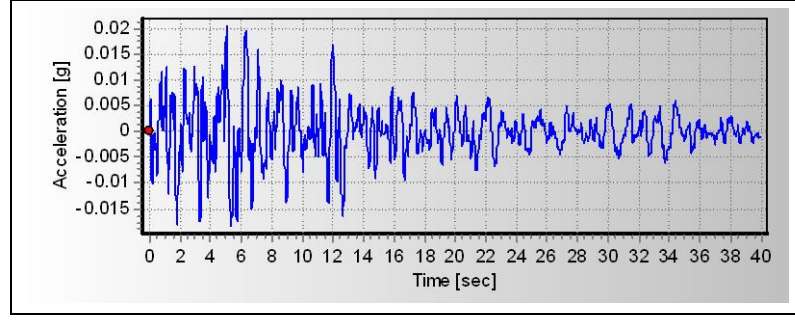
Şekil 4.31: Güçlendirme öncesi modelin güncellenmesi.

4.5.4. Güçlendirilmemiş Modelin Güncelleme Sonrası Bigbear (1992) Depreminde ZTA Değerlendirilmesi

CESMD arşivinde bulunan ivme veri setleri arasında, Van Nuys yapısının zemin katında ölçüm yapan üç eksenli sensör bulunmaktadır. Bu sensörde, 14. kanal ve 16. kanal sırasıyla Y (kısa doğrultu) ve X (uzun doğrultu) eksenlerinde ivme verileri kaydedilmiştir. Bu veri setlerinden elde edilen zaman ivme serileriyle güçlendirilmiş modelin güncellenmiş haliyle, zaman tanım alanında doğrusal olan analizler yapılmıştır. X ve Y doğrultusunda zaman tanım alanında kullanılan deprem kayıtları Şekil 4.32. ve Şekil 4.33.'teki gibidir.

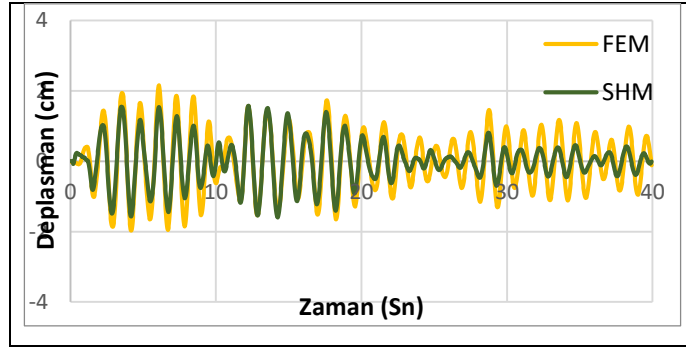


Şekil 4.32: Bigbear (1992) depremi x yönünde etkitilen ivme-zaman serisi (CH16) (PGA:0.023g).

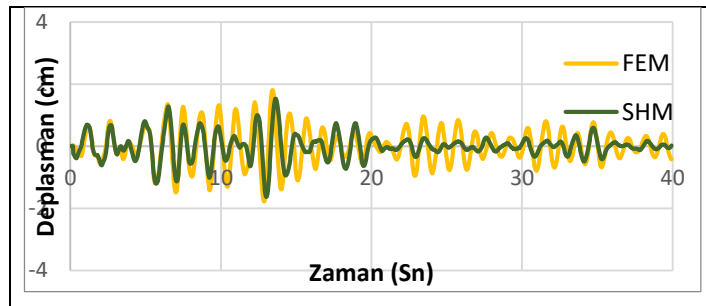


Şekil 4.33: Bigbear (1992) depremi y yönünde etkitilen ivme-zaman serisi (CH14) (PGA:0.02g).

Zaman tanım alanında gerçekleştirilen doğrusal analizler sonucu yapının sonlu elemanlar modelinden çatı katında sensörün bulunduğu düğüm noktasına ait zaman yer değiştirme serisi kanalda Bigbear (1992) depremine ait yer değiştirme kayıtları ile karşılaştırılmıştır. Şekil 4.34. ve Şekil 4.35.’te grafikler bulunmaktadır. FEM ve SHM yer değiştirme-zaman serileri arasındaki korelasyon, X yönü için 89% ve Y yönü için 59% olarak elde edilmektedir. Buna göre her iki doğrultuda sonuçlar arasında ilişki bulunmaktadır. İleri zaman deplasman tepkilerindeki farklılık doğrusal malzeme özellikleri ile modellemeden veya farklı sönüm özelliklerinden kaynaklanıyor olabilir.



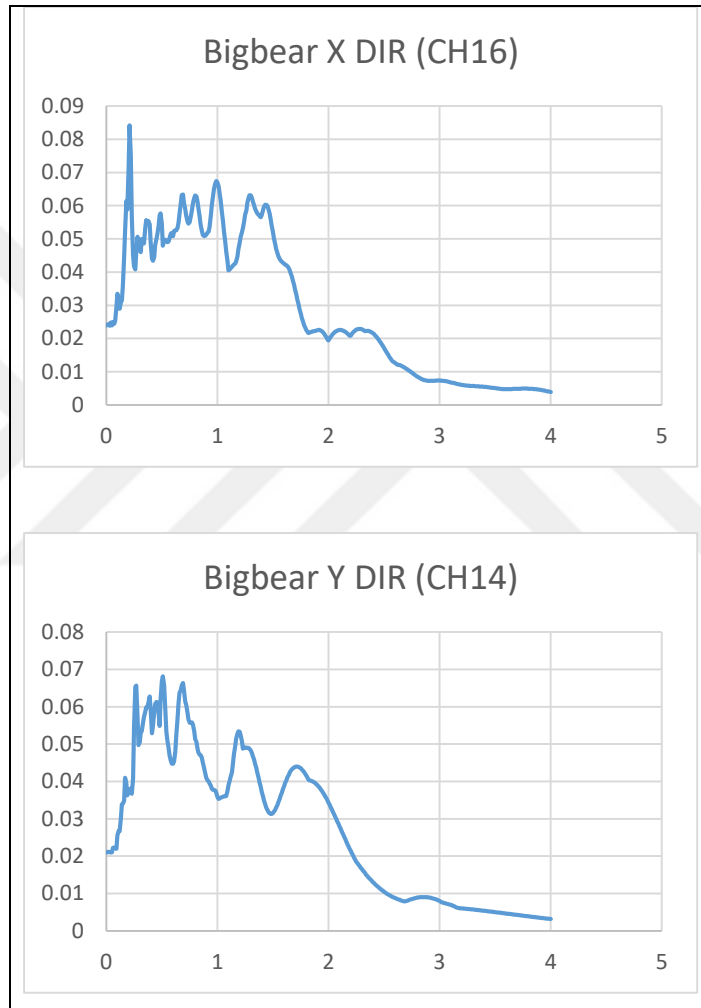
Şekil 4.34: Bigbear (1992) FEM & SHM tepe noktası x yönü yer değiştirme grafiği.



Şekil 4.35: Bigbear (1992) FEM & SHM tepe noktası y yönü yer değiştirme grafiği.

4.5.5. Güçlendirilmemiş Modelin Güncelleme Sonrası Bigbear (1992) Depreminde EKO Değerlendirilmesi

Bu bölümde güçlendirilmemiş yapının güncellenmiş matematiksel modeli, zemin kattaki sensör tarafından Bigbear (1992) depreminde kaydedilen ivme veri setinden Şekil 4.36.'daki gibi 5% yapı sönümüne göre elastik tepki spektrumu (elastic response spectrum) elde edilmiştir.

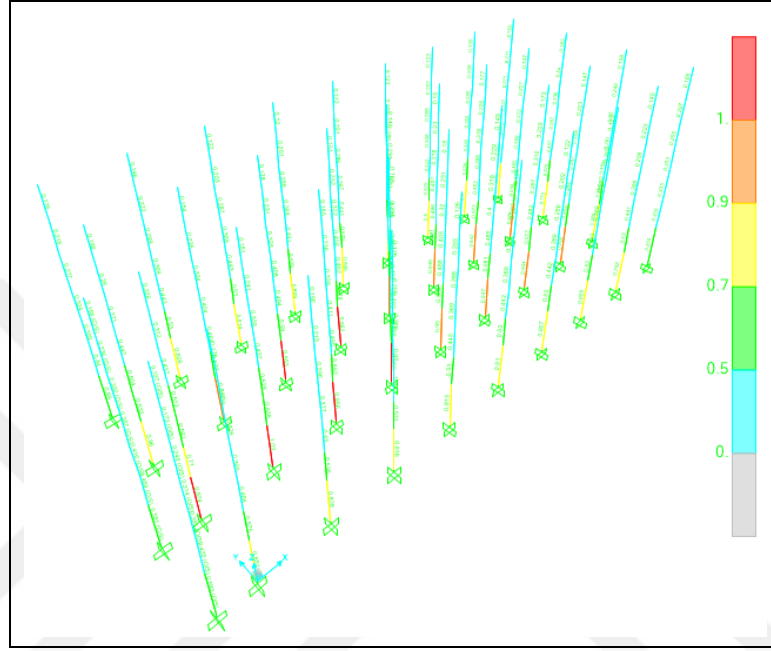


Şekil 4.36: Bigbear (1992) Depremi zemin sensör kayıtlarından elde edilen %5 sönüm oranına sahip tasarım spektrumları.

Elde edilen tepki spektrumlarıyla, mod süperpozisyonu yöntemine göre spektrum analizi yapılmıştır. Yapılan analiz sonucunda, $G+Q+E_{qx}+0.3E_{qy}$ ve $G+Q+0.3E_{qx}+E_{qy}$ kombinasyonlarından elde edilen iç tesirlere göre kolonların eksenel yük-moment etkileşim oranları CSI SAP2000 programı yardımıyla hesaplanmıştır. Belirtilen kombinasyonların kullanılma sebebi, farklı durumların

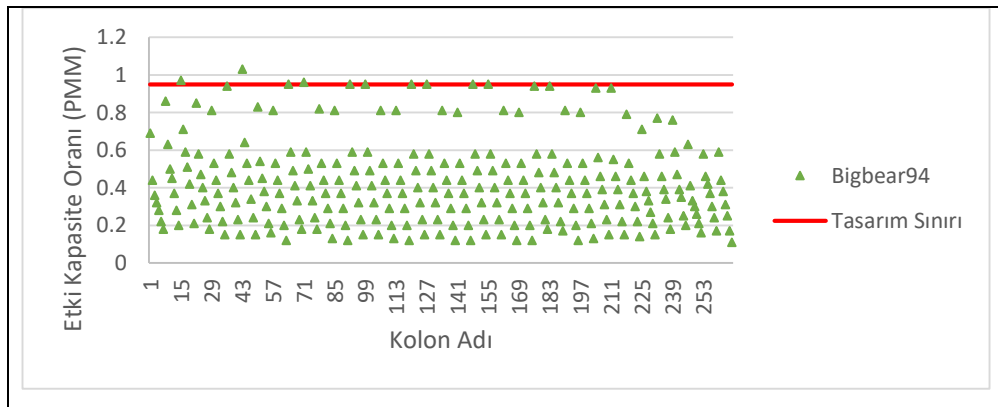
birbiriyle karşılaştırmasıdır. Etki-Kapasite oranlarına göre güçlendirilmemiş yapının güncellenmiş modeli değerlendirilmiştir.

Şekil 4.37.'de güçlendirilmemiş binanın güncellenmiş modelinin, Bigbear (1992) depreminden elde edilen elastik tepki spektrumu analiz sonuçlarına göre kolonların etki kapasite oranları sonuçları bulunmaktadır.



Şekil 4.37: Bigbear (1992) depremi elastik tepki spektrumuna göre kolonların etki-kapasite oranları (PMM).

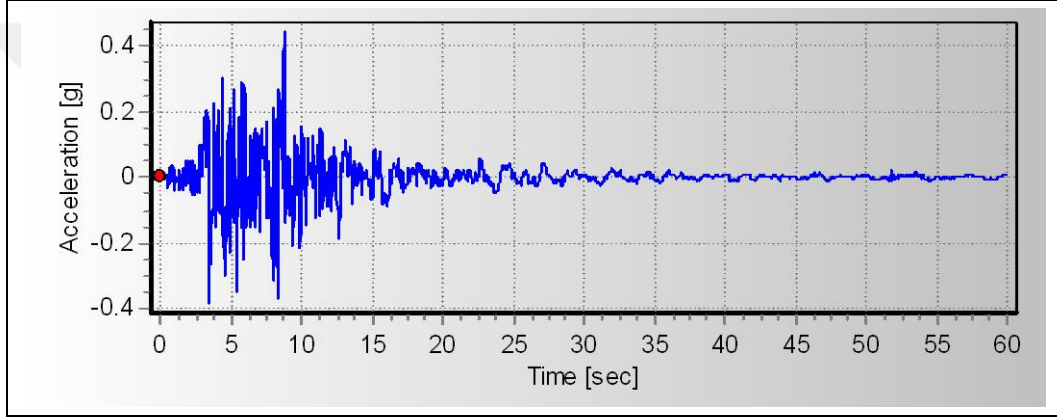
Şekil 4.38.'de etki kapasite oranları sonuçları bulunmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre tasarım sınırı olan 0.95 oranının üzerinde 3 kolon bulunmaktadır.



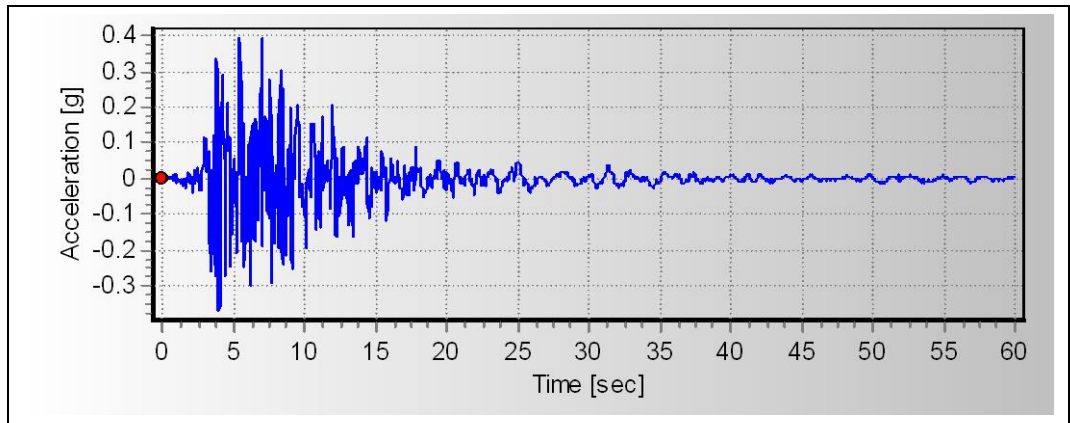
Şekil 4.38: Bigbear (1992) depremi elastik tepki spektrumuna göre kolonların etki-kapasite oranları dağılımı (PMM).

4.5.6. Güçlendirilmemiş Modelin Güncelleme Sonrası Northridge (1994) Depreminde ZTA Değerlendirilmesi

CESMD arşivinde bulunan ivme veri setleri arasında, Van Nuys yapısının zemin katında ölçüm yapan üç eksenli sensör bulunmaktadır. Bu sensörde, 14. kanal ve 16. kanal sırasıyla Y (kısa doğrultu) ve X (uzun doğrultu) eksenlerinde ivme verileri kaydedilmiştir. Bu veri setlerinden elde edilen zaman ivme serileriyle güçlendirilmiş modelin güncellenmiş haliyle, zaman tanım alanında doğrusal olan analizler yapılmıştır. X ve Y doğrultusunda zaman tanım alanında kullanılan deprem kayıtları Şekil 4.39. ve Şekil 4.40.'daki gibidir.



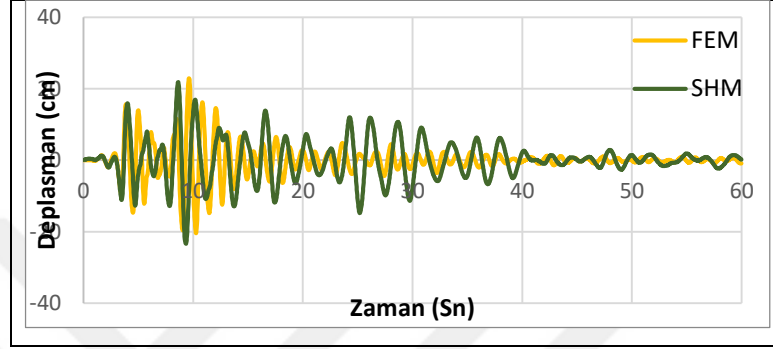
Şekil 4.39: Northridge (1994) depremi x yönünde etkitilen ivme-zaman serisi (CH16) (PGA:0.453g).



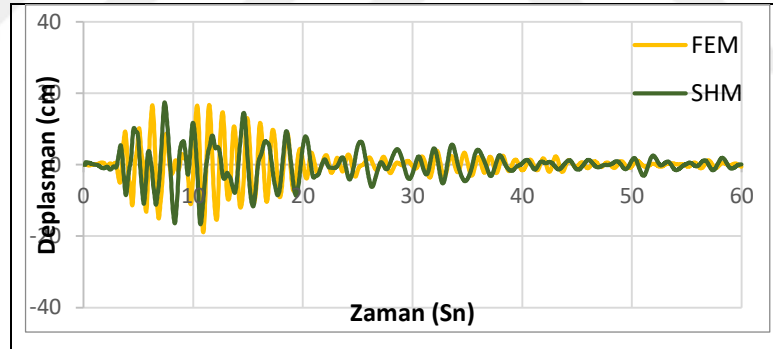
Şekil 4.40: Northridge (1994) depremi y yönünde etkitilen ivme-zaman serisi (CH14) (PGA:0.400g).

Zaman tanım alanında gerçekleştirilen doğrusal analizler sonucu yapının sonlu elemanlar modelinden çatı katında sensörün bulunduğu düğüm noktasına ait zaman

yer değiştirme serisi kanalda Northridge (1994) depremine ait yer değiştirme kayıtları ile karşılaştırılmıştır. şekil4.41. ve şekil 4.42.’de grafikler bulunmaktadır. FEM ve SHM yer değiştirme-zaman serileri arasındaki korelasyon, X yönü için 1% ve Y yönü için 1% olarak elde edilmektedir. Buna göre her iki doğrultuda sonuçlar arasında ilişki yoktur. Bunun sebebi olarak yapının deprem esnasında hasar aldığı ve matematiksel modelin temsil ettiği doğrusal davranışına uyumlu olmamasıdır.



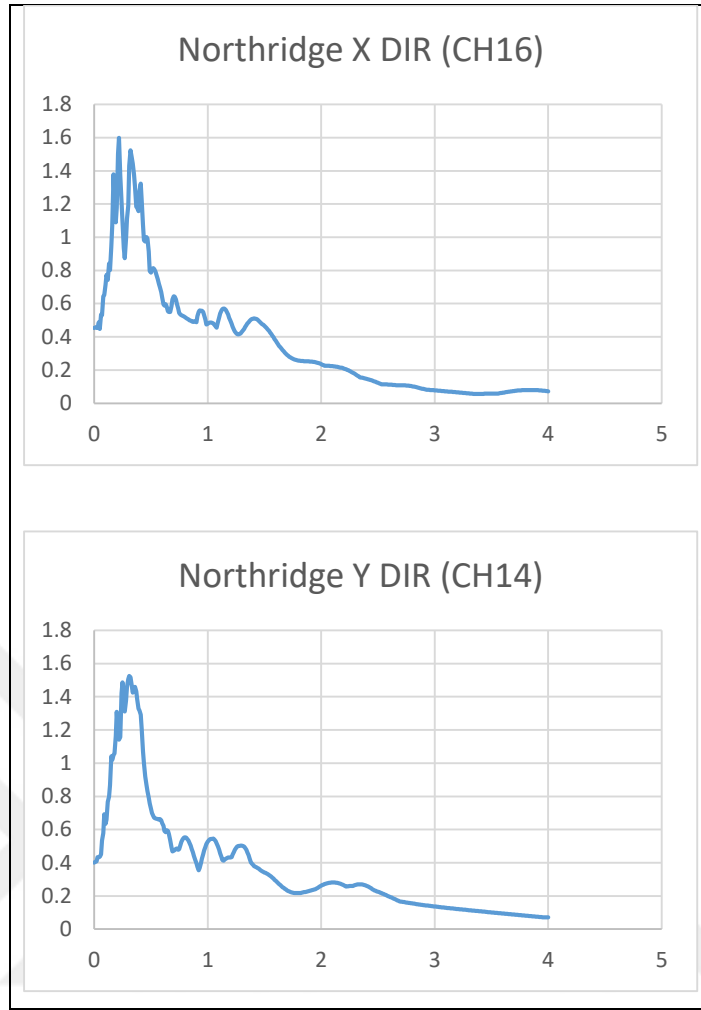
şekil 4.41: Northridge (1994) FEM&SHM tepe noktası x yönü yer değiştirme grafiği.



şekil 4.42: Northridge (1994) FEM&SHM tepe noktası y yönü yer değiştirme grafiği.

4.5.7. Güçlendirilmemiş Modelin Güncelleme Sonrası Northridge (1994) Depreminde EKO Değerlendirilmesi

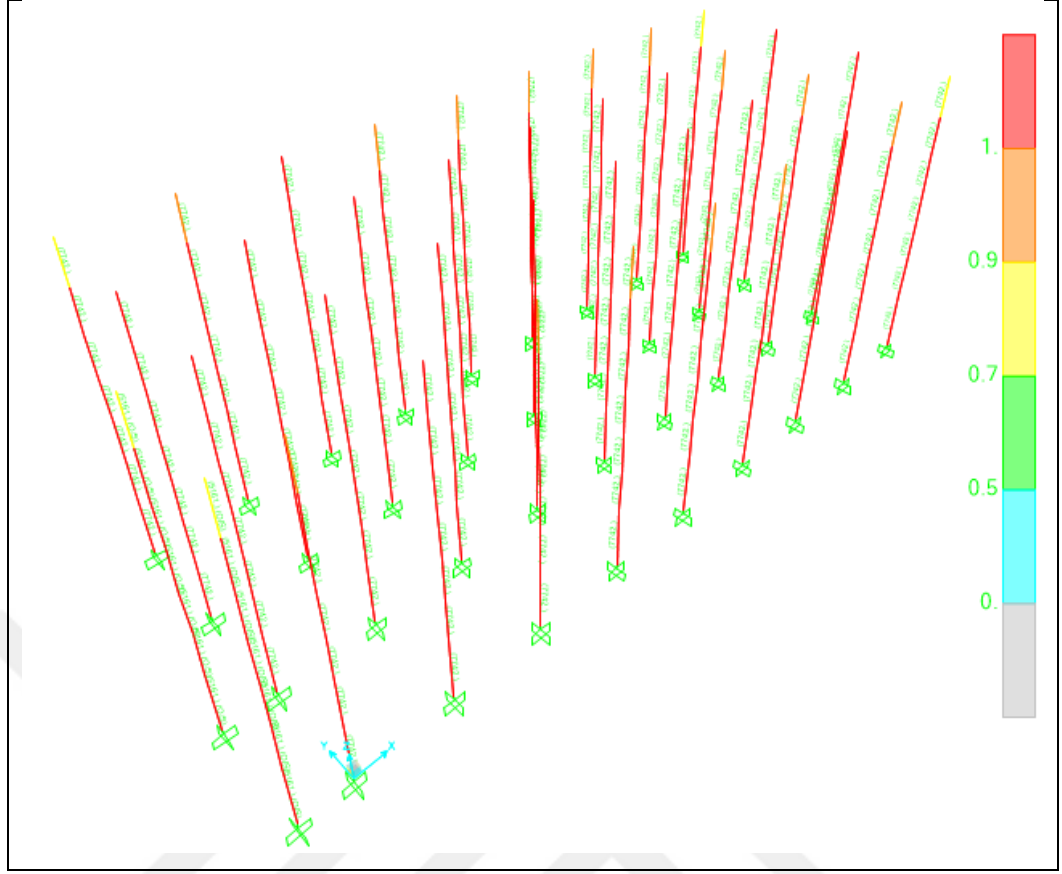
Bu bölümde güçlendirilmemiş yapının güncellenmiş matematiksel modeli, zemin kattaki sensör tarafından Northridge (1994) depreminde kaydedilen ivme veri setinden, şekil 4.43.deki gibi 5% yapı sönümüne göre elastik tepki spektrumu (elastic response spectrum) elde edilmiştir.



Şekil 4.43: Northridge (1994) depremi zemin sensör kayıtlarından elde edilen %5 sönüm oranına sahip tasarım spektrumları.

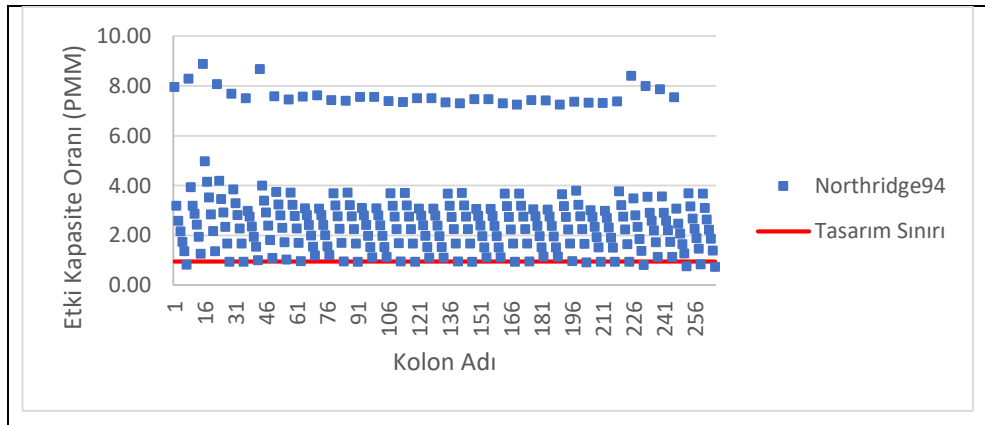
Elde edilen tepki spektrumlarıyla, mod süperpozisyonu yöntemine göre spektrum analizi yapılmıştır. Yapılan analiz sonucunda, $G+Q+E_{qx}+0.3E_{qy}$ ve $G+Q+0.3E_{qx}+E_{qy}$ kombinasyonlarından elde edilen iç tesirlere göre kolonların eksenel yük-moment etkileşim oranları CSI SAP2000 programı yardımıyla hesaplanmıştır. Belirtilen kombinasyonların kullanılma sebebi, farklı durumların birbiriyle karşılaştırmasıdır. Etki-Kapasite oranlarına göre güçlendirilmemiş yapının güncellenmiş modeli değerlendirilmiştir.

Şekil 4.44.'te güçlendirilmemiş binanın güncellenmiş modelinin, Northridge (1994) depreminden elde edilen elastik tepki spektrumu analiz sonuçlarına göre kolonların etki kapasite oranları sonuçları bulunmaktadır.



Şekil 4.44: Northridge (1994) depremi elastik tepki spektrumuna göre kolonların etki-kapasite oranları (PMM).

Şekil 4.45.'de etki kapasite oranları sonuçları bulunmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre tasarım sınırı olan 0.95 oranının üzerinde 247 kolon bulunmaktadır.

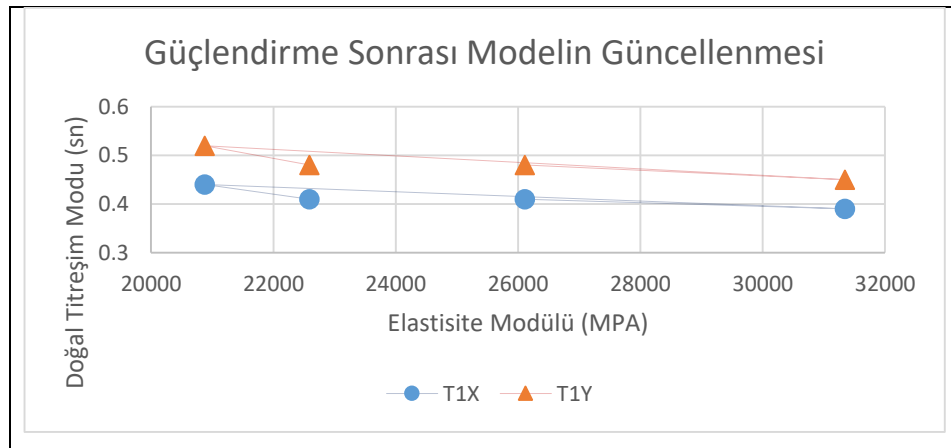


Şekil 4.45: Northridge (1994) depremi elastik tepki spektrumuna göre kolonların etki-kapasite oranları dağılımı (PMM).

4.5.8. Güçlendirilmiş Matematiksel Modellerin Güncellemesi

Betonarme perde eklenmiş yapının matematiksel modeline ait birinci ve ikinci modlarına ait periyodları 0.47 Sn (2.08 Hz) ve 0.40 Sn (2.44 Hz)'dir. Sahada yapıdan elde edilen titreşim veri setlerinin, yapı sağlığı izleme sistemleri ile tanımlanması ardından elde edilen dinamik karakteristiklerine göre birinci ve ikinci modlarına ait periyodları 0.45 Sn (2.208 Hz) ve 0.34 Sn (2.914 Hz)'dir. Bu çalışma kapsamında matematiksel model sahadan elde edilen veriler ışığında modal olarak güncellenip, doğruluğu artırılmış matematiksel modelin, zaman tanım alanında doğrusal değerlendirilmesi ve kolonların karşılıklı etkileşim diyagramlarına göre yapı güvenliği değerlendirilecektir. Modal güncelleme işlemi birçok parametrenin tek başına veya birlikte kullanılması ile gerçekleştirilebilmektedir. Bu çalışma kapsamında, etkin parametre Elastisite modülü olarak kabul edilmiştir. Modal güncellemeyi yapmak adına Python tabanlı bir Algoritma hazırlanmıştır. Bu algoritma CSI SAP2000 programına API aracılığıyla bağlanıp, hedef dinamik karakteristikler elde edilene dek iterasyonlara devam etmektedir. Algoritmanın işlem akış şeması Şekil 4.30.'daki gibidir.

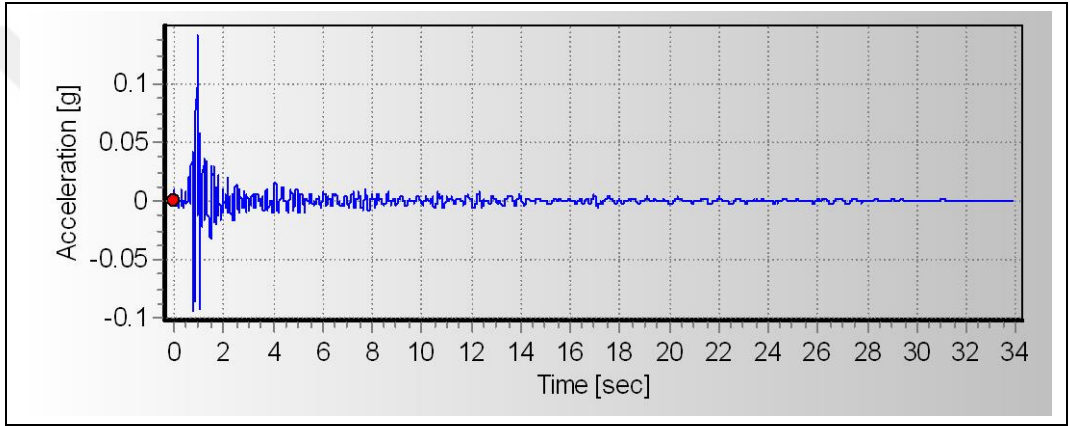
Güçlendirilmiş model, modal güncelleme işlemine ait Python dilinde hazırlanan kodlar ekte sunulmuştur. Güncelleme iterasyonları sonucunda değişken olarak kabul edilen “w_CONCRETE_5KSI_34.4738MPA” malzemenin elastisite modülü, yeterli periyot yaklaşıklığı sağlanarak 31344.8 MPA olarak bulunmuştur ve matematiksel modeller buna göre güncellenmiştir. İterasyonlara ait güncelleme Şekil 4.46.'daki gibidir.



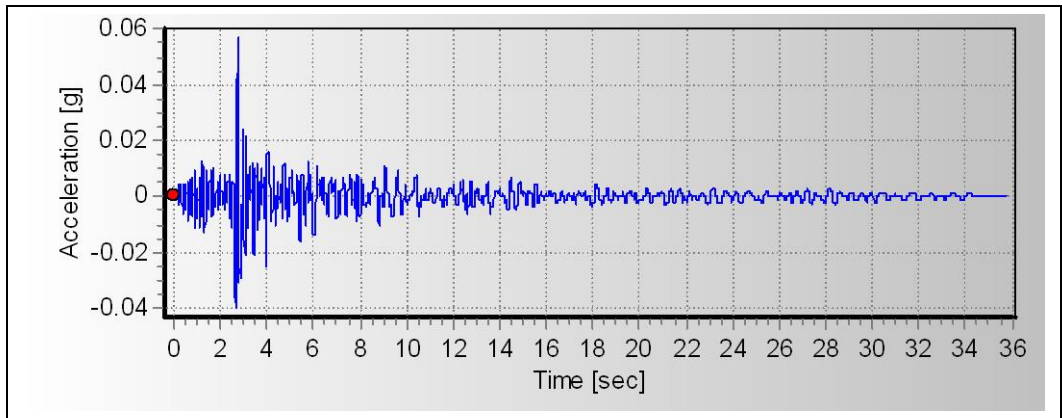
Şekil 4.46: Güçlendirme sonrası modelin güncellenmesi.

4.5.9. Güçlendirilmiş Modelin Güncelleme Sonrası Encino (2014) Depreminde ZTA Değerlendirilmesi

CESMD arşivinde bulunan ivme veri setleri arasında, Van Nuys yapısının zemin katında ölçüm yapan üç eksenli sensör bulunmaktadır. Bu sensörde, 14. kanal ve 16. kanal sırasıyla Y (kısa doğrultu) ve X (uzun doğrultu) eksenlerinde ivme verileri kaydedilmiştir. Bu veri setlerinden elde edilen zaman ivme serileriyle güçlendirilmiş modelin güncellenmiş haliyle, zaman tanım alanında doğrusal olan analizler yapılmıştır. X ve Y doğrultusunda zaman tanım alanında kullanılan deprem kayıtları Şekil 4.47. ve Şekil 4.48.'deki gibidir.



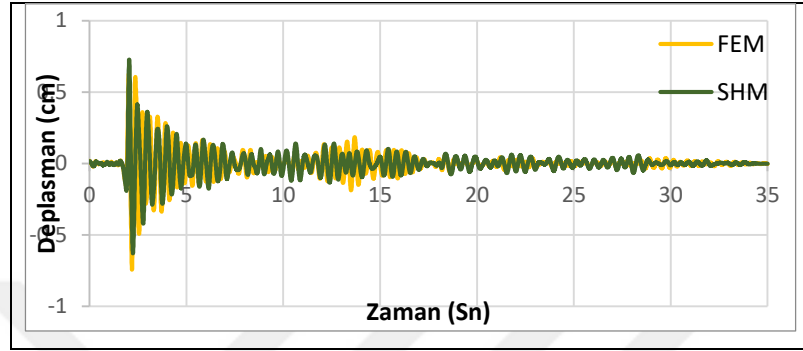
Şekil 4.47: Encino (2014) depremi x yönünde etkitilen ivme-zaman serisi (CH16) (PGA:0.14g).



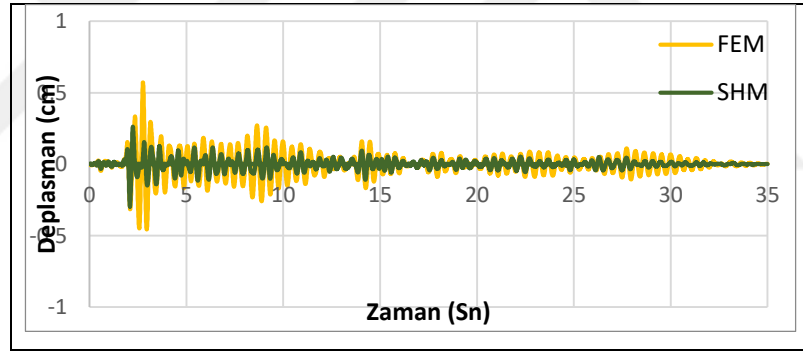
Şekil 4.48: Encino (2014) depremi y yönünde etkitilen ivme-zaman serisi (CH14) (PGA:0.057g).

Zaman tanım alanında gerçekleştirilen doğrusal analizler sonucu yapının sonlu elemanlar modelinden çatı katında sensörün bulunduğu düğüm noktasına ait zaman

yer değiştirme serisi kanalda Encino (2014) depremine ait yer değiştirme kayıtları ile karşılaştırılmıştır. şekil4.49. ve şekil 4.50.'de grafikler bulunmaktadır. FEM ve SHM yer değiştirme-zaman serileri arasındaki korelasyon, X yönü için 21% ve Y yönü için 69% olarak elde edilmektedir. Buna göre her iki doğrultuda sonuçlar arasında ilişki bulunmaktadır.



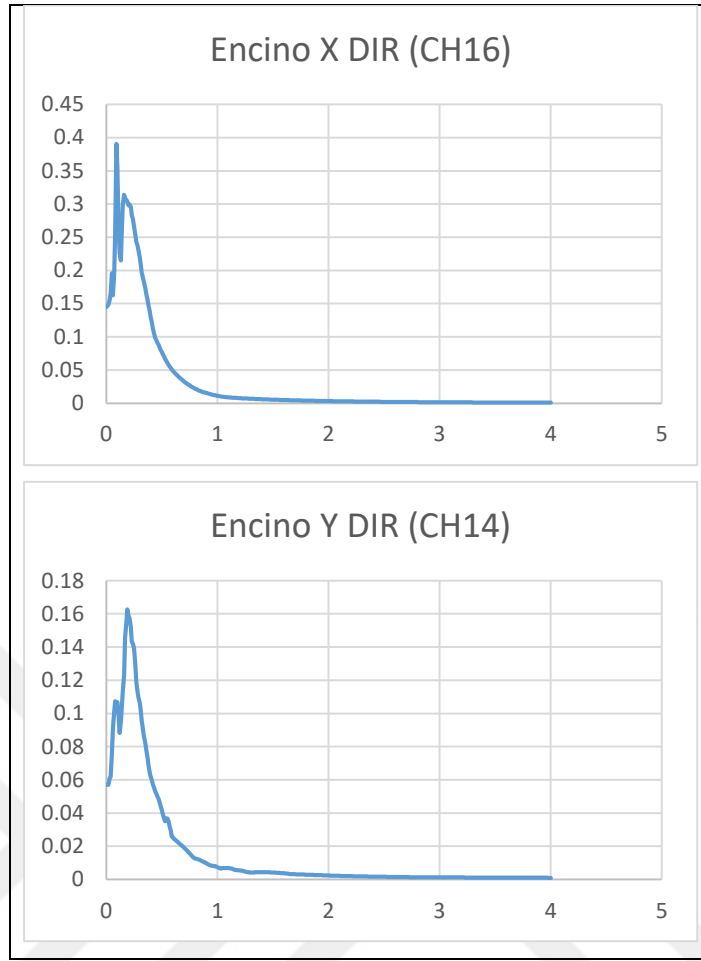
şekil 4.49: Encino (2014) FEM&SHM tepe noktası x yönü yer değiştirme grafiği.



şekil 4.50: Encino (2014) FEM&SHM tepe noktası y yönü yer değiştirme grafiği.

4.5.10. Güçlendirilmiş Modelin Güncelleme Sonrası Encino (2014) Depreminde EKO Değerlendirilmesi

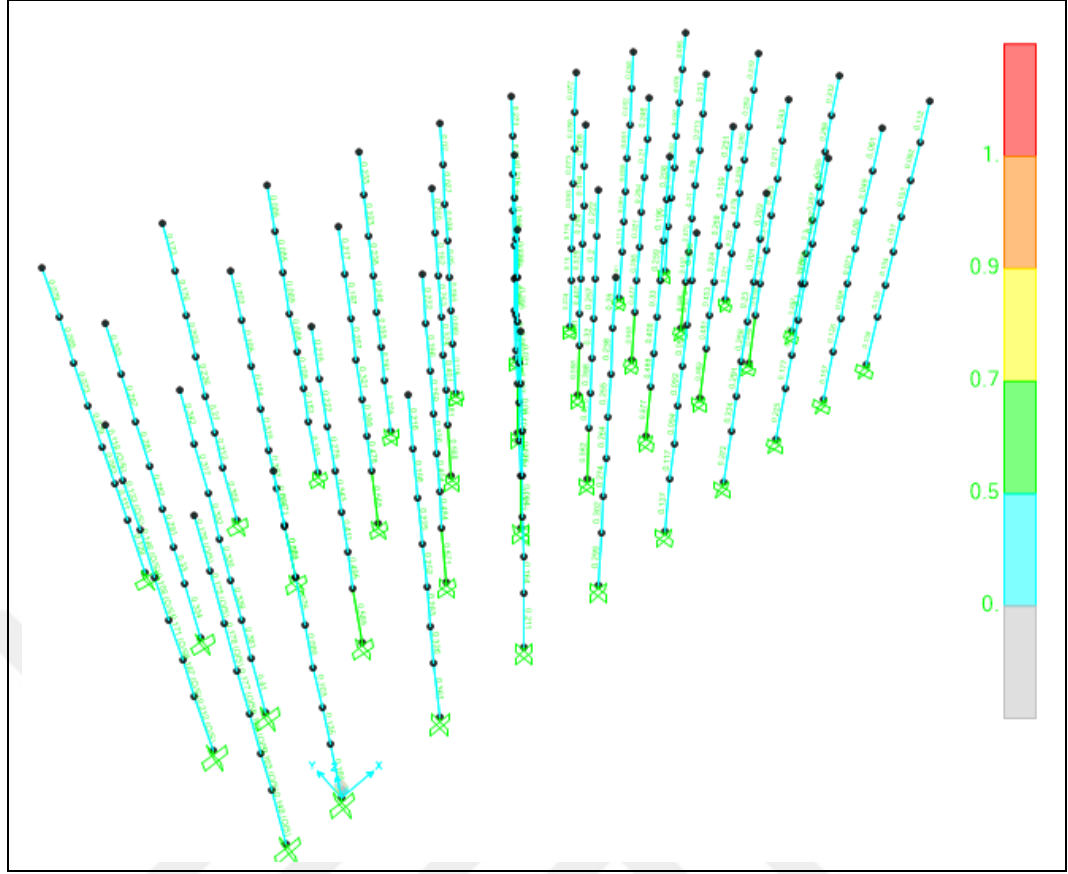
Bu bölümde güçlendirilmemiş yapının güncellenmiş matematiksel modeli, zemin kattaki sensör tarafından Encino (2014) depreminde kaydedilen ivme veri setinden, şekil 4.51.'deki gibi 5% yapı sönümüne göre elastik tepki spektrumu (elastic response spectrum) elde edilmiştir.



Şekil 4.51: Encino (2014) depremi zemin sensör kayıtlarından elde edilen %5 sönüm oranına sahip tasarım spektrumları.

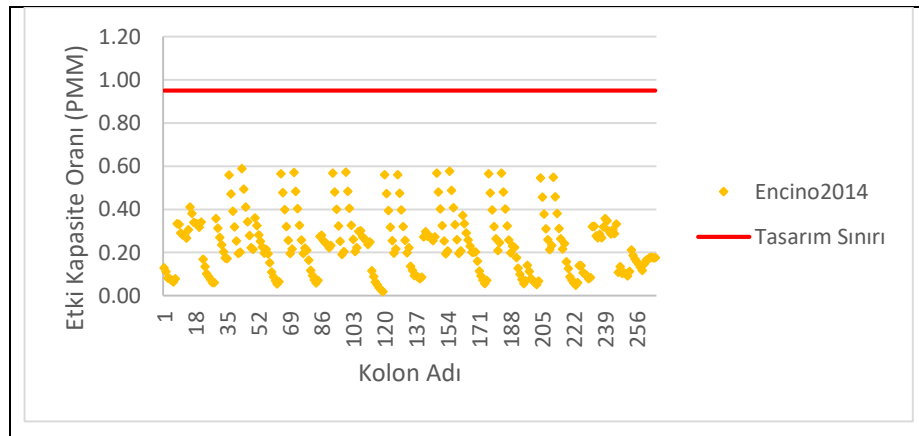
Elde edilen tepki spektrumlarıyla, mod süperpozisyonu yöntemine göre spektrum analizi yapılmıştır. Yapılan analiz sonucunda, $G+Q+E_{qx}+0.3E_{qy}$ ve $G+Q+0.3E_{qx}+E_{qy}$ kombinasyonlarından elde edilen iç tesirlere göre kolonların eksenel yük-moment etkileşim oranları CSI SAP2000 programı yardımıyla hesaplanmıştır. Belirtilen kombinasyonların kullanılma sebebi, farklı durumların birbiriyle karşılaştırmasıdır. Etki-Kapasite oranlarına göre güçlendirilmemiş yapının güncellenmiş modeli değerlendirilmiştir.

Şekil 4.52.'de güçlendirilmiş binanın güncellenmiş modelinin, Encino (2014) depreminden elde edilen elastik tepki spektrumu analiz sonuçlarına göre kolonların etki kapasite oranları sonuçları bulunmaktadır.



Şekil 4.52: Encino (2014) depremi elastik tepki spektrumuna göre kolonların etki-kapasite oranları (PMM).

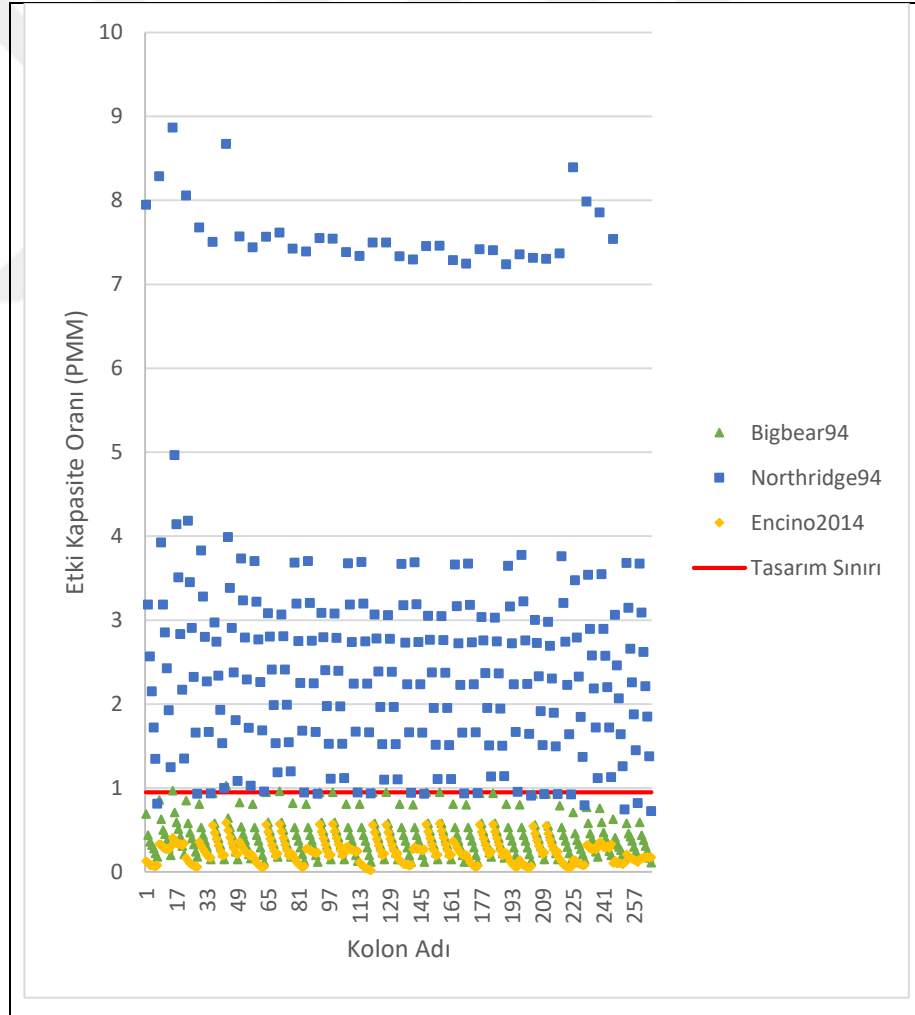
Şekil 4.53.'de etki kapasite oranları sonuçları bulunmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre tasarım sınırı olan 0.95 oranının üzerinde kolon bulunmamaktadır.



Şekil 4.53: Encino (2014) Depremi elastik tepki spektrumuna göre kolonların etki-kapasite oranları dağılımı (PMM).

4.5.11. Etki Kapasite Oranlarının Değerlendirilmesi

Şekil 4.51.'de Bigbear (1992), Northridge (1994) ve Encino (2014) depremlerinden elde edilen elastik tepki spektrumlarına göre güncellenmiş modellerin etki kapasite oranları bir arada sunulmuştur. Grafikten anlaşılacağı üzere tasarım sınırı olan 0.95 oranının Bigbear (1992) depreminde çok az aşılmıştır, Northridge (1994) depreminde 0.95 oranının çok fazla aşıldığı dolayısıyla kolonlarda hasarlar meydana geldiği ve yapının güçlendirme sonrası Encino (2014) depreminde kolonların etki kapasite etki kapasite oranlarının 0.95 oranının tamamen altında kaldığı görülmektedir. Sonuç olarak Şekil 4.54. güçlendirme işlemlerinin etkinliği olarak yorumlanabilir.



Şekil 4.54: Bigbear (1992), Northridge (1994) ve Encino (2014) depremleri etki kapasite oranları.

4.5.12. Zaman Frekans Alanında Güç Yoğunlukları Grafiklerinin Değerlendirilmesi

Zamana bağlı değişken frekans ve genliklere sahip olan dalgalar, frekans tanım alanında ayrıklaştırma gibi bir takım analizlerle uzun yıllardan beri akustik, elektronik ve sismoloji gibi alanlarında kullanılmaktadır. Dalgaların frekans içeriğini, gürültü içeriği gibi titreşim özelliklerinin belirlendiği bu analizlerde, zamanla daha güçlü yöntemler kullanılmaya başlanmıştır. Bu yöntemlere Hilbert-Huang dönüşümü örnek verilebilir. Bu dönüşümlerle elde edilen spektogramların bir ekseninde zaman, bir ekseninde frekans bulunurken 3. Ekseninde ise güç yoğunluğu bulunmaktadır. Elde edilen grafiklerde 3. boyutta bulunan yoğunluk genel olarak renkler ile tasvir edilmektedir. Yapı tanımlama algoritmalarında bu grafiklerde güç yoğunlaşması bulunan kısımlar, yapının doğrusal bölgedeki titreşim frekanslarını ve doğrusal olmayan bölgelerde ve yapının olası hasar görme anlarındaki değişen titreşim frekanslarını ifade etmektedir. Bu bağlamda hasar tanımlama konusunda elde edilecek bilgiler, yapıların doğrusal olmayan alandaki davranışı için yorum yapma fırsatı sunmaktadır [32].

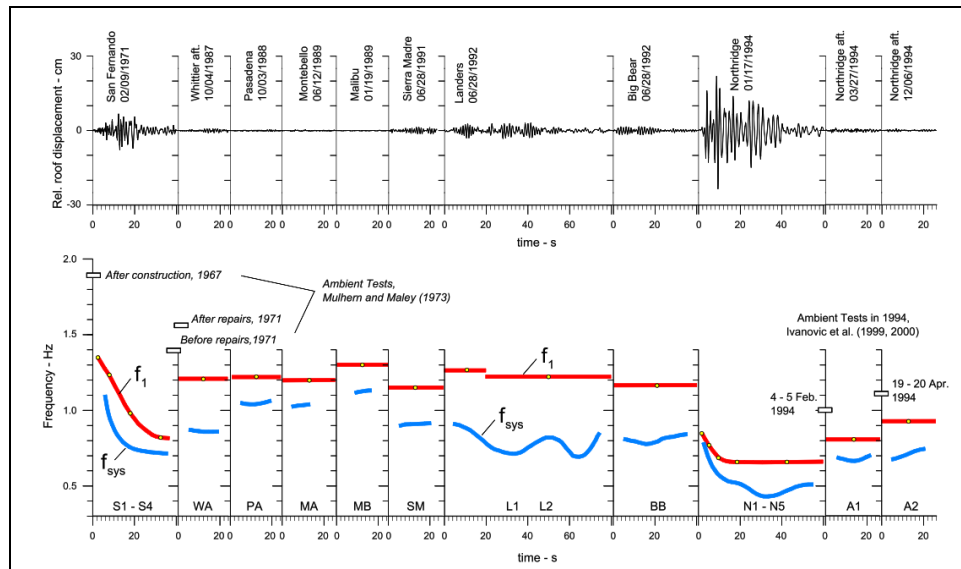
Tablo 4.5: Islam 1996 göre zamana göre yapıya ait periyodların değişimi.

Zaman Dilimi	Uzun Doğrultu	Kısa Doğrultu	Burulma
1971 Öncesi Çevresel Titreşim	0.52 Sn	0.4 Sn	
San Fernando (1971) Depremi			
Depremi İlk Anları	0.70 Sn	0.7 Sn	
Yapının Azami Tepki Anı	1.50 Sn	1.6 Sn	
Northridge (1994) Depremi			
Depremi İlk Bölümü (0-10 Sn)	1.50 Sn	2.2 Sn	1.4 Sn
Depremi Orta Bölümü (10-20 Sn)	2.10 Sn	2.2 Sn	
Depremi Bitişine Doğru (>25 Sn)	2.40 Sn	2.0 Sn	

Van Nuys Hotel Binası üzerine yapılan çalışmalarda yapının periyodları, farklı zaman dilimlerinde tezin yazarı tarafından Türkçeleştirilen, Tablo 4.5.'teki gibi hesaplanmıştır. Tabloda ifade edilen uzun doğrultu bu yayındaki modellemelerde x doğrultusuna, kısa doğrultu ise yine bu yayındaki modellemelerdeki y doğrultusuna karşılık gelmektedir. Yapının 1971 San Fernando depremi öncesinde çevresel titreşimlerden elde edilen veriler doğrultusunda 1. Doğal titreşim modu 0.52 sn olarak hesaplanmıştır. 1971 San Fernando depreminde yapıdan elde edilen titreşim verileri

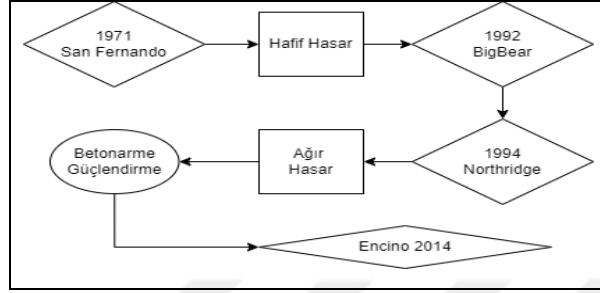
ile elde edilen 1 doğal titreşim modu depremin ilk anlarında 0.70 sn olarak bulunurken, yapının depreme verdiği tepkinin en fazla olduğu anda ise 1.50 sn olarak hesaplanmıştır. Yayında da belirtildiği üzere yapının San Fernando 1971’de hafif hasar aldığını bu değerlerden de tespit edebilmektedir. Northridge (1994) depreminde elde edilen titreşim verileri ile elde edilen verilerde depremin 0-10 sn süre zarfında 1. Doğal titreşim periyodu 1.50 sn, 10-20 sn süre zarfında 1. Doğal titreşim periyodu 2.10 sn ve 25. Saniyeden sonra 1. Doğal titreşim periyodu 2.40 sn olarak belirlenmiştir. Anlaşılabileceği üzere yapı periyodu deprem esnasında sürekli değişmiştir ve bu depremde ağır hasar almıştır. Nitekim bu depremde yapı betonarme perdeler eklenerek güçlendirilmiştir [4].

Todorovska ve Trifunac 2007 yılında Van Nuys Yapısının, 11 farklı deprem ve çevresel titreşimi ile yıllara bağlı doğal titreşim frekansının değişimlerini incelemiştir. Çalışma kapsamında, yapının ahşap çaprazlar ile geçici güçlendirme işlemlerinin etkisi de irdelenmiştir. Şekil 4.55.’te iki grafik bulunmaktadır. Üstte yapı tepe yer değiştirmelerinin zamana bağlı grafiği bulunmaktadır. Altta ise yapının zamana bağlı doğal frekansının değişimi grafiği bulunmaktadır. Alt grafikteki kırmızı eğri yapının doğal frekansına ait zamana göre değişimini ifade etmektedir. Doğal frekansların değişiminden güçlendirme etkisini ve hasar durumları hakkında yorumlar yapılabilir. Alt grafikteki mavi eğri ise yapının yapı-zemin etkileşimiyle ilgili frekansın değişimini ifade eder ve yapı sağlığı izleme ve/veya hasar tanılama için kullanılmamalıdır [33].



Şekil 4.55: Van Nuys yapısının kronolojik olarak maruz kaldığı depremlere göre yapı frekanslarındaki değişim.

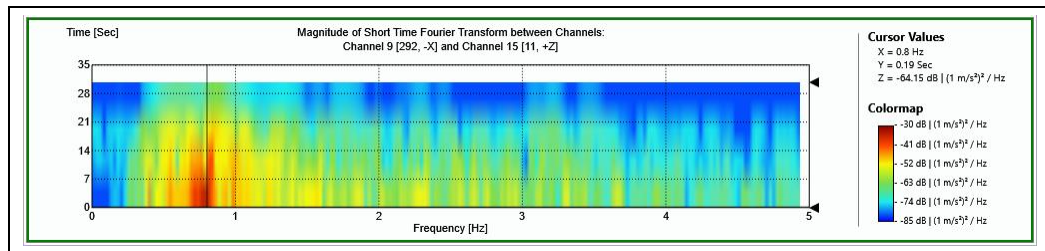
Bu çalışma kapsamında da yapının farklı zamanlara ait deprem kayıtlarına göre yapının doğal titreşim frekansları karşılaştırılmıştır. Çalışmada irdelenen deprem kayıtları, yapının güçlendirme öncesinde Bigbear (1992) ve Northridge (1994), güçlendirme sonrasında ise Encino (2014) depremleridir. Bu depremlerin kronolojik şeması Şekil 4.56.'daki gibidir.



Şekil 4.56: Depremlerin kronolojik şeması.

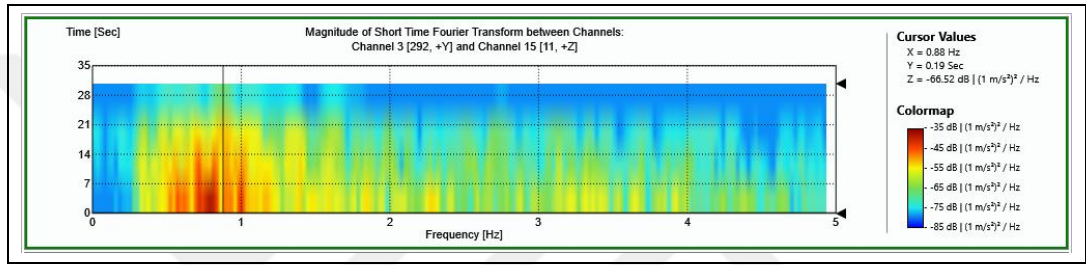
Depremlere ait ivme veri setlerinden, Artemis Modal programı yardımıyla yapının kısa doğrultusunda (y doğrultusu) ve uzun doğrultusunda (x doğrultusu) spektogramlar elde edilmiştir. Sahadan elde edilen veriler ile yapılan bu analizlerin yapının sonlu elemanlar modellerinden bağımsız olarak elde edilmektedir. Çatı katında bulunan bir doğrultudaki sensörün zemin katta bulunan aynı doğrultudaki sensöre göre elde edilen spektogramlar kronolojik olarak sunulmuştur. Şekillerde sunulan spektogramlarda kırmızı bölgeler yüksek enerjiye sahip olan frekans muhteviyatlarını ifade ederken, mavi bölgeler düşük enerjiye sahip olan frekans muhteviyatlarını ifade etmektedir.

Şekil 4.57.'de Bigbear (1992) depreminden X yönünde (uzun doğrultuda) elde edilen spektogramda, güç yoğunluğunun özellikle 0.80 Hz mertebelerinde olduğu gözlemlenebilmektedir. Güç yoğunluğunun bu mertebede yoğunlaştığı şeklinde değerlendirilebilir.



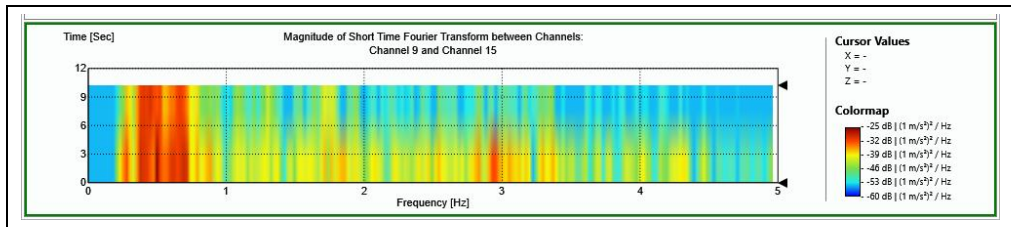
Şekil 4.57: Bigbear (1992) depremi x doğrultusu spektogramı.

Şekil 4.58.'de Bigbear (1992) depreminden Y yönünde (kısa doğrultuda) elde edilen spektrogramda, güç yoğunluğunun özellikle 0.88 Hz mertebelerinde olduğu gözlemlenebilmektedir. Güç yoğunluğunun bu mertebede yoğunlaştığı değerlendirilebilir. Bunun yanı sıra yer yer daha düşük frekanslarda da güç yoğunlaşması gözlemlenebilmektedir. Bigbear (1992) depreminin en büyük yer ivmesi düşük olduğu göz önünde bulundurulursa bu deprem esnasında yapının hasar görmediği, fakat önceki depremlerden hafif hasarlı çıktığı ve bu durumun daha yüksek frekanstaki modları tetiklediği sonucuna varılabilir.

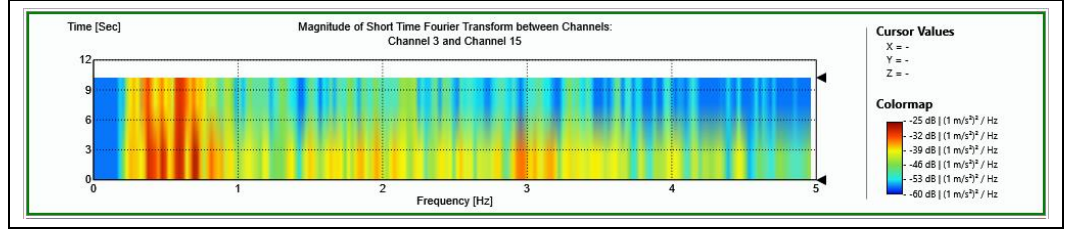


Şekil 4.58: Bigbear (1992) depremi y doğrultusu spektrogramı.

Şekil 4.59. ve Şekil 4.60.'da Northridge (1994) depreminden elde edilen spektrogramlarda her iki doğrultuda da güç yoğunlaşmasının 0.30 Hz – 0.80 Hz frekansları arasında kararlı bir şekilde yoğunlaştığı gözlenmektedir. Bu durumda yapının deprem esnasında ağır hasarlar aldığı ve daha düşük frekanslı birçok modun, deprem süresince tetiklendiği sonucuna varılabilir. Nitekim yapının Northridge (1994) depreminde ağır yapısal hasara uğradığı ve deprem sonrasında betonarme perdeler ile güçlendirildiği kayıtlara geçmiştir.

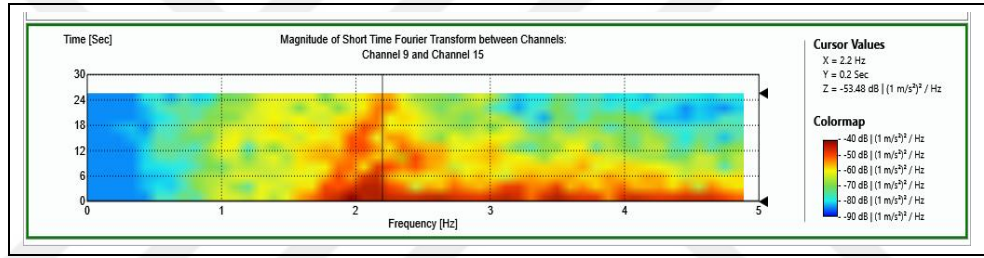


Şekil 4.59: Northridge (1994) depremi x doğrultusu spektrogramı.

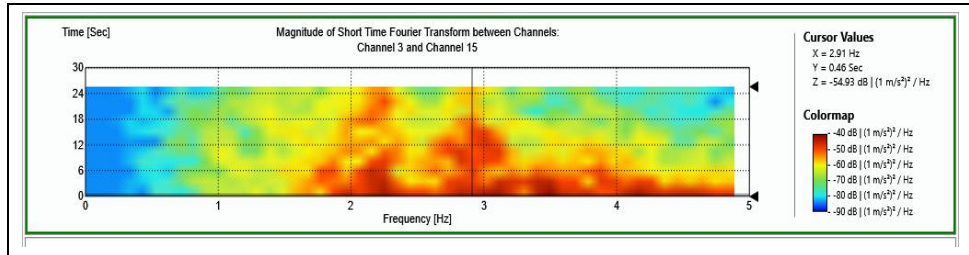


Şekil 4.60: Northridge (1994) depremi y doğrultusu spektrogram.

Şekil 4.61. ve Şekil 4.62.'de Encino (2014) depreminden elde edilen spektrogramlarda her iki doğrultuda da güç yoğunlaşmasının 2.20 Hz – 2.90 Hz frekansları arasında yoğunlaştığı gözlenmektedir. Northridge (1994) depremine müteakip 3 yıl süren güçlendirme sonrasında yapının rijitliğinin artması sonucunda yüksek frekanslı birçok modun etkin olduğu gözlemlenebilmektedir.

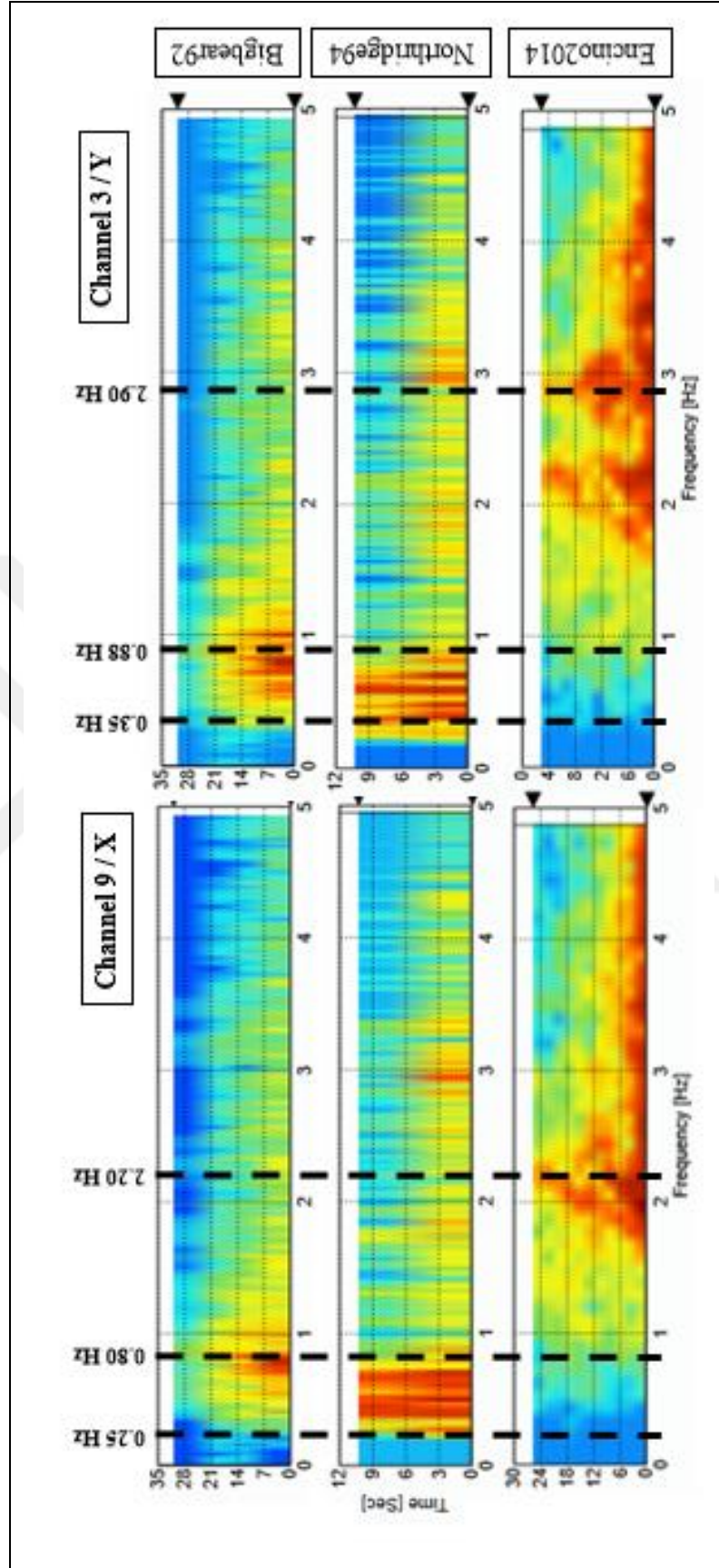


Şekil 4.61: Encino (2014) depremi x doğrultusu spektrogram.



Şekil 4.62: Encino (2014) depremi y doğrultusu spektrogram.

Şekil 4.63.'te farklı deprem kayıtlarından, her iki doğrultudaki kanallardan elde edilen spektrogramlar zaman sırasına göre alt alta yerleştirilmiştir. Şekilden gözlemlenebildiği üzere yapıda güç yoğunlaşması her iki doğrultuda Northridge (1994) depreminde daha düşük frekans muhtevisyatında dağılmıştır. Northridge (1994) depreminden sonra yapılan güçlendirme sonrasında ise Encino (2014) depreminde güç yoğunlaşması yüksek frekanslarda dağılmıştır. Yapıda uygulanan güçlendirme işlemlerinin başarılı olduğu sonucu elde edilebilmektedir.



Şekil 4.63: Aynı doğrultudaki spektogramların karşılaştırılması.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında California’da bulunan 7 katlı Van Nuys Hotel yapısı, güçlendirme öncesinde Bigbear (1992) ve Northridge (1994), güçlendirme sonrasında ise Encino (2014) deprem kayıtları kullanılarak Yapısal Sağlık İzleme metotlarıyla değerlendirildi. YSİ metotlarıyla elde edilen dinamik karakteristiklere göre doğrusal malzeme özellikleri ile modellenen matematiksel modelleri, Elastisite modülünü değiştirerek güncelleyecek python dilinde yazılmış bir algoritma hazırlandı. Güncellenen matematiksel modellerin zaman tanım alanında tepe yer değiştirme değerleri YSİ kapsamında yapıda bulunan ivme sensörlerinden elde edilen yer değiştirmeler ile uyumlulukları irdelenmiştir. Doğrusal malzeme özellikleri ile modellenen sonlu elemanlar modelleri, elastik tepki spektrumları kullanılarak mod süperpozisyonu yöntemiyle dinamik analizler gerçekleştirildi. Oluşan tesirlere göre etki kapasite oranları elde edildi ve değerlendirildi. Çalışmanın son bölümünde ise YSİ uygulamalarından elde edilen güç yoğunlukları grafikleri ile matematiksel modellemelerden bağımsız bir şekilde güçlendirmenin yapı dinamik karakteristiklerinde meydana getirdiği değişiklikler irdelenmiştir.

Güçlendirilmemiş modelin Sonlu elemanlar modeliyle elde edilen 1.doğal titreşim modu 1.20 sn (0.82 Hz) 2. Doğal titreşim modu ise 1.16 sn (0.85 Hz)’dir. YSİ metotlarıyla elde edilen 1.doğal titreşim modu 1.24 sn (0.80 Hz) 2. Doğal titreşim modu ise 1.13 sn (0.87 Hz)’dir. YSİ sistemlerine göre güncellenen modelde Bigbear (1992) deprem kayıtlarından elde edilen elastik tepki spektrumuna göre kolonlar 98% mertebede etki kapasite oranını 0.95 tasarım değerine göre sağlamaktadır. YSİ sistemlerine göre güncellenen modelde Northridge (1994) deprem kayıtlarından elde edilen elastik tepki spektrumuna göre kolonlar 8% mertebede etki kapasite oranını 0.95 tasarım değerine göre sağlamaktadır.

Betonarme perde eklenerek güçlendirilmiş modelin Sonlu elemanlar modeliyle elde edilen 1.doğal titreşim modu 0.47 sn (2.08 Hz) 2. Doğal titreşim modu ise 0.40 sn (2.44 Hz)’dir. YSİ metotlarıyla elde edilen 1.doğal titreşim modu 0.45 sn (2.20 Hz) 2. Doğal titreşim modu ise 0.34 sn (2.91 Hz)’dir. YSİ sistemlerine göre güncellenen modelde Encino (2014) deprem kayıtlarından elde edilen elastik tepki spektrumuna

göre kolonlar 100% mertebede etki kapasite oranını 0.95 tasarım değerine göre sağlamaktadır. Böylece yapıdaki güçlendirme işlemleri başarılı olarak değerlendirilebilir. Bunun yanı Sonlu elemanlar modellerinden bağımsız Bölüm 4.5.12.de gösterildiği gibi deprem kayıtlarından elde edilen güç yoğunluğu grafiklerinden de yapı hâkim frekanslarının Northridge (1994) depreminde oluşan hasarlardan ötürü düşük olduğu uygulanan güçlendirme işlemi sonrası Encino (2014) deprem kayıtlarından elde edilen güç yoğunluklarında frekans değerlerinin yükseldiği gözlenebilmektedir.

5.2. Öneri

Doğrusal malzeme özellikleri ile hazırlanan matematiksel modellemeler, bu çalışmanın devamı niteliğinde doğrusal olmayan malzeme özellikleri ile modellenerek benzer çalışmalar ile güçlendirme etkinliği değerlendirilebilir. Deneysel modal analiz sonuçlarına göre güncellenen yapı modellerinin performans hedeflerini sağlayıp sağlamadığı değerlendirilebilir. Bunun yanı sıra bu yapının “digital twin” diye tabir edilen sanal simülasyonunu, CESMD veri tabanından meydana gelecek deprem kayıtlarını eş zamanlı erişip yapının güncel durumunu dakikalar içerisinde değerlendirebilecek bir çalışma olarak devam edilebilir.

Aktif deprem kuşağında bulunan ülkemizde riskli bölgelerde mevcut binalar yapı stoğunun önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Yapıların güvenlik durumlarını, yapıya eklenecek sensörlerden elde edilen verileri hızlı bir şekilde değerlendirmek adına analiz edecek açık kaynak kodlu yerli bir yazılım geliştirilebilir. Ayrıca sigortacılık sektöründe de yapıların değerlendirilmesi adına yapının güncel durumu yine bu şekilde belirlenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Aytulun E., Soyoz S., (2020), “Structural Health Monitoring of a Tall Building Before, During and After Earthquake”, Turkish Journal of Earthquake Research , 2(1), 61-75.
- [2] Şafak E., (1991), “Identification of lineer structures using discrete-time filters”, Journal of Structural Engineering, 117(10), 3064-3085.
- [3] Çelebi M., (2000), “GPS in dynamic monitoring of long-period structures”, Soil Dynamic and Earthquake Engineering, 20(5-8), 477-483.
- [4] Krawinkler H., (2005), “Van Nuys hotel building testbed report: exercising seismic performance assessment”, 2005/11, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, USA.
- [5] Bayraktar A., Türker T., Sevim B., Altunişik A.C., Yıldırım F., (2009), “Modal Parameter Identification of Hagia Sophia Bell-Tower via Ambient Vibration Test”, Journal of Nondestructive Evaluation, 28(1), 37-47.
- [6] Gürkan K., Gürkan G., Dindar A., Akpınar B., Gülal E., (2013), “Wireless 3-Axis Accelerometer System for Measurement of Structural Displacement”, 8Th International Conference On Electrical And Electronics Engineering (Eleco), 403-406, New York, USA, 28 November.
- [7] Soyoz S., Taciroglu E., Orakcal K., Nigbor R., Skolnik D., Lus H., Safak E., (2013), “Ambient and Forced Vibration Testing of a Reinforced Concrete Building before and after Its Seismic Retrofitting”, Journal of Structural Engineering © ASCE, 237(10), 1741-1752.
- [8] Boru E., Kutanis M., (2015), “Çevrel titreşim kayıtları kullanılarak yapı dinamik parametrelerinin belirlenmesi”, Sakarya University Journal of Science, 19(1), 59-66.
- [9] Beyen K., (2017), “Fatih Camii'nin zaman ve frekans ortamında çevrel ve deprem tepki analizleri”, Uluslararası Katılımlı 6. Tarihi Yapıların Korunması ve Güçlendirmesi Sempozyumu, 1-12 , Trabzon, Türkiye, 1-2 Kasım.
- [10] Sert A., Beyen K., (2018), “Sistem Tanılama Algoritmaları Kullanılarak Yapı Dinamik Karakteristiğinin Tahmini”, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 2(2), 55-63
- [11] Sert A., (2019), “Sistem Tanılama Algoritmaları Yardımıyla Yapı Dinamik Karakteristiğinin Tahmini”, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi.
- [12] Hökelekli E., Ercan E., Nohutçu H., Demir A., Gençel O., (2017) “Tarihi Bir Camiinin Dinamik Karakteristiklerinin Analitik ve Deneysel Yöntemlerle

Belirlenmesi”, Uluslararası Katılımlı 6. Tarihi Yapıların Korunması ve Güçlendirmesi Sempozyumu, 373-380, Trabzon, Türkiye, 1-2 Kasım.

- [13] Darılmaz K., (2015), “Depreme Dayanıklı Betonarme Binaların Tasarımına Giriş”, 1. Baskı, Yapı Yazılımları Yayınları.
- [14] Chopra A., (2013), “Theory and Application to Eartquake Engineering”, 4. Edition, Pearson Education.
- [15] Dinçer S., Aydın E., Gencer H., (2015), “Binalarda Yapısal Sağlık Takibi İçin Enstrümantasyon Yöntemleri”, Sekizince Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 1-12, İstanbul, Türkiye, 11-14 Mayıs.
- [16] Ersoy U., Ozcebe G., Tankut T., (2010), “Reinforced Concrete”, 8th Edition, METU Press.
- [17] Dindar A., (2018), “Şekil Değiştirmeye Göre Değerlendirme ve Tasarım”, TBDY 2018 Semineri, Gebze İmo Temsilciliği.
- [18] Bal İ.E., (2019), “Deprem Etkisinde Betonarme Binaların Göçme Riskinin Hızlı Değerlendirme Yöntemleri İle Belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [19] Diaferio M., Foti D., Mongelli M., Giannoccaro N.I., Andersen P., (2011), “Operational modal analysis of a historic tower in Bari”, Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanis Series, 335-342, New York, USA, 18 February.
- [20] Ventura C., Laverick B., Brincker R., Andersen, P., (2003), “Comparison of dynamic characteristics of two instrumented tall buildings”. The International Modal Analysis Conference, 236-242, Florida, USA, 3-6 February.
- [21] Beyen K., (2017), “Titreşim Verisiyle Güncellenmiş Sonlu Eleman Modeliyle Hasar Simulasyonu”, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 32(2), 403-415.
- [22] T.C. İçişleri Bakanlığı, (2020), “Yapı Sağlığı İzleme Sistemi Uygulama Yönergesi”, Strateji Geliştirme Başkanlığı.
- [23] CSB, (2018), “Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018”, Yönetmelik Hazırlama Komisyonu.
- [24] Celebi M., (2002), “Seismic instrumentation of buildings (with emphasis on federal buildings)”, Report No: 0-7460-68170, United States Geological Survey, Menlo Park, USA.
- [25] Limongelli M.P., Çelebi M., (2019), “Seismic structural health monitoring: from theory to successful applications”, 1. Edition, Springer.

- [26] Brincker R., Ventura C., (2015), "Introduction to operational modal analysis", 1. Edition, Wiley.
- [27] Kuyumcuoğlu A., (2008), "Çalışma Şartlarında Modal Analiz", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [28] Web 1, (2021), www.svibs.com, (Erişim Tarihi, 28/02/2021).
- [29] Mieloszyk M., Opoka S., Ostachowicz W., (2015), "Frequency Domain Decomposition performed on the strain data obtained from the aluminium model of an offshore support structure", 11th International Conference on Damage Assessment of Structures, 1-9, Ghent, Belgium, 24-26 August.
- [30] Web 2, (2021), www.bksv.com, (Erişim Tarihi, 28/02/2021).
- [31] Web 3, (2021), www.strongmotioncenter.org, (Erişim Tarihi, 26/02/2021).
- [32] Beyen, K. (2015), "Hasar tanılama analizlerinde frekans-zaman çözümlenmesi", 5. International Earthquake Symposium, 595-599, Kocaeli, Türkiye, 10-12 Haziran.
- [33] Todorovska M.I., Trifunac M.D., (2008), "Impulse response analysis of the Van Nuys 7-storey hotel during 11 earthquakes and earthquake damage detection. Structural Control and Health Monitoring", The Official Journal of the International Association for Structural Control and Monitoring and of the European Association for the Control of Structures, 15(1), 90-116.

ÖZGEÇMİŞ

Habib Ferhat KURTAY, 2012 yılında Batman Anadolu Lisesinden mezun oldu. 2017 yılında Kocaeli Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünden mezun oldu. Aynı yıl Gebze Teknik Üniversitesi Deprem ve Yapı Mühendisliği bölümünde yüksek lisans eğitimine başladı. 2017-2018 yılları arasında depolama tankları ile ilgili bir özel şirkette görev aldı. 2018 yılından bu yana bir Statik Proje Ofisinde, Endüstriyel Yapılar alanında çalışmaktadır.



EKLER

Ek A: Tez Çalışması Kapsamında Yapılan Yayınlar

Kurtay H.F., Aysin S., Ugur A.F., Dindar A.A., (2021), “An algorithm recommendation with Application Programming Interface for determining Modal Assurance Criterion of Seismic-Retrofitted RC Building”, 6th International Conference on Earthquake Engineering and Seismology, 325-334, Kocaeli, Turkey, 13-15 October.

Ek B: Güçlendirilmemiş Modelin Güncellemesi İşlemlerinde Kullanılan Python Dilinde Yazılmış Algoritma

Tablo B1.1: Güçlendirilmemiş model güncelleme işleminde kullanılan algoritma.

```
#####  
####  
##### AAD VAN NUYS BİGBEAR (1992) MODAL UPDATE PROGRAM  
#####  
#####  
####  
""""  
  
""""  
  
#%%  
  
ret_SAP2000_open = 1  
  
#%% import modules  
import os  
import shutil  
import sys  
import comtypes.client  
import matplotlib.pyplot as plt  
import datetime
```

Tablo B1.1:Devam.

```

import pandas as pd
import numpy as np
basladik = datetime.datetime.now()
def metinInfo( message , giris = "=>" ,topLine = "-" , botLine="-"):
    simdi = datetime.datetime.now()

    metin = f"{simdi.strftime('%Y_%m%d-%H:%M:%S')} | {giris} | {message} @ { simdi -
basladik}"
    print( f"{topLine * len( metin)}\n{metin}\n{botLine*len(metin)}")

#%% SAP2000 programını açalım

if ret_SAP2000_open == 1 :

    helper = comtypes.client.CreateObject('SAP2000v1.Helper')
    helper = helper.QueryInterface(comtypes.gen.SAP2000v1.cHelper)
    mySapObject = helper.GetObject("CSI.SAP2000.API.SapObject")
    mySapObject = helper.CreateObjectProgID("CSI.SAP2000.API.SapObject")
    # SAP2000 açılır
    mySapObject.ApplicationStart()

# Dosyayı açalım

filePath , fileName = "2-VanNuys_models" , "1-BİGBEAR (1992)-v2.sdb"
filePath , fileName = "2-VanNuys_models" , "0-BİGBEAR (1992)deneme.sdb"

T1_x_target , T1_y_target = 1.24 , 1.13

tolerance = 0.01

Bigbear (1992)_roof_disp = pd.read_csv("1-Bigbear (1992)-Recorded.txt")

SapModel = mySapObject.SapModel

ret_SAP2000_open = SapModel.File.OpenFile( os.path.join( os.getcwd() , filePath , fileName) )

SapModel.File.Save( os.path.join( os.getcwd() , filePath , "T-"+fileName) )

```

Tablo B1.1:Devam.

```

E_alt = 0
E_ust = 80_000_000
iteration_df = pd.DataFrame( columns= ["Ec","T1_x","T1_y"])

for iteration in range( 0, 25 ):

    E_ata = np.random.uniform( 0.4 , 0.6 ) * ( E_alt + E_ust )

    ret = SapModel.SetModelIsLocked(False)

    material_name = "CONCRETE_3KSI_20.68428MPa"
    #material_name = "CONCRETE_4KSI_27.5790MPa"
    #material_name = "CONCRETE_5KSI_34.4738MPa"
    poisson = 0.2

    modulus_of_elasticity , thermal_coeff, shear_modulus = E_ata , 9.900E-06 ,
E_ata/(2*(1+poisson))

if iteration != 0 :
    ret_elasticity_update = SapModel.PropMaterial.SetMPIsotropic( material_name, E_ata ,
    poisson , thermal_coeff, shear_modulus)

    #if ret_elasticity_update == 0 : metinInfo( "Elastisite modülü updated")

    %% Modal Analiz Yapılmasını ekleyelim.
    ret_analiz = SapModel.Analyze.RunAnalysis()

    # Modal değerleri okuyalım.
    NumberResults, LoadCase, StepType, StepNum, Period, Ux, Uy, Uz, SumUx, SumUy,
SumUz, Rx, Ry, Rz, SumRx, SumRy, SumRz = 0 , [], [], [], [], [], [], [], [], [], [], [], [],
[], [], []

    NumberResults, LoadCase, StepType, StepNum, Period, Ux, Uy, Uz, SumUx, SumUy,
SumUz, Rx, Ry, Rz, SumRx, SumRy, SumRz , ret_get_modal_results =
SapModel.Results.ModalParticipatingMassRatios(NumberResults, LoadCase, StepType,
StepNum, Period, Ux, Uy, Uz, SumUx, SumUy, SumUz, Rx, Ry, Rz, SumRx, SumRy, SumRz)

```

Tablo B1.1:Devam.

```

modal_dict = {"Period" : Period , "Ux": Ux , "Uy" : Uy , "Rz" : Rz}
modal_df = pd.DataFrame( modal_dict)

period_modes = {}
for counter, satir_df in modal_df.loc[:2].iterrows():
    satir_values = list( satir_df[["Ux","Uy","Rz"]] )
    direction = ["Ux","Uy","Rz"][satir_values.index( max(satir_values))]
    period_modes[ direction ] = round( satir_df.Period , 2 )
T1_x , T1_y = period_modes["Ux"] , period_modes["Uy"]

# kayıt edelim.
iteration_df.loc[ len( iteration_df)] = [E_ata , T1_x , T1_y]

#if iteration == 0 : break
if len( iteration_df) > 2:
    if iteration_df["Ec"].iloc[-2] == iteration_df["Ec"].iloc[-1] :
        metinInfo( "Convergence Hatası var"," FATAL ERROR")
        break

    if T1_x_target * ( 1 - tolerance) <= T1_x and T1_x_target * ( 1 + tolerance) >= T1_x and
T1_y_target * ( 1 - tolerance) <= T1_y and T1_y_target * ( 1 + tolerance) >= T1_y :
        metinInfo( f" {E_ata = } için Periyot değerleri {T1_x = }sn & {T1_y = }sn sağlanmıştır")
        metinInfo( f"Hata oranları { round ((T1_x_target- T1_x) / T1_x , 4)} & {round(
(T1_y_target- T1_y) / T1_y , 4)}")
        break
    else :
        metinInfo( f" {E_ata = } için Periyot değerleri {T1_x = }sn & {T1_y = }sn sağlanmamıştır"
,giris=" H A T A " )
        # Sınırları değiştirelim
=====

    if iteration != 0 :
        if T1_x < T1_x_target * ( 1 - tolerance) :
            E_ust = modulus_of_elasticity
        elif T1_x > T1_x_target * ( 1 + tolerance) :
            E_alt = modulus_of_elasticity

metinInfo( " * * * Koşunun sonu * * * " , " : ")
# %%

```

Ek C: Güçlendirilmiş Modelin Güncellemesi İşlemlerinde Kullanılan Python Dilinde Yazılmış Algoritma

Tablo C1.1: Güçlendirilmiş model güncelleme işleminde kullanılan algoritma.

```
#####  
####  
##### AAD VAN NUYS BİGBEAR (1992) MODAL UPDATE PROGRAM  
#####  
#####  
####  
""""  
  
""""  
  
#%%  
  
ret_SAP2000_open = 1  
  
#%% import modules  
import os  
import shutil  
import sys  
import comtypes.client  
import matplotlib.pyplot as plt  
import datetime  
import pandas as pd  
import numpy as np  
  
basladik = datetime.datetime.now()  
def metinInfo( message , giris = ">" ,topLine = "-" , botLine="-"):  
    simdi = datetime.datetime.now()  
  
    metin = f"{simdi.strftime('%Y_%m%d-%H:%M:%S')} | {giris} | {message} @ { simdi -  
basladik}"  
    print( f"{topLine * len( metin)}\n{metin}\n{botLine*len(metin)}")  
  
#%% SAP2000 programını açalım  
if ret_SAP2000_open == 1 :
```

Tablo C1.1:Devam.

```

helper = comtypes.client.CreateObject('SAP2000v1.Helper')
helper = helper.QueryInterface(comtypes.gen.SAP2000v1.cHelper)
mySapObject = helper.GetObject("CSI.SAP2000.API.SapObject")
mySapObject = helper.CreateObjectProgID("CSI.SAP2000.API.SapObject")
# SAP2000 açılır
mySapObject.ApplicationStart()

# Dosyayı açalım
#
#filePath , fileName = "2-VanNuys_models" , "1-BİGBEAR (1992)-v2.sdb"
#filePath , fileName = "2-VanNuys_models" , "0-BİGBEAR (1992)deneme.sdb"
#filePath , fileName = "2-VanNuys_models" , "ENCİNO (2014)050122_3KSI.sdb"
filePath = "2-VanNuys_models"
fileName = "ENCİNO (2014)060122b-v1.sdb"

T1_x_target , T1_y_target = 0.40 , 0.45

tolerance = 0.035

Bigbear (1992)_roof_disp = pd.read_csv("1-Bigbear (1992)-Recorded.txt")

SapModel = mySapObject.SapModel

ret_SAP2000_open = SapModel.File.OpenFile( os.path.join( os.getcwd() , filePath , fileName) )

SapModel.File.Save( os.path.join( os.getcwd() , filePath , "T-"+fileName) )

E_alt = 0
E_ust = 50_000_000
iteration_df = pd.DataFrame( columns= ["Ec","T1_x","T1_y"])
for iteration in range( 0, 20 ):

    E_ata = np.random.uniform( 0.4 , 0.6 ) * ( E_alt + E_ust )

    ret = SapModel.SetModelIsLocked(False)

```

Tablo C1.1:Devam.

```

#material_name = "CONCRETE_3KSI_20.68428MPa"
#material_name = "CONCRETE_4KSI_27.5790MPa"
#material_name = "CONCRETE_5KSI_34.4738MPa"
material_name = "w_CONCRETE_5KSI_34.4738MPa"

poisson = 0.2

modulus_of_elasticity , thermal_coeff, shear_modulus = E_ata , 9.900E-06 ,
E_ata/(2*(1+poisson))

if iteration != 0 :
    ret_elasticity_update = SapModel.PropMaterial.SetMPIsotropic( material_name, E_ata ,
    poisson , thermal_coeff, shear_modulus)

    #if ret_elasticity_update == 0 : metinInfo( "Elastisite modülü updated")

    #% Modal Analiz Yapılmasını ekleyelim.
    ret_analiz = SapModel.Analyze.RunAnalysis()

    # Modal değerleri okuyalım.

    NumberResults, LoadCase, StepType, StepNum, Period, Ux, Uy, Uz, SumUx, SumUy, SumUz,
    Rx, Ry, Rz, SumRx, SumRy, SumRz = 0 , [], [], [], [], [], [], [], [], [], [], [], [], []

    NumberResults, LoadCase, StepType, StepNum, Period, Ux, Uy, Uz, SumUx, SumUy, SumUz,
    Rx, Ry, Rz, SumRx, SumRy, SumRz , ret_get_modal_results =
    SapModel.Results.ModalParticipatingMassRatios(NumberResults, LoadCase, StepType, StepNum,
    Period, Ux, Uy, Uz, SumUx, SumUy, SumUz, Rx, Ry, Rz, SumRx, SumRy, SumRz)

    modal_dict = {"Period" : Period , "Ux": Ux , "Uy" : Uy , "Rz" : Rz}
    modal_df = pd.DataFrame( modal_dict)

    period_modes = {}
    for counter, satir_df in modal_df.loc[:2].iterrows():
        satir_values = list( satir_df[["Ux","Uy","Rz"]] )
        direction = ["Ux","Uy","Rz"][satir_values.index( max(satir_values))]
        period_modes[ direction ] = round( satir_df.Period , 2 )

```

Tablo C1.1:Devam.

```

T1_x , T1_y = period_modes["Ux"] , period_modes["Uy"]

# kayıt edelim.
iteration_df.loc[ len( iteration_df ) ] = [ E_ata , T1_x , T1_y ]

#if iteration == 0 : break

if len( iteration_df ) > 2:
    if iteration_df["Ec"].iloc[-2] == iteration_df["Ec"].iloc[-1] :
        metinInfo( "Convergence Hatası var"," FATAL ERROR" )
        break

    if T1_x_target * ( 1 - tolerance ) <= T1_x and T1_x_target * ( 1 + tolerance ) >= T1_x and
T1_y_target * ( 1 - tolerance ) <= T1_y and T1_y_target * ( 1 + tolerance ) >= T1_y :
        metinInfo( f" {material_name = } için {E_ata = } için Periyot değerleri {T1_x = }sn & {T1_y
= }sn sağlanmıştır" )
        metinInfo( f"Hata oranları { round( (T1_x_target- T1_x) / T1_x , 4) } & {round( (T1_y_target-
T1_y) / T1_y , 4) }" )
        break
    else :
        metinInfo( f" {E_ata = } için Periyot değerleri {T1_x = }sn & {T1_y = }sn sağlanmamıştır"
,giris=" H A T A " )

#                                                                 Sınırları                                                                 değiştirelim
=====

if iteration != 0 :
    if T1_x < T1_x_target * ( 1 - tolerance ) :
        E_ust = modulus_of_elasticity
    elif T1_x > T1_x_target * ( 1 + tolerance ) :
        E_alt = modulus_of_elasticity

metinInfo( " * * * Koşunun sonu * * * " , " : " )
# %%

```