

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ÇOK KATLI BETONARME BİNALARIN DENEYSEL DİNAMİK  
KARAKTERİSTİKLERİNİN VE YAKIN FAY YER HAREKETİ ETKİSİNDEKİ  
İZOLATÖRLÜ DAVRANIŞLARININ BELİRLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İnş. Müh. Betül DEMİRTAŞ**

**ARALIK 2014  
TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ÇOK KATLI BETONARME BİNALARIN DENEYSEL DİNAMİK  
KARAKTERİSTİKLERİNİN VE YAKIN FAY YER HAREKETİ ETKİSİNDEKİ  
İZOLATÖRLÜ DAVRANIŞLARININ BELİRLENMESİ**

**İnş. Müh. Betül DEMİRTAŞ**

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

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 05.12.2014  
Tezin Savunma Tarihi : 26.12.2014**

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

**Trabzon 2014**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında**

**Betül DEMİRTAŞ tarafından hazırlanan**

**ÇOK KATLI BETONARME BİNALARIN DENEYSEL DİNAMİK  
KARAKTERİSTİKLERİNİN VE YAKIN FAY YER HAREKETİ  
ETKİSİNDEKİ İZOLATÖRLÜ DAVRANIŞLARININ BELİRLENMESİ**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 09/12/2014 gün ve 1580 sayılı  
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
olarak kabul edilmiştir.**

**Jüri Üyeleri**

**Başkan : Prof. Dr. Muzaffer DOĞAN .....**

**Üye : Prof. Dr. Alemdar BAYRAKTAR .....**

**Üye : Yrd. Doç. Dr. Temel TÜRKER .....**

**Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ**

**Enstitü Müdürü**

## ÖNSÖZ

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

“Çok Katlı Betonarme Binaların Deneysel Dinamik Karakteristiklerinin ve Yakın Fay Yer Hareketi Etkisindeki İzolatörlü Davranışlarının Belirlenmesi” isimli tez çalışmasını bana öneren, çalışmamın her aşamasında bilgi ve tecrübeleriyle daima yanımda olan, beni sürekli teşvik edip destekleyen çok değerli Hocam, Sayın Prof. Dr. Alemdar BAYRAKTAR'a minnet ve şükranlarımı sunmayı bir borç bilirim.

Tez çalışmamın gerçekleştirilmesinde değerli görüşlerini ve bilgilerini benimle paylaşan, yardım ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen değerli Hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Temel TÜRKER'e göstermiş olduğu özveri, anlayış ve içtenliğinden dolayı çok teşekkür ederim. Tezin hazırlanması sırasında yardımlarını esirgemeyen Doç. Dr. Şevket ATEŞ'e, Arş. Gör. Zeliha KUYUMCU'ya, Arş. Gör. Muhammet YURDAKUL'a, İnş. Yük. Müh. İsmet ÇALIK'a ve İnş. Müh. Emre SARI'ya yardımlarında dolayı çok teşekkür ederim.

Hayatım boyunca desteklerini, sevgilerini ve güvenlerini benden hiçbir zaman esirgemeyen, haklarını hiçbir zaman ödeyemeyeceğim sevgili annem Ayşe Hatun DEMİRTAŞ'a ve değerli babam Ali DEMİRTAŞ'a ve onların bana en güzel hediyeleri olan biricik kız kardeşim Hatice DEMİRTAŞ'a ve erkek kardeşlerim Abdulkadir DEMİRTAŞ ve Abdulsamet DEMİRTAŞ'a minnet ve şükranlarımı sunmayı bir borç bilirim. Bu tez çalışmasının benzer çalışmalara kaynak ve örnek teşkil etmesini ve ülkemize yararlı olmasını içtenlikle dilerim.

Betül DEMİRTAŞ  
Trabzon 2014

## TEZ BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Çok Katlı Betonarme Binaların Deneysel Dinamik Karakteristiklerinin ve Yakın Fay Yer Hareketi Etkisindeki İzolatörlü Davranışlarının Belirlenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Alemdar BAYRAKTAR’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.  
05/12/2014

Betül DEMİRTAŞ

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ .....	III
TEZ BEYANNAMESİ .....	IV
İÇİNDEKİLER .....	V
ÖZET .....	VIII
SUMMARY .....	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	X
TABLolar DİZİNİ .....	XII
SEMBOLLER DİZİNİ .....	XIII
1. GENEL BİLGİLER .....	1
1.1. Giriş .....	1
1.2. Konuyla İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar .....	1
1.3. Tezin Amacı ve Kapsamı .....	5
1.4. Teorik ve Deneysel Dinamik Karakteristiklerin Belirlenme Yöntemleri .....	6
1.4.1 Teorik Modal Analiz Yöntemi .....	6
1.4.1.1. Tek Serbestlik Dereceli Sistemler .....	7
1.4.1.2. Çok Serbestlik Dereceli Sistemler .....	11
1.4.2. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi .....	14
1.4.2.1 Operasyonel Modal Analiz Yönteminde Kullanılan Test Aletleri .....	15
1.4.2.1.1. Titreştiriciler .....	15
1.4.2.1.2. İvmeölçerler .....	17
1.4.2.1.3. Veri Toplama Ünitesi ve Sinyal İşleme .....	19
1.4.2.2. Dinamik Karakteristiklerin Elde Edilme Yöntemleri .....	20
1.4.2.2.1. Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma (GFTAA) Yöntemi .....	21
1.5. Sonlu Eleman Model İyileştirme Yöntemleri .....	22
1.6. Sismik İzolatör Çeşitleri .....	23
1.6.1. Tabakalı Kauçuk Mesnet Sistemleri .....	23
1.6.2. Elastik Sürtümlü Mesnet Sistemleri .....	24
1.6.3 Fransız Elektrik Mesnet Sistemleri .....	25

1.6.4.	Kayıcı Elastik Sürtünmeli Mesnet Sistemleri.....	25
1.6.5.	Yüksek Sönümlü Kauçuk Mesnet Sistemleri .....	26
1.6.6.	Sürtünmeli Mesnet Sistemleri .....	27
1.6.7.	Çapraz Doğrusal Hareket Sistemleri.....	27
1.6.8.	Çelik Bilyeli İzolatörler.....	28
1.6.9.	Sürtünmeli Sarkaç Mesnet Sistemleri .....	28
1.6.10.	Yeni Zelanda Mesnet Sistemleri.....	30
1.6.10.1.	Kurşun Çekirdekli Kauçuk Mesnetlerin Mekanik Özellikleri .....	31
1.7.	Yakın ve Uzak Fay Yer Hareketlerinin Özellikleri .....	34
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR .....	35
2.1.	Giriş.....	35
2.2.	Seçilen Çok Katlı Bina ve Özellikleri.....	35
2.3.	Binanın Teorik Modal Analizi.....	36
2.3.1.	Üç Boyutlu Sonlu Eleman Modeli.....	36
2.3.2.	Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Bina Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi.....	37
2.4.	Binanın Operasyonel Modal Analizi .....	39
2.4.1.	Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi .....	42
2.4.1.1.	Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma (GFTAA) Yöntemi ile Elde Edilen Dinamik Karakteristikler.....	42
2.5.	Deneysel ve Teorik Dinamik Karakteristiklerin Karşılaştırılması .....	44
2.6.	Binanın Sonlu Eleman Modelinin İyileştirilmesi .....	48
2.7.	Binanın Sonlu Eleman Modelinin İzolatörlü Olarak Oluşturulması .....	50
2.7.1.	İzolatörlü ve İzolatsız Binanın Dinamik Karakteristiklerinin Karşılaştırılması.....	51
2.8.	Yakın ve Uzak Fay Yer Hareketleri İçin İzolatsız ve İzolatörlü Bina Modellerinin Analizi .....	52
2.8.1.	Seçilen Yakın ve Uzak Fay Yer Hareketleri .....	52
2.8.2.	Yakın ve Uzak Fay Yer Hareketleri İçin Binanın Başlangıç Modelinin Analizi .....	57
2.8.3.	Yakın ve Uzak Fay Yer Hareketleri İçin Binanın İyileştirilmiş Modelinin Analizi .....	59
2.8.4.	Yakın ve Uzak Fay Yer Hareketleri İçin Binanın İzolatörlü Modelinin Analizi .....	61
2.8.5.	Yakın ve Uzak Fay Yer Hareketleri İçin Sonuçların Karşılaştırılması.....	64

3.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	65
4.	KAYNAKLAR.....	68
	ÖZGEÇMİŞ	



Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

ÇOK KATLI BETONARME BİNALARIN DENEYSEL DİNAMİK  
KARAKTERİSTİKLERİNİN ve YAKIN FAY YER HAREKETİ ETKİSİNDEKİ  
İZOLATÖRLÜ DAVRANIŞLARININ BELİRLENMESİ

Betül DEMİRTAŞ

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Prof. Dr. Alemdar BAYRAKTAR  
2014, 72 Sayfa

Bu tez çalışmasında, çok katlı betonarme bir binanın dinamik karakteristiklerinin Operasyonel Modal Analiz ve Sonlu Elemanlar Yöntemleri'yle belirlenerek, yakın ve uzak fay yer hareketleri için izolatörlü ve izolatörsüz deprem davranışlarının araştırılması amaçlanmıştır. Tez çalışması üç bölümden oluşmaktadır. Birinci Bölümde, konuyla ilgili yapılan çalışmalar ile kullanılan teorik ve deneysel yöntemlere ait formülasyonlar verilmektedir. İkinci Bölümde, seçilen binanın sonlu eleman modelinin oluşturulması, deneysel ve teorik dinamik karakteristiklerinin elde edilmesi ve başlangıç analitik modelinin iyileştirilmesi sunulmaktadır. Ayrıca, bu bölümde seçilen binanın izolatörsüz ve izolatörlü modellerinin yakın ve uzak fay deprem etkisi altında davranışlarındaki değişimler de incelenmektedir. Üçüncü Bölümde, yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar ve öneriler sunulmaktadır. Sonuç Bölümünü, çalışmanın hazırlanmasında yararlanılan kaynaklar izlemektedir. Çalışma sonucunda, Operasyonel Modal Analiz Yöntemi'nin çok katlı betonarme binaların dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde ve sonlu eleman modellerinin iyileştirilmesinde güvenle kullanılabileceği görülmüştür. Bunun yanında, izolatörlü ve izolatörsüz çok katlı betonarme binaların tasarımında yakın fay yer hareketi etkilerinin dikkate alınması gerektiği sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Çok Katlı Betonarme Bina, Operasyonel Modal Analiz, Dinamik Karakteristikler, Sonlu Eleman Model İyileştirme, Sismik İzolasyon

Master Thesis

SUMMARY

DETERMINATION OF EXPERIMENTAL DYNAMIC CHARACTERISTICS  
AND BEHAVIOURS WITH ISOLATOR UNDER NEAR FAULT GROUND MOTION  
EFFECT OF MULTI STOREY REINFORCED CONCRETE BUILDINGS

Betül DEMİRTAŞ

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Civil Engineering Graduate Program  
Supervisor: Prof. Dr. Alemdar BAYRAKTAR  
2014, 72 Pages

In this thesis, it is aimed to determine the dynamic characteristics of a multi storey reinforced concrete building by Operational Modal Analysis and Finite Element Methods, and investigate the earthquake behavior of the building with and without base isolator, under near and far fault ground motions. The presented thesis consists of mainly three chapters. In the first chapter, the studies performed on this subject are mentioned and the formulations of theoretical and experimental methods which are used are given. In the second chapter, the creation of the finite element model of the selected building, the determination of experimental and theoretical dynamic characteristics and the updating of the initial analytical model are presented. In addition, the changes in the structural behavior of the building with and without isolator are also investigated under near and far fault earthquake motions. In the third chapter, the results of the study and suggestions are presented. The third chapter is followed by the references used in this thesis. As a result, Operational Modal Analysis Method can be used safely to determine the dynamic characteristics of reinforced concrete multi story buildings and to update of the finite element models. Besides, the near-fault earthquake effects should be taken into account in the design of multi storey buildings with and without isolator.

**Key Words:** Multi Storey Reinforced Concrete Buildings, Operational Modal Analysis, Dynamic Characteristics, Finite Element Model Updating, Seismic Isolation

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
Şekil 1.1. TSDS ait titreşim modeli .....	7
Şekil 1.2. TSDS ait serbest cisim diyagramı .....	7
Şekil 1.3. İki serbestlik dereceli sisteme ait titreşim modeli .....	12
Şekil 1.4. Operasyonel Modal Analiz Yöntemine ait ölçüm şeması .....	14
Şekil 1.5. Çeşitli sarsıcılar .....	16
Şekil 1.6. Yaygın olarak kullanılan çekiç türü .....	17
Şekil 1.7. Farklı modellerdeki darbe çekiçleri.....	17
Şekil 1.8. Piezoelektrik ivmeölçer modelleri.....	18
Şekil 1.9. Piezoelektrik ivmeölçerin şematik gösterimi.....	19
Şekil 1.10. B&K3560 tipi on yedi kanallı veri toplama ünitesi .....	20
Şekil 1.11. Tabakalı kauçuk mesnet sistemi.....	24
Şekil 1.12. Elastik sürtünmeli mesnet sistemi .....	24
Şekil 1.13. Fransız elektrik mesnet sistemi .....	25
Şekil 1.14. Kayıcı elastik sürtünmeli mesnet sistemi .....	26
Şekil 1.15. Yüksek sönümlü kauçuk mesnet sistemi .....	26
Şekil 1.16. Sürtünmeli mesnet sistemi .....	27
Şekil 1.17. Çapraz doğrusal hareket sisteminin görünüşü .....	28
Şekil 1.18. ÇBİ sisteminin görünüşü .....	28
Şekil 1.19. Sarkaç hareketinin SSM sistemine geçişinin gösterimi.....	29
Şekil 1.20. Sürtünmeli sarkaç mesnet sistemi .....	29
Şekil 1.21. Yeni Zelanda mesnet sistemi .....	31
Şekil 2.1. Binanın farklı açılardan görünüşleri.....	36
Şekil 2.2. Başlangıç sonlu eleman modeli.....	37
Şekil 2.3. Binanın başlangıç sonlu eleman modeline ait ilk yedi mod şekli .....	38
Şekil 2.4. Binanın her bir katındaki ivmeölçer yerleşim düzeni.....	40
Şekil 2.5. Binada ivmeölçer yerleşimine ait görüntüler.....	41
Şekil 2.6. Veri toplama sistemi.....	42
Şekil 2.7. Bina ölçümüne ait GFTAA Yöntemi kullanılarak elde edilen spektrum ....	43

Şekil 2.8.	Binanın deneysel olarak ölçülen ilk yedi mod şekli.....	44
Şekil 2.9.	Binaya ait deneysel ve teorik mod şekillerinin karşılaştırılması.....	45
Şekil 2.10	Binanın iyileştirilmiş sonlu eleman modeline ait ilk yedi mod şekli .....	49
Şekil 2.11.	Binanın izolatörlü sonlu eleman modeli .....	50
Şekil 2.12.	Seçilen depremlere ait ivme-zaman grafikleri .....	53
Şekil 2.13.	Seçilen depremlere ait hız-zaman grafikleri .....	54
Şekil 2.14.	Seçilen depremlere ait yerdeğiştirme-zaman grafikleri.....	55
Şekil 2.15.	Seçilen depremlere ait spektrum eğrileri .....	56
Şekil 2.16.	Başlangıç modeline ait yerdeğiştirme-zaman grafikleri.....	57
Şekil 2.17.	Başlangıç modeline ait taban kesme kuvveti-zaman grafikleri .....	58
Şekil 2.18.	İyileştirilmiş modele ait yerdeğiştirme-zaman grafikleri .....	59
Şekil 2.19.	İyileştirilmiş modele ait taban kesme kuvveti-zaman grafikleri .....	60
Şekil 2.20.	İzolatörlü modele ait yerdeğiştirme-zaman grafikleri .....	61
Şekil 2.21.	İzolatörlü modele ait taban kesme kuvveti-zaman grafikleri.....	62

## TABLolar DİZİNİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
Tablo 2.1. Binanın teorik modal analizinde kullanılan malzeme özellikleri.....	36
Tablo 2.2. Başlangıç modellerine ait doğal frekans ve periyot değerleri .....	38
Tablo 2.3. Binanın ölçümlerinden elde edilen doğal frekans ve sönüm oranları.....	43
Tablo 2.4. Binanın deneysel ve analitik doğal frekansların karşılaştırılması.....	44
Tablo 2.5. Binanın iyileştirilmiş sonlu eleman modeline ait malzeme özellikleri .....	48
Tablo 2.6. Binanın iyileştirilmiş sonlu eleman modelinde kullanılan yay katsayıları .	48
Tablo 2.7. Binanın iyileştirilmiş sonlu eleman modelinden elde edilen doğal frekanslar .....	49
Tablo 2.8. İzolatörlere ait doğrusal ve doğrusal olmayan özellikler.....	51
Tablo 2.9. İzolatörlü ve izolatörsüz sonlu eleman modeline ait periyot değerleri.....	51
Tablo 2.10. Analizlerde kullanılan yakın ve uzak fay deprem hareketlerinin özellikleri	52
Tablo 2.11. Yakın ve uzak fay deprem etkisi altında izolatörlü ve izolatörsüz modellerin yer değiştirme ve taban kesme kuvveti değerleri .....	64

## SEMBOLLER DİZİNİ

$A$	:Kauçuk malzeme en kesit alanı
$A_k$	:Tepki sinyalinin güç spektral yoğunluk fonksiyonuna ait k. artık değer matrisi
$B_k$	:Tepki sinyalinin güç spektral yoğunluk fonksiyonuna ait k. artık değer matrisi
$c$	:Sönüm katsayısı
$c_{cr}$	:Kritik sönüm
$[C]$	:Sönüm matrisi
$D$	:Kauçuk mesnet üst ucuna ait yatay yerdeğiştirme değeri
$D_y$	:Kauçuk mesnetin akma yerdeğiştirme değeri
$E_c$	:Kauçuk mesnete ait yükleme modülü
$F_D$	:Sönüm kuvveti
$F_I$	:Atalet kuvveti
$F_S$	:Kütle hareketlerinden dolayı yayda oluşan kuvvet
$f(t)$	:Yapıya uygulanan kuvvet
$\{f(t)\}$	:Zamana bağlı kuvvet vektörü
$\{F\}$	: $N*1$ boyutunda zamandan bağımsız kompleks genlikli vektör
$F_y$	:Kauçuk mesnetin akma kuvveti
$f$	:Frekans
$g$	:Yerçekimi ivmesi
$G_{xx}(j\omega)$	:Etki sinyalinin güç spektral yoğunluk fonksiyonu
$G_{yy}(j\omega)$	:Tepki sinyalinin güç spektral yoğunluk fonksiyonu
$\bar{H}$	:Kompleks eşlenik ve transpoze
$H(j\omega)$	:Frekans davranış fonksiyonu
$k$	:Rijitlik
$[K]$	:Rijitlik matrisi

$K_{\text{eff}}$	:Kurşun çekirdekli kauçuk mesnetin etkili rijitliği
$K_1$	:Kurşun çekirdekli kauçuk mesnetin elastik rijitlik değeri
$K_2$	:Kurşun çekirdekli kauçuk mesnete ait akma sonrası rijitlik değeri
$K_H$	:Kauçuk mesnete ait yatay rijitlik değeri
$K_V$	:Kauçuk mesnete ait düşey rijitlik değeri
$m$	:Yapının kütlesi
$[M]$	:Kütle matrisi
$n$	:Mod sayısı
$Q$	:Karakteristik dayanım
$R_k$	:Artık değer fonksiyonu
$S_i$	:Skaler tekil değerleri içeren diyagonal matris
$s_{ij}$	:Skaler tekil değerler
$t$	:Zaman
$t_r$	:Kauçuk tabaka yüksekliği
$T$	:Kompleks transpoze
$T$	:Periyot
$T_D$	:Tasarım periyodu
$U_i$	:Tekil vektörleri içeren bütün matrisi
$u_{ij}$	:Tekil vektörler
$W$	:Bir izolatörün taşıdığı yük
$\lambda_k$	:Kutup fonksiyonu
$ \alpha(\omega) $	:Frekans davranış fonksiyonuna ait genlik değeri
$\theta_a$	:Frekans davranış fonksiyonuna ait faz değeri
$\xi$	:Sönüm oranı
$\omega_n$	:Sönümsüz doğal açısal frekans
$\omega_d$	:Sönümlü doğal açısal frekans
$x(t)$	:Kütlenin yer değiştirmesi
$\dot{x}(t)$	:Kütlenin hızı

$\ddot{x}(t)$	:Kütlenin ivmesi
X	:Yerdeğiştirme
{X}	:N*1 boyutunda zamandan bağımsız kompleks genlikli vektörü
{x(t)}	:Zamana bağlı yerdeğiştirme vektörü
{ $\dot{x}(t)$ }	:Zamana bağlı hız vektörü
{ $\ddot{x}(t)$ }	:Zamana bağlı ivme vektörü
*	:Kompleks eşlenik
$\beta_{\text{eff}}$	:Etkili sönüm oranı
ÇBİ	:Çelik Bilyeli İzolatör
ÇDH	:Çapraz Doğrusal Hareket
ÇSDS	:Çok Serbestlik Dereceli Sistemler
ESM	:Elastik Sürtünmeli Mesnet
FDf	:Frekans Davranış Fonksiyonu
FEM	:Fransız Elastik Mesnet Sistemi
FTAA	:Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma
GFTAA	:Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma
GSY	:Güç Spektral Yoğunluğu
İESS	:İki Eğrilikli Sürtünmeli Sarkaç
KESM	:Kayıcı Elastik Mesnet Sistemi
LRB	:Kurşun Çekirdekli Kauçuk Mesnet
LDRB	:Düşük Sönümleyicili Kauçuk Mesnetler
OMA	:Operasyonel Modal Analiz
SAB	:Stokastik Altalan Belirleme
SEY	:Sonlu Elemanlar Yöntemi
SS	:Sürtünmeli Sarkaç
SMS	:Sürtünmeli Mesnet Sistemi
SSM	:Sürtünmeli Sarkaç Mesneti
TESS	:Tek Eğrilikli Sürtünmeli Sarkaç
TKM	:Tabakalı Kauçuk Mesnet
TSDS	:Tek Serbestlik Dereceli Sistemler



ÜESS :Üç Eğrilikli Sürtünmeli Sarkaç  
YSKM :Yüksek Sönümlü Kauçuk Mesnet  
YK :Yakınsama Kriteri  
YZM :Yeni Zelanda Mesneti

## **1. GENEL BİLGİLER**

### **1.1. Giriş**

Yapılar yakın ve uzak fay depremleri, rüzgâr, dalga ve patlama gibi olayların oluşturduğu titreşimlerin etkisi altında kalmakta ve yeterli dayanıma sahip olmayan yapılar bu titreşim hareketlerine yenik düşmektedir. Çok katlı yapılar söz konusu olduğunda konunun önemi daha da artmaktadır.

Çok katlı mevcut yapıların şiddetli doğa olayları karşısındaki davranışını tahmin edebilmek için öncelikle dinamik karakteristiklerini belirlemek gerekmektedir. Yapıların dinamik karakteristikleri deneysel olarak iki farklı yöntemle belirlenebilmektedir. Bunlar Deneysel Modal Analiz ve Operasyonel Modal Analiz yöntemleridir. Deneysel Modal Analiz Yöntemi'nde yapı bilinen bir kuvvetle titreştirilerek, yapının bu kuvvete karşı vermiş olduğu tepki ölçülmektedir. Operasyonel Modal Analizde ise yapı bilinmeyen kuvvetler (çevresel titreşimler) tarafından titreştirilerek yapının vermiş olduğu tepki ölçülmektedir.

Yapıların dinamik karakteristiklerini teorik olarak belirlemek için kullanılan yöntem ise Sonlu Elemanlar Yöntemi'dir. Bu yöntemle yapıların sonlu eleman modeli oluşturulurken malzeme özelliklerinden sınır şartlarına kadar birçok kabul yapılmaktadır. Bu kabuller doğrultusunda oluşturulan model, yapıların mevcut durumlarına ait dinamik davranışı tam olarak yansıtmadığı için deneysel incelemeler dikkate alınarak sonlu eleman modellerinin iyileştirilmesi gerekmektedir.

Çok katlı yapıların dinamik davranışlarını önemli derecede değiştiren önemli bir faktör bu yapılarda izolatör kullanılmasıdır. Bu nedenle, yakın ve uzak fay yer hareketleri dikkate alınarak çok katlı yapıların izolatörlü ve izolatörsüz davranışlarının belirlenmesi önem arz etmektedir.

### **1.2. Konu ile İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar**

Çok katlı yapılarla ilgili yapılan deneysel ve analitik çalışmalardan bazıları aşağıda sunulmaktadır:

Lord ve Ventura (2002), Vancouver’da çok katlı bir yapının modal parametrelerini belirlemek üzere deneysel ve analitik çalışmalar yapmışlardır. Deneysel çalışmalarda ARTEMIS bilgisayar programı, yapının sonlu eleman modelinin analizinde ise ETABS bilgisayar programı kullanılarak dinamik karakteristikler karşılaştırmalı olarak elde edilmiştir.

Li vd. (2004), 63 katlı bir binanın dinamik karakteristiklerinin tam ölçekli ölçümlerden elde edilmesi üzerine çalışmışlardır. Binanın dinamik karakteristikleri alan ölçümleriyle belirlenerek, bilgisayar modeliyle elde edilen verilerle karşılaştırılmıştır. Ayrıca, bina üzerinde rüzgâra karşı kuvvetin spektral modelini belirlemek için bir dizi rüzgâr tünel testleri yapmışlardır.

Wu ve Li (2004), çevresel titreşim testlerine dayalı olarak Çin’deki 310m’lik Nanjing TV Tower’ın 3-boyutlu sonlu eleman modelinin iyileştirilmesi için özdeğer duyarlılığına dayalı sonlu eleman model güncelleme yöntemi üzerinde çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada kulenin tam ölçekli ölçümleri ve sonlu eleman model güncellemeleri sonucunda elde edilen dinamik karakteristikler arasında iyi bir uyum olduğu belirlenmiştir. Ağırlıklı En Küçük Kareler Yöntemine dayalı sonlu eleman model güncellemenin, Nanjing TV Tower için en etkili yöntem olduğu belirlenmiştir.

Ventura vd. (2005), Çok katlı yapıların güvenilir sonlu eleman modellerinin elde edilmesi için çevresel titreşime dayalı modal tanımlama tekniğinin etkili bir şekilde nasıl kullanılabildiğini göstermeye çalışmışlardır. Bunun için 15 ve 48 katlı betonarme binalar üzerinde çalışmışlardır. Deneysel ve analitik sonuçlar arasında iyi bir uyum elde etmek için otomatik model iyileştirme parametrelerinin kullanımının büyük kolaylık sağladığı görüşüne varmışlardır.

Chassiakos vd. (2007), yapısal güçlendirmeden önce, güçlendirme esnasında ve sonrasında toplanan çevresel titreşim verilerinin genel bir değerlendirmesi üzerine binalar üzerinde bir çalışma yapmışlardır. Deneysel ve analitik çalışma sonucu elde edilen dinamik karakteristikleri karşılaştırmışlardır.

Ventura ve Thibert (2007), Vancouver’da 32 katlı bir bina üzerinde farklı yapım aşamalarında bir dizi çevresel titreşim testi gerçekleştirmişlerdir. Frekans Tanım Alanı Yöntemleriyle çok katlı binanın dinamik karakteristikleri olan mod şekilleri ve periyotları karşılaştırmalı olarak elde edilmiştir.

Thibert vd. (2007), Vancouver’da 46 katlı betonarme perde duvarlı bir bina üzerinde bir dizi titreşim testleri yapmışlardır. Analizlerde yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmıştır.

Testler sonucunda binanın mod şekilleri, doğal frekansları ve sönüm oranları elde edilmiştir.

Zhou ve Yi (2008), Shenzhen’de 86m yüksekliğinde hava koridorları ve genişletilmiş temelle birbirine bağlanmış iki kuleden oluşan yüksek bir bina üzerinde çevresel titreşim ölçümleri gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonunda ölçülen ve hesaplanan modlar ve periyotlar karşılaştırılmıştır.

Shi vd. (2012), 101 katlı bina üzerinde dinamik karakteristikleri belirlemek için zorlanmış ve çevresel titreşim verilerine üç farklı modal tanımlama tekniği uygulamışlardır. Bunlar, Peak Picking, Random Decrement ve Hilbert–Huang Dönüşüm Yöntemleridir. Farklı kat seviyelerinden alınan ölçümler bu üç metotla analiz edilmiştir. Bu yöntemler, yapay ve doğal titreşimler altında çok katlı binaların modal özelliklerinin belirlenmesinde iyi bir imkan sağlamaktadır. Çalışma sonucunda çevresel titreşim altında binanın yapısal hasarının belirlenmesi ve yapı sağlığının izlenmesinde kullanılacak on bir adet modal özellik elde edilmiştir.

Au vd. (2012), tayfun ve muson olayları esnasında elde edilen çevresel titreşim verilerini kullanarak Hong Kong’daki iki yüksek binanın modal özellikleri üzerine çalışma yapmışlardır. Geliştirilmiş Hızlı Bayesian Frekans Alan Yöntemi, çevresel titreşimlerin ölçümüne dayalı modal tanımlama için kullanılmıştır. Çalışmada, tayfunlar boyunca doğal frekanslar ve titreşim seviyeleri arasında negatif bir ilişki olduğunu göstermişlerdir.

Yakın fay etkisi altında çok katlı yapılarla ilgili yapılan çalışmalardan bazıları aşağıda sunulmaktadır:

Bertero vd. (1978), deprem yer hareketine maruz kalan binaları analizden, yakın-fay yer hareketlerinin güçlü tepkilere sebep olabileceğini ifade etmişlerdir. Ayrıca geçmişte kaydedilen sismik hareketlerden, deprem fayına yakın binalarda oluşan hasarın orta şiddetteki depremler için bile çok büyük olduğu gözlemlenmiştir.

Anderson ve Bertero (1987), 1979 Imperial Valley depremi sırasında yakın fay deprem bölgesindeki yer hareketlerine maruz kalmış 10 katlı 3 açıklıklı çelik bir çerçevenin lineer olmayan dinamik davranışını incelemişlerdir. Çalışmada, bölgesel şartlar, fayın yayılma yönü ve fay alanına olan mesafenin yapı davranışını önemli derecede değiştireceği belirtilmiştir.

Hall vd. (1995), California’da sıkça meydana gelen büyük depremlerin bina türü yapılarda etkisini incelemişlerdir. Faya yakın bölgelerde kaydedilen yer hareketlerinin

büyük yer değiştirme sinyallerine sahip olduğunu, bunun da yüksek binalarda çok ciddi etkilere sebep olabileceğini belirtmişlerdir.

Malhotra (1999), en büyük hız değerinin en büyük ivme değerine oranının (PGV/PGA) yüksek olduğu yakın fay yer hareketlerinin yüksek yapılardaki taban kesme kuvvetini, görelı katlar arası deplasmanı ve süneklilik talebini arttırdığını belirtmiştir.

Çok katlı yapılar üzerinde sismik izolatörlerle ilgili yapılan çalışmalardan bazıları aşağıda verilmektedir:

Zayas vd. (1990), sismik izolasyon aygıtlarını 150'den fazla deprem simülasyonu ve deprem şartları altında test etmişlerdir.

Kelly (1991), çalışmasında kauçuk esaslı izolatörlerin gelişimi ve uygulama örneklerini incelemiştir. Bu yapıların deprem etkisi altında maruz kaldığı ivme değerlerini vermiş ve taban izolasyon sistemlerinin uygulanmış olduğu yapıların diğer yapılara göre depremden çok daha az etkilendiğini göstermiştir.

Bisch (1993), çalışmasında pasif kontrol sistemlerinden taban izolatörlerin çalışma prensibini, malzeme ve karakteristik özelliklerini, mekanik özelliklerini ele almıştır.

Higashino vd. (1998), aktif kontrol sistemlerin rüzgar ve deprem etkisi altında davranışlarını incelemişlerdir. Çalışmada, rüzgar ve küçük ölçekli depremlerde aktif kontrol sistemlerinin daha iyi sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.

Kelly ve Naeim (1999), sismik izolasyon sisteminin yapıların depreme dayanma kapasitesini arttırmaktan ziyade, yapının depreme karşı tepkisini azaltma esasına dayanan bir tür depreme dayanıklı yapı tasarımı yaklaşımı olduğunu ifade etmişlerdir. Bu teknolojinin düzgün ve doğru bir şekilde uygulanması, şiddetli depremler esnasında yapıların rijit davranış göstermesine ve zorlanmanın elastik sınırlar içinde kalmasına imkan tanımaktadır. Bunun yanında, görelı kat ötelemesini ve kat ivmelerini eř zamanlı olarak azaltmanın tek uygulanabilir yolu olarak sismik izolasyon yönteminin kullanması olduğunu ifade etmişlerdir. Sismik izolasyon sistemi gerekli esnekliği, izolasyon seviyesinde toplanan yer değiştirmeler vasıtasıyla sağlamaktadır.

Tezcan ve Cimilli (2002), binaların periyotlarını büyütüp deprem etkilerini azaltmak için kullanılan sismik taban izolatörlerin uygulamalarını, avantajlarını ve dezavantajlarını incelemişlerdir. Bunun için iki katlı bir bina ilk olarak ankastre temelli sonrada sismik taban izolasyonlu olarak ele alınarak statik eşdeğer deprem yükleri ve deprem kayıtları altında analiz edilmiştir.

Akgönen (2005), çalışmasında depreme dayanıklı yapı tasarımı ve sismik izolasyon sistemiyle bina güçlendirmenin diğer güçlendirme tekniklerine göre avantajlarını ve dezavantajlarını incelemiştir. İnşaat işlerinin azalması, bina model özelliklerinin kolay düzenlenmesi, iç mimariyi bozmaması gibi sonuçlar, sismik izolasyon yöntemiyle bina güçlendirmesinin diğer güçlendirme tekniklerine göre avantajlarının olduğunu göstermiştir.

Türker (2005b), sismik izolasyon yönteminin geleneksel olarak uygulanan yaklaşımlara kıyasla depreme karşı daha dayanıklı ve etkili bir uygulama olduğunu ifade etmiştir.

Pekgökgöz vd. (2007), birinci derece deprem bölgesindeki 6 katlı betonarme bir konut binasının taban izolasyonlu ve izolasyonsuz olarak yapılması durumları için maliyet analizi yapmışlardır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, sismik izolasyon uygulanan binanın izolasyonsuz binaya göre maliyetinin % 40-45 civarında arttığını göstermişlerdir. Ancak, depremden sonra hastaneler, yollar, köprüler, okullar ve müzeler vb. gibi önem arz eden ve deprem sonrası hizmet etmesi gereken yapıların deprem sonrası kullanılabilirliği göz önüne alındığında maliyet artışının göz ardı edilebileceği görüşüne varılmıştır.

Yurdakul ve Ateş (2010), üç eğrilikli sürtülmeli sarkaç mesnedi kullanarak 8 katlı düzlem çerçevenin sismik izolasyonlu ve sismik izolasyonsuz dinamik tepkilerini karşılaştırmışlardır. Yapılan analizlerin sonuçlarına göre, sismik izolasyonlu düzlem çerçevenin taban kesme kuvvetlerinde, kesit tesirlerinde ve yatay rölatif kat yerdeğiştirmelerinde sismik izolasyonsuz duruma oranla azalmaların olduğu tespit edilmiştir.

Kamanlı vd. (2012), 4 katlı betonarme bir binaya kurşun çekirdekli kauçuk izolatörler kullanılarak taban izolasyonu uygulanmıştır. Çalışmada kullanılan izolatörler Uniform Building Code-1997 şartnamesine göre tasarlanmış olup, binanın ankastre temelli ve izole edilmiş hali için taban kesme kuvvetleri hesaplanarak, üst yapıyı etkileyen deprem kuvvetlerindeki azalma gözlemlenmiştir.

### **1.3. Tezin Amacı ve Kapsamı**

Bu tez çalışmasının amacı, son yıllarda inşaatı hızla artan çok katlı binaların Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ve Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılarak dinamik karakteristiklerini deneysel ve teorik olarak elde etmektir. Bunun yanında, deneysel ve

teorik sonuçlar arasındaki farklılığı, sonlu eleman iyileştirme yöntemiyle kabul edilebilir seviyelere getirerek yapının mevcut davranışını en iyi yansıtabilecek olan sonlu eleman modelinin oluşturulması amaçlanmıştır. Ayrıca, depreme dayanıklı yapı tasarımında son yıllarda kullanımı oldukça yaygınlaşan taban izolasyon sistemlerinin, çok katlı binaların yakın ve uzak fay yer hareketleri altındaki deprem davranışı üzerinde oluşturduğu etki de incelenmiştir. Bu amaçlar doğrultusunda Giresun-Espiye’de bodrum katlar dahil 17 katlı olan betonarme bir bina uygulama amacıyla seçilmiştir.

Tez çalışması üç bölümden oluşmaktadır. Birinci Bölüm genel bilgiler bölümü olup, konuyla ilgili yapılan çalışmalardan, sismik izolasyon sistemlerinden, teorik ve deneysel olarak dinamik karakteristiklerin elde edilmesinde kullanılan yöntemlerden, bu yöntemlere ait formülasyonlardan, sonlu eleman model iyileştirme yöntemlerinden bahsedilmektedir.

Yapılan çalışmaları içeren ikinci bölümünde, seçilen bina ve bu binaya ait teorik modal analiz ve Operasyonel Modal Analiz Yöntemlerinin uygulanması ile ilgili bilgiler sunulmaktadır. Bu doğrultuda, teorik modal analiz uygulamasında kullanılan Sonlu Elemanlar Yöntemi’nden elde edilen doğal frekanslar ve mod şekilleri ile Operasyonel Modal Analiz uygulamasında kullanılan Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (GFTAA) Yöntemi’nden elde edilen doğal frekanslar, mod şekilleri ve sönüm oranları verilmektedir. Teorik ve Operasyonel Modal Analizler sonucunda elde edilen dinamik karakteristikler karşılaştırılmakta ve sonuçlar arasındaki farkı minimize etmek için deneysel ölçüm sonuçlarına göre sonlu eleman modeli iyileştirilmektedir. Ayrıca, seçilen binanın izolatörlü olarak modellenmesi durumunda dinamik karakteristiklerdeki değişimlerden bahsedilmektedir. Bunların yanında, binanın izolatörsüz (başlangıç ve iyileştirilmiş analitik modelleri) ve izolatörlü modellerinin yakın ve uzak fay yer hareketi etkisi altında dinamik davranışlarındaki değişimler de incelenmektedir. Çalışmalardan elde edilen sonuç ve öneriler, Sonuçlar ve Öneriler Bölümü’nde sunulmaktadır. Bu bölümü kaynaklar ve özgeçmiş izlemektedir.

## **1.4. Teorik ve Deneysel Dinamik Karakteristiklerin Belirlenme Yöntemleri**

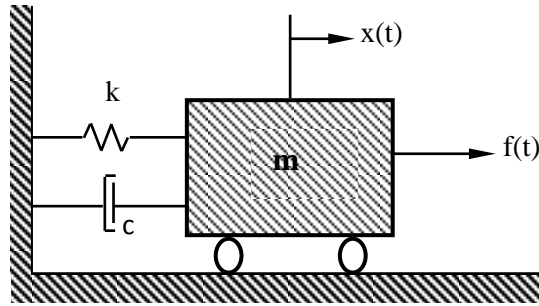
### **1.4.1. Teorik Modal Analiz Yöntemi**

Bir yapıya ait dinamik karakteristikler olan doğal frekanslar, sönüm oranları ve mod şekilleri deneysel ve teorik modal analizlerden belirlenir.

Modal analizleri tanımlayabilmek için öncelikle titreşim teorisini bilmek gerekmektedir. Başlangıç şartları veya uygulanan dış yükler altında bir sistemin göstermiş olduğu tepki titreşim davranışı olarak adlandırılmaktadır. Serbest titreşim ve zorlanmış titreşim olmak üzere iki temel titreşim teorisi vardır. Bir yapının başlangıç sınır şartları altında hiçbir dış etki olmaksızın serbest olarak salınması serbest titreşim, belirli dış etkiler altında salınması zorlanmış titreşim olarak adlandırılmaktadır. Tek Serbestlik Dereceli Sistemler'in (TSDS) ve Çok Serbestlik Dereceli Sistemler'in (ÇSDS) serbest titreşim teorisine ait formülasyonlar aşağıda verilmektedir.

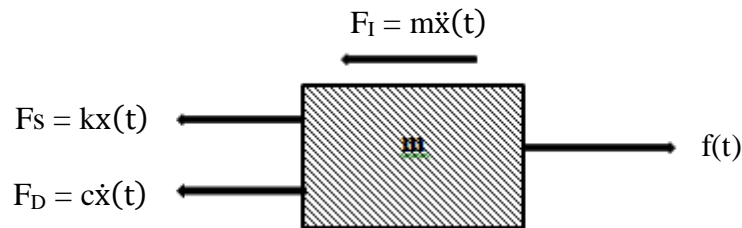
#### 1.4.1.1. Tek Serbestlik Dereceli Sistemler

Düğüm noktalarının her bir hareket kabiliyeti serbestlik derecesi olarak adlandırılır ve bir serbestliğe sahip en basit sistemlere Tek Serbestlik Dereceli Sistemler (TSDS) denir (Chopra,1995; 2006). Tek serbestlik dereceli bir sistemin titreşim modeli genel olarak Şekil 1.1'de verilmektedir.



Şekil 1.1. TSDS ait titreşim modeli

Şekil 1.1'deki titreşim modeli kullanılarak elde edilen serbest cisim diyagramı Şekil 1.2'de gösterilmektedir.



Şekil 1.2. TSDS ait serbest cisim diyagramı



Şekil 1.2'deki serbest cisim diyagramı üzerinden denge denklemi yazılırsa,

$$F_1 + F_D + F_S = f(t) \quad (1.1)$$

elde edilmektedir. Burada  $F_1$  atalet kuvvetini,  $F_D$  sönüm kuvvetini ve  $F_S$  yaydaki elastik şekil değişiminden dolayı oluşan kuvveti göstermektedir. (Türker, 2005a). (1.1) denkleminde gerekli ifadeler yerlerine yazıldığında tek serbestlik dereceli sistemler için genel hareket denklemi,

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = f(t) \quad (1.2)$$

olarak ifade edilmektedir. Burada;  $m$ ,  $c$  ve  $k$  sırasıyla yapının kütesini, sönümünü ve rijitliğini,  $\ddot{x}(t)$  kütlelin ivmesini,  $\dot{x}(t)$  kütlelin hızını,  $x(t)$  kütlelin yer değiştirmesini ve  $f(t)$  ise yapıya uygulanan kuvveti göstermektedir. Sönümsüz tek serbestlik dereceli bir sistemin hareket denklemi, (1.2) denkleminde  $c=0$  alınır,

$$m\ddot{x}(t) + kx(t) = f(t) \quad (1.3)$$

şeklinde elde edilir. Yapının sönümsüz serbest titreşim yaptığı düşünülürse,  $f(t) = 0$  için (1.3) denklemi düzenlendiğinde,

$$m\ddot{x}(t) + kx(t) = 0 \quad (1.4)$$

elde edilebilmektedir. Bu denklem çözümlerse,

$$k - \omega^2 m = 0 \quad (1.5)$$

ve

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1.6)$$

olarak sönümsüz doğal açısal frekans ( $\omega_n$ ) elde edilir (Chopra, 2006).

Yapının zorlanmış sönümsüz titreşim yaptığı düşünüldüğünde hareket denklemi, (1.3) denkleminde verildiği şekildedir. Bu denklemin çözümü için,

$$f(t)=Fe^{i\omega t} \quad (1.7)$$

ve

$$x(t)=Xe^{i\omega t} \quad (1.8)$$

olarak kabul edilir ve bu ifadeler (1.3)'teki hareket denkleminde yerine yazılıp düzenlenirse,

$$(k-\omega^2 m)Xe^{i\omega t}=Fe^{i\omega t} \quad (1.9)$$

ifadesi elde edilir (Chopra, 2006). Burada, X yerdeğiştirme genliği, F uygulanan kuvvet genliği, t zaman ve i karmaşık sayı sembolüdür. Bu denklem kullanılarak, zorlanmış titreşim yapan sönümsüz bir yapının frekans davranış fonksiyonu  $H(\omega)$ ,

$$H(\omega)=\frac{X}{F}=\frac{1}{k-\omega^2 m} \quad (1.10)$$

şeklinde elde edilir (Chopra, 2006).

Yapının viskoz sönümlü olması durumunda analitik model; kütle, sönüm ve rijitlik elemanlarından oluşur ve bu durumdaki hareket denklemi (1.2)'deki hareket denklemi ile ifade edilir. Sönümlü serbest titreşim durumunda hareket denklemi,

$$m\ddot{x}(t)+c\dot{x}(t)+kx(t)=0 \quad (1.11)$$

ifadesine dönüşür. Bu denklemin çözümü için,

$$x(t)=Xe^{st} \quad (1.12)$$

olduğu kabul edilirse ve hareket denklemi düzenlenirse,

$$ms^2 + cs + k = 0 \quad (1.13)$$

ifadesi elde edilir (Chopra, 2006). (1.13) denklemi çözülürse,

$$\begin{aligned} s_{1,2} &= -\frac{c}{2m} \pm \frac{\sqrt{c^2 - 4km}}{2m} \\ &= -\omega\xi \pm i\omega\sqrt{1-\xi^2} \\ &= -\omega\xi \pm i\omega_d \end{aligned} \quad (1.14)$$

elde edilir. Burada;  $\omega$  sönümsüz doğal açısal frekansı,  $\omega_d$  sönümlü doğal açısal frekansı ve  $\xi$  ise sönüm oranını göstermektedir. Sönümlü doğal açısal frekans ve sönüm oranı,

$$\omega_d = \omega\sqrt{1-\xi^2} \quad (1.15)$$

ve

$$\xi = \frac{c}{c_{cr}} = \frac{c}{2\sqrt{km}} \quad (1.16)$$

şeklinde tanımlanmaktadır (Türker, 2005a). Burada;  $c_{cr}$  kritik sönümü göstermektedir. Elde edilen  $s_{1,2}$  değerleri (1.12) denklemdeki yer değiştirme ifadesinde yerine yazılırsa,

$$x(t) = X e^{-\omega\xi t} e^{i(\omega\sqrt{1-\xi^2})t} \quad (1.17)$$

elde edilir. Bu denklemde,  $\omega\xi$  olarak yazılan ifade gerçek kısmı,  $\omega\sqrt{1-\xi^2}$  olarak yazılan ifade ise sanal kısmı ifade etmektedir. Yapının sönümlü zorlanmış titreşim yaptığı düşünüldüğünde, hareket denklemi (1.2) denklemdeki gibidir. Bu denklemin çözümü için,

$$f(t) = F e^{i\omega t} \quad (1.18)$$

ve

$$x(t) = X e^{i\omega t} \quad (1.19)$$

olarak kabul edilirse ve bu ifadeler (1.2) hareket denkleminde yerine yazılıp düzenlenirse,

$$(-\omega^2 m + i\omega c + k)X e^{i\omega t} = F e^{i\omega t} \quad (1.20)$$

denklemini elde edilir (Türker, 2005a). (1.20) denkleminde, zorlanmış titreşim yapan viskoz sönümlü bir yapının frekans davranış fonksiyonu  $H(\omega)$ ,

$$H(\omega) = \alpha(\omega) = \frac{1}{(k - \omega^2 m)^2 + (\omega c)^2} \quad (1.21)$$

şeklinde elde edilir (Türker, 2005a). Frekans davranış fonksiyonunun genlik ve faz açısı,

$$|\alpha(\omega)| = \frac{|X|}{|F|} = \frac{1}{\sqrt{(k - \omega^2 m)^2 + (\omega c)^2}} \quad (1.22)$$

ve

$$\angle \alpha(\omega) = \angle X - \angle F = \tan^{-1}(-\omega c / (k - \omega^2 m)) = -\theta_\alpha \quad (1.23)$$

ifadesiyle hesaplanır (Türker, 2005a). Burada;  $|\alpha(\omega)|$  ve  $\theta_\alpha$  sırasıyla frekans davranış fonksiyonuna ait genlik ve faz değerini göstermektedir.

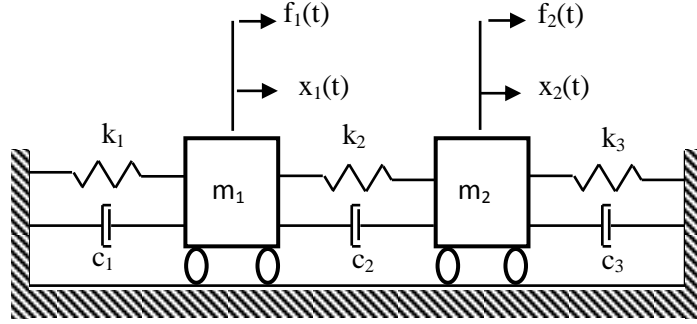
#### 1.4.1.2. Çok Serbestlik Dereceli Sistemler

Yapıların çoğu gerçekte çok serbestlik dereceli sistemlere sahiptir. Bu sistemlerde her serbestlik derecesi bir hareket denklemini ve doğal frekansa karşılık gelmektedir. Tek serbestlik dereceli sistemlerin titreşimindeki skaler değerlerin yerini, çok serbestlik dereceli sistemlerde vektörel ve matris büyüklükler alır. Çok serbestlik dereceli sistemlerde genel hareket denklemini (Chopra, 2006),

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{X(t)\} = \{f(t)\} \quad (1.24)$$

denklemleri ile ifade edilmektedir. Burada  $[K]$ ,  $[C]$  ve  $[M]$  sırasıyla çok serbestlik dereceli sistemin rijitlik, sönüm ve kütle matrislerini;  $\{\ddot{x}(t)\}$ ,  $\{\dot{x}(t)\}$ ,  $\{x(t)\}$ ,  $\{f(t)\}$  ise sırasıyla çok serbestlik dereceli sistemin zamana bağlı ivme, hız, yerdeğiştirme ve kuvvet vektörlerini göstermektedirler (Chopra, 2006).

Çok serbestlik dereceli sistemleri temsil etmek amacıyla iki serbestlik dereceli bir sistemin kütle-yay-sönüm titreşim modeli Şekil 1.3'te verilmiştir.



Şekil 1.3. İki serbestlik dereceli sisteme ait titreşim modeli

Yapıda sönüm olmaması durumunda, titreşim modeli rijitlik ve kütle terimleriyle ifade edilir. Bu durumda hareket denklemleri,

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{f(t)\} \quad (1.25)$$

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

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{0\} \quad (1.26)$$

olarak elde edilir (Chopra, 2006). Bu denklemin çözümü için,

$$\{x(t)\} = [X]e^{i\omega t} \quad (1.27)$$

olduğu varsayılır (Chopra, 2006). Burada;  $\{X\}$   $N \times 1$  boyutunda zamandan bağımsız genliği göstermektedir. (1.27) denklemleri kullanılarak (1.26) çözülürse,

$$([\mathbf{K}] - \omega^2 [\mathbf{M}]) \{\mathbf{X}\} e^{i\omega t} = \{\mathbf{0}\} \quad (1.28)$$

denklemini elde edilir (Türker, 2005a). Bu denklemin sıfırdan farklı çözümü için,

$$\det|[\mathbf{K}] - \omega^2 [\mathbf{M}]| = 0 \quad (1.29)$$

olmalıdır. (1.29) denkleminin çözümünden N serbestlik derecesi kadar sönümsüz doğal açısal frekans (öz vektör)  $(\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_N)$  elde edilir. Her bir doğal frekansa karşılık yapının almış olduğu şekil, mod şekli olarak tanımlanır. Doğal frekansların küçükten büyüğe doğru sıralanması sonucunda elde edilen en küçük frekans temel frekans ve bu frekansa karşılık gelen mod şekli temel mod şekli olarak tanımlanır (Petyt, 1990). Yapının tepki modelini oluşturmak için yapının aynı frekansta fakat değişen genlik ve fazda sinüzoidal bir kuvvetle titreştirildiği düşünülürse, bu durumda kuvvet ve yer değiştirme vektörleri sırasıyla,

$$\{\mathbf{f}(t)\} = \{\mathbf{F}\} e^{i\omega t} \quad (1.30)$$

ve

$$\{\mathbf{x}(t)\} = \{\mathbf{X}\} e^{i\omega t} \quad (1.31)$$

olarak kabul edilir (Chopra, 2006). (1.30) ve (1.31) ifadeleri, (1.25) hareket denkleminde yerine yazılır ve düzenleme yapılırsa,

$$([\mathbf{K}] - \omega^2 [\mathbf{M}]) \{\mathbf{X}\} e^{i\omega t} = \{\mathbf{F}\} e^{i\omega t} \quad (1.32)$$

elde edilir. Bilinmeyen tepkinin çözümü için (1.32) ifadesi tekrar düzenlenirse,

$$\{\mathbf{X}\} = ([\mathbf{K}] - \omega^2 [\mathbf{M}])^{-1} \{\mathbf{F}\} \quad (1.33)$$

ve

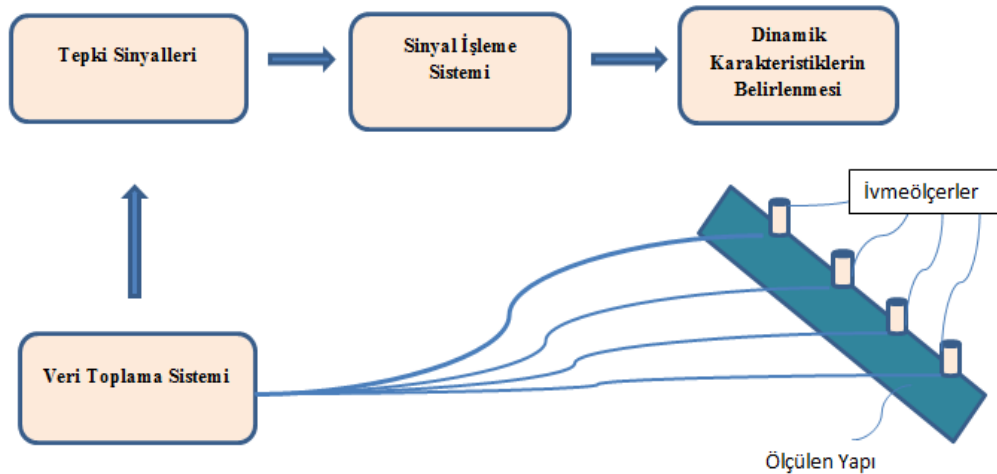
$$\{\mathbf{X}\} = [\alpha(\omega)] \{\mathbf{F}\} \quad (1.34)$$

elde edilir. Burada  $[\alpha(\omega)]$   $N*N$  boyutunda frekans davranış fonksiyonudur.

### 1.4.2. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi

Yapıların dinamik davranışlarını anlamak için dinamik karakteristikleri olarak bilinen doğal frekanslarını, mod şekilleri ve sönüm oranlarını deneysel olarak belirlemek gerekmektedir. Bu doğrultuda kullanılan deneysel yöntem ise Deneysel Modal Analiz yöntemidir. Deneysel Modal Analiz yöntemi, Geleneksel Modal Analiz ve Operasyonel Modal Analiz yöntemi olmak üzere iki farklı gruba ayrılmaktadır (Türker, 2011). Geleneksel Modal Analiz yönteminde yapı bilinen kuvvetler tarafından (darbe çekiçleri, sarsma tablaları, elektro dinamik sarsıcılar vb.) titreştirilir ve yapının bu titreşime karşı vermiş olduğu tepki ölçülür. Bilinen kuvvetler ve ölçülen tepki kullanılarak yapının dinamik karakteristikleri belirlenir.

Operasyonel Modal Analizde ise yapı bilinmeyen kuvvetler ( trafik yükü, rüzgar, deprem, dalga ve insan hareketi gibi çevresel titreşimler) tarafından uyarılır ve yapının bu kuvvetlere karşı vermiş olduğu tepki ölçülür. Bu yöntem, çevresel titreşimleri kullandığı için Çevresel Titreşim Testi olarak da adlandırılmaktadır. Operasyonel Modal Analiz yöntemiyle yapıların dinamik karakteristiklerinin nasıl belirlendiğini gösteren örnek şema Şekil 1.4'te verilmektedir.



Şekil 1.4. Operasyonel Modal Analiz Yöntemine ait ölçüm şeması

Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle gerçekleştirilen ölçümlerde bazı kabuller yapılmaktadır. Bunlar;

- Deneysel ölçümler sırasında, sıcaklık, nem vb gibi bir etki altında yapının malzeme özelliklerinde ve sınır şartlarında herhangi bir değişim olmadığı,
- Yapıda oluşan titreşimlerin küçük olduğu ve yapının lineer davranış sergilediği,
- Yapının rijitliğini değiştirebilecek çok büyük titreşimler altında yapılan ölçümlerin doğru sonuçlar vermeyeceği,
- Yapının bir bütün ve sürekli olduğu,

şeklindedir (Türker, 2011).

Genel olarak Operasyonel Modal Analiz yönteminin kullanım alanları,

- Yapıların projelendirilmesi aşamasında yapılan kabullerin gerçekte sağlanıp sağlanmadığının belirlenmesinde,
- Teorik analizler sonucu elde edilen dinamik karakteristiklerin deneysel olarak elde edilen dinamik karakteristiklerle karşılaştırılmasının yapılması ve sonlu eleman modellerinin iyileştirilmesinde,
- Teorik analizlerinin yapılması zor olan yapıların dinamik karakteristiklerinin deneysel olarak belirlenmesinde,
- Yapıların hasar durumlarının değerlendirilmesi

şeklinde sıralanabilir.

#### **1.4.2.1. Operasyonel Modal Analiz Yönteminde Kullanılan Test Aletleri**

Operasyonel Modal Analiz Yönteminde kullanılan ölçüm düzeneği genel olarak titreştiriciler, ivmeölçerler, veri toplama sistemi olmak üzere üç ana başlık altında incelenecektir.

##### **1.4.2.1.1. Titreştiriciler**

Operasyonel Modal Analiz Yönteminde doğal ya da yapay kaynaklı titreşimlerden yararlanılmaktadır. Doğal kaynaklı titreşimler trafik yükü, yaya yükü, rüzgar, patlatma etkisi, dalga gibi birçok doğal ve çevresel etkilerden oluşmaktadır. Yapay titreştiriciler ise yapıya bütün ölçüm boyunca temas eden ve ölçüm boyunca ya yapıyla herhangi bir teması olmayan ya da yapıyla kısa süreli teması olan yapay titreştiriciler olmak üzere iki kısma



ayrılır (Türker, 2005a). Yapıyla sürekli temas halinde olan mekanizmalar mekanik sarsıcılar, yapıyla kısa süreli temas halinde olanlar darbe çekiçleri ve yapıyla hiçbir teması olmayanlar ise tokmak sistemleri olarak adlandırılmaktadır.

Sarsıcılar yapı üzerinde büyük kuvvetlere neden olur ve dinamik tepkileri incelemek için kullanılırlar. Bu mekanizmalardan yapıya doğru güç aktarımı sağlanması için sarsıcılar yapıya çok iyi sabitlenmelidir. Sarsıcıların yanlış kullanılması durumunda yapı hasar görebilmektedir. Sarsıcılar; mekanik, elektro-manyetik ve elektro-hidrolik olarak üçe ayrılmaktadır (Altunışık, 2010). Şekil 1.5'te çeşitli tiplerdeki sarsıcılar görülmektedir.



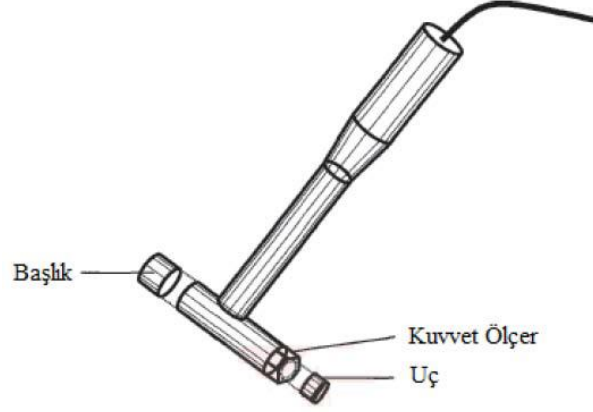
Şekil 1.5. Çeşitli sarsıcılar (URL-1)

Yapıların titreştirilmesinde yaygın olarak kullanılan darbe çekiçleri, küçük veya orta ölçekli mühendislik yapılarını veya laboratuvar modellerini titreştirmek için kullanılmaktadırlar. Darbe çekiçleri genliği ve zamanla değişimi bilinmeyen rastgele titreşimler için kullanıldığı gibi ölçülebilen büyüklüklerdeki titreşimler için de kullanılmaktadırlar.

Darbe çekiçlerinin içerisinde, verilen etkiyi ölçmek amacıyla hassas sensörler bulunmaktadır. Ayrıca darbe çekiçlerinin yapıya farklı etkiye sahip darbeler uygulaması için sert, orta sert ve yumuşak başlıkları mevcuttur. Darbe çekiçlerinin başlıkları ve uçları değiştirilerek farklı frekans seviyelerinde titreşimler elde edilir (Şekil 1.6). Yapıya çekiçle vurularak uygulanan kuvvet, çekiğin ucundaki kuvvetölçerlerle ölçülür ve ölçülen kuvvetin yapıya uygulanan kuvvete eşit olduğu kabul edilir. Çekiçle uygulanan kuvvetin büyüklüğü, çekiç başlığının kütesine ve çekiğin yapıya vurulduğu andaki hızına bağlı olarak belirlenebilir. Dolayısı ile istenilen seviyede kuvvet uygulamak için en uygun yol çekiç başlığının kütesinin değiştirilmesidir (Türker, 2005a).

Darbe çekiçlerinin maliyetleri sarsıcılara göre daha ucuzdur ve uygulamaları daha kolaydır. Bu durum kullanımlarını avantajlı hale getirmektedir. Ancak, yapıya aktardıkları kuvvetin düşük enerjili olması darbe çekiçlerinin bir dezavantajıdır (Ramos, 2007).

Şekil 1.6’da yaygın olarak kullanılan darbe çekici görülmektedir. Şekil 1.7’de ise farklı modellerdeki darbe çekiçleri verilmektedir.



Şekil 1.6. Yaygın olarak kullanılan çekiç türü (Birinci, 2010)



Şekil 1.7. Farklı modellerdeki darbe çekiçleri (URL-2)

#### 1.4.2.1.2. İvmeölçerler

Operasyonel Modal Analiz yönteminin uygulandığı ölçümlerde yapılarda oluşan titreşimleri ölçmek için ivmeölçerler kullanılmaktadır. İvmeölçerler geniş frekans ve dinamik aralığa sahip olmaları ve nispeten küçük ve hafif olmalarından dolayı en çok tercih edilen dönüştürücü tipleridir. İvmeölçerlerin çalışma mantığı, oluşan titreşimlere karşı elektriksel voltajların üretilmesine dayanmaktadır. İvmeölçerler, uygulanacak yapının hacimsel büyüklüğüne ve yapılacak ölçümün amacına göre yeterli hassasiyeti sağlayacak

şekilde seçilebilmektedirler. İvmeölçerler uygulanacakları yüzeye, vida, çeşitli yapıştırıcılar, mıknatıslı sistemler ve balmumu gibi bağlantılarla sabitlenebilmektedir.

İvmeölçerler ile yapılan deneysel ölçümlerden kaliteli sinyaller elde edebilmek için ivmeölçeri seçerken ölçüm frekans aralığı, maksimum ivme değeri, hassasiyeti, çalışma sıcaklığı ve ivmeölçer ağırlığı gibi özellikler dikkate alınmalıdır. Bu özellikler aşağıda anlatılmaktadır (Türker, 2011; Altunışık, 2010)

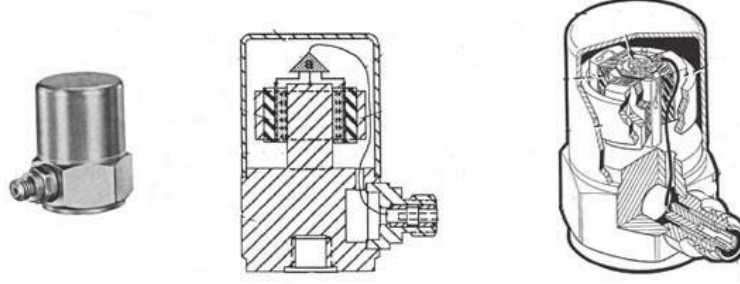
- Frekans Aralığı: İvmeölçerin, ölçebileceği maksimum ve minimum frekans aralığını belirtmektedir.
- Maksimum İvme Değeri: İvmeölçerin, elektrik sinyali bozulmadan veya kaybolmadan ölçebileceği en büyük ivme genliği değerini belirtmektedir. Birimi g'dir.
- Hassasiyet: İvmeölçerin, yerçekimi ivmesiyle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

İvmeölçerlerin hassasiyetleri tipine göre değiştiğinden dolayı ölçümlerde çoğunlukla yüksek hassasiyetli ivmeölçerlerin kullanılması tercih edilir. Ancak, hassasiyetin yüksek olması beraberinde ivmeölçerin büyüklüğünü ve ağırlığını da artırmaktadır. Bu durum narin ve küçük yapılardaki ölçümü zorlaştırmaktadır (Türker, 2011).

İvmeölçerler genel olarak piezoelektrik, piezoresistif, kapasitif ve kuvvet balans ivmeölçerleri olmak üzere dört farklı sınıf altında toplanmasına karşın yapısal titreşimlerin elde edilmesinde genellikle piezoelektrik ivmeölçerler kullanılmaktadır. Piezoelektrik ivmeölçerler, kütle-yay-sönüm sisteminden oluşmaktadır. Bu ivmeölçerlerin aktif kısımları da kuartz veya seramik kristallerinden yapılmaktadır. Piezoelektrik ivmeölçer modelleri ve şematik gösterimi sırasıyla Şekil 1.8 ve Şekil 1.9'da gösterilmektedir.



Şekil 1.8. Piezoelektrik ivmeölçer modelleri (URL-3)



Şekil 1.9. Piezoelektrik ivmeölçerin şematik gösterimi (URL-4)

Bu tez çalışmasında da B&K 8340 tipinde tek eksenli piezoelektrik ivmeölçerler yapıya dübeller ve çelik vida bağlantılarıyla sabitlenip kullanılmıştır.

#### 1.4.2.1.3. Veri Toplama Ünitesi ve Sinyal İşleme

Veri toplama ünitesi, ivmeölçerlerden gelen sinyallerin ölçüm geometrisi dikkate alınarak toplanmasını ve ilgili bilgisayar programına aktarılarak sinyallerin işlenmesini sağlamaktadır. Bu işlem esnasında ivmeölçerler yapıdan aldıkları elektrik sinyallerini doğrudan ya da çeşitli sinyal koşullama ünitelerinden geçirdikten sonra veri toplama ünitesine aktarmaktadır. Ancak ivmeölçerlerden veri toplama ünitesine aktarılan sinyaller hamdır. Yani sinyaller sadece yapı titreşimlerini değil ortamdaki gürültüleri de içermektedir. Bu şekilde elde edilen ham sinyallerin kullanılması durumunda ise yapı davranışının (yapı dinamik karakteristiklerinin) doğru bir şekilde belirlenmesi zorlaşmaktadır. Bu nedenle veri toplama sisteminin en önemli işlevlerinden biri sinyal koşullamadır. Sinyal koşullama sayesinde,

- Düşük seviyeli bir sinyalin kalitesi artırılabilenekte,
- Gürültü sinyallerinin etkisini azaltılabilmekte,
- İstenmeyen sinyaller filtrelenebilmekte,
- İvmeölçerlerdeki elektrik gücünü ayarlanabilmekte,
- İvmeölçerlerin davranışlarını kontrol edilebilmektedir.

Sinyal koşullamanın bu özellikleri sayesinde yapılardan elde edilen ham sinyaller filtrelenebilmekte ve yapıların dinamik davranışları hakkında daha doğru verilere ulaşılması sağlanmaktadır. Sinyal koşullama işlemlerinden sonra sinyallerin bilgisayar ortamına

aktarılmasıyla sinyal işleme işlemi başlamaktadır. Sinyal işleme, bilgisayarda ortamında geliştirilen özel yazılımlar kullanılarak gerçekleştirilmektedir.

Bu tez çalışmasında yapılan deneysel ölçümlerde veri toplama ünitesi olarak 17 kanallı Brüel&Kjaer 3560 C tipi cihaz kullanılmıştır (Şekil 1.10). Kullanılan veri toplama ünitesinin en önemli özelliği, ölçüm yapılacak yapının büyük olması ve ivmeölçer sayısının yetersiz olması durumunda referanslı ölçüm yapılabilmesidir. Referanslı ölçümlerde yapıya bağlanan ivmeölçerlerden bir tanesi sabit tutulurken diğer ivmeölçerler farklı noktalara yerleştirilebilmekte yani kademeli ölçüm yapılabilir. Elde edilen ivme kayıtları ölçüm işlemlerinden sonra birleştirilerek yapı üzerinde tek seferde ölçüm alınabilmektedir. Bu çalışmada, ivmeölçerlerin veri toplama ünitesine tanıtılmasında, ivmeölçerlerden sinyallerin alınarak veri toplama ünitesinde depolanmasında, depolanan sinyallerin sinyal koşullandırma işlemlerinin tamamlanmasında ve bilgisayara dayalı sinyal işleme programına aktarılmasında PULSE (PULSE, 2006) yazılımı kullanılmıştır. Titreşim testlerinden alınan sinyallerin işlenmesi ve yapıların dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi OMA (OMA, 2006) yazılımı ile yapılmıştır.



Şekil 1.10. B&K 3560 C tipi on yedi kanallı veri toplama ünitesi

#### 1.4.2.2. Dinamik Karakteristiklerin Elde Edilme Yöntemleri

Dinamik karakteristikler çok çeşitli yöntemler kullanılarak ölçülen tepkilerden elde edilmektedir. Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma (FTAA) ve Stokastik Altalan Belirleme (SAB) en çok kullanılan yöntemlerdir (Brincker vd., 2000; Peeters, 2000). Bunlardan Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma Yöntemi (FTAA) frekans ortam yöntemi olmasına rağmen, Stokastik Altalan Belirleme Yöntemi (SAB) zaman ortam yöntemine dayalıdır.

Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma (GFTAA) Yöntemi ise Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma Yönteminin genişletilmiş halidir. Bu tez çalışmasında GFTAA Yöntemi kullanılmıştır.

#### 1.4.2.2.1. Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma (GFTAA) Yöntemi

Bu yöntemde, modlar sinyal işleme sonucunda elde edilen spektral yoğunluk fonksiyonlarında piklerin seçilmesiyle elde edilmektedir. GFTAA Yöntemi ile hem doğal frekanslar hem mod şekilleri hem de sönüm oranları belirlenebilmektedir ( Jacobsen vd., 2006).

Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma Yönteminde, bilinmeyen etki ve ölçülen tepki arasındaki bağlantı denklem (1.35)'teki gibi ifade edilmektedir (Bendat ve Piersol, 2004).

$$G_{yy}(j\omega) = H(j\omega) * G_{xx}(j\omega)H(j\omega)^T \quad (1.35)$$

Burada,  $G_{xx}(j\omega)$  etki sinyalinin Güç Spektral Yoğunluk fonksiyonunu,  $G_{yy}(j\omega)$  tepki sinyalinin Güç Spektral Yoğunluk fonksiyonunu ve  $H(j\omega)$  frekans davranış fonksiyonunu göstermektedir. \* ve T ise sırasıyla ifadelerin kompleks eşleniğini ve transpozisini göstermektedir.

Bazı matematiksel işlemlerden sonra tepki sinyaline ait Güç Spektral Yoğunluk fonksiyonunu tek kutuplu artık değer fonksiyonu olarak,

$$H(j\omega) = \sum_{k=1}^n \frac{R_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{R_k^*}{j\omega - \lambda_k^*} \quad (1.36)$$

denklemindeki gibi elde edilir (Bendat ve Piersol, 2004). Burada, n mod sayısını,  $\lambda_k$  kutup fonksiyonunu ve  $R_k$  artık değer fonksiyonunu göstermektedir. Gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra (1.35) denklemi, (1.37) denklemi şeklinde elde edilmektedir (Brincker vd., 2000).

$$G_{yy}(j\omega) = \sum_{k=1}^n \sum_{s=1}^n \left[ \frac{R_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{R_k^*}{j\omega - \lambda_k^*} \right] G_{xx}(j\omega) \left[ \frac{R_s}{j\omega - \lambda_s} + \frac{R_s^*}{j\omega - \lambda_s^*} \right]^{\bar{H}} \quad (1.37)$$

Bu denklemde, s tekil değerleri,  $\bar{H}$  kompleks eşleniği ve transpozeyi ifade etmektedir. (1.37) denklemi yeniden düzenlendiğinde,

$$G_{yy}(j\omega) = \sum_{k=1}^n \frac{A_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{A_k^*}{j\omega - \lambda_k^*} + \frac{B_k}{-j\omega - \lambda_k} + \frac{B_k^*}{-j\omega - \lambda_k^*} \quad (1.38)$$

şeklinde elde edilmektedir (Brincker vd., 2000). (1.38) denklemde,  $A_k$  güç spektral yoğunluk fonksiyonuna ait k. artık değer matrisini göstermektedir. Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma yönteminde ilk adım Güç Spektral Yoğunluk matrisini belirlemektir. Aynı frekanslarda tepki sinyalinin Güç spektral Yoğunluk fonksiyonunun tahmini  $\omega = \omega_i$  olarak bilinmekte ve sonra tekil değer ayırışım matrisi alınarak ayırıştırılmaktadır. Buradan,

$$G_{yy}(j\omega_i) = U_i S_i U_i^{\bar{H}} \quad (1.39)$$

denklemi elde edilmektedir (Brincker vd., 2000).

### 1.5. Sonlu Eleman Model İyileştirme Yöntemleri

Yapının hasarsız durumu için gerçekleştirilen ölçüm sonuçları baz alınarak, deneysel ve analitik dinamik karakteristikler arasındaki farkın minimize edilmesi için başlangıç analitik modelinde değişiklik yapılması işlemi sonlu eleman model iyileştirme olarak adlandırılmaktadır. Sonuçlar arasındaki farklılıklar genellikle, sonlu eleman modeline dayalı analitik çözümler sırasında dikkate alınan belirsiz parametrelerden (malzeme ve kesit özellikleri, sınır şartları) kaynaklanmaktadır. Sonlu eleman model iyileştirmesinde atılacak ilk adım sonlu eleman model sonuçları ile deneysel modal analiz sonuçlarının karşılaştırılmasıdır. Eğer modeller arasında görülen fark, kabul edilebilir sınırlar içerisinde ise sonlu eleman model iyileştirmesine gerek görülmez. Sonlu eleman model iyileştirmesi üç aşamadan meydana gelmektedir (Şahin, 2009). Bunlar;

- a) Teorik ve deneysel modal analiz sonuçlarının karşılaştırılması.
- b) Teorik ve deneysel modal analiz sonuçları arasındaki farkı minimize etmek için sonlu eleman modelinin iyileştirilmesi.
- c) İyileştirilmiş olan sonlu eleman modelinin analizi ve iyileştirilmiş sonlu eleman modeline ait dinamik karakteristiklerle deneysel olarak elde edilen dinamik karakteristiklerin karşılaştırılması.

Yapı sonlu eleman modeli Deneme Yanılma Yöntemi ve Optimizasyon Yöntemleri kullanılarak iyileştirilebilir (Şahin, 2009). Deneme Yanılma Yöntemi'nde, yapının sonlu eleman modeli oluşturulurken kullanılan malzeme özellikleri ve sınır şartları gibi belirsiz parametreler üzerinde değişiklikler yapılarak sonlu eleman model iyileştirilmesi yapılır. Bu çalışmada da model iyileştirme yöntemi olarak Deneme Yanılma Yöntemi kullanılmıştır. Esası Deneme Yanılma Yöntemi'ne dayanan Optimizasyon Yöntemi'nde ise malzeme özellikleri ve sınır şartları gibi belirsiz parametreler için tanımlanan belli bir aralıktaki bütün değerler için sonlu eleman modeli tek tek analiz edilir. Her bir analiz sonucu elde edilen teorik değerler ile deneysel sonuçlar karşılaştırılır ve deneysel verilere en yakın sonucu veren belirsiz parametreler kullanılarak gerçek yapıyı en iyi temsil eden sonlu eleman modeli elde edilir.

## **1.6. Sismik İzolatör Çeşitleri**

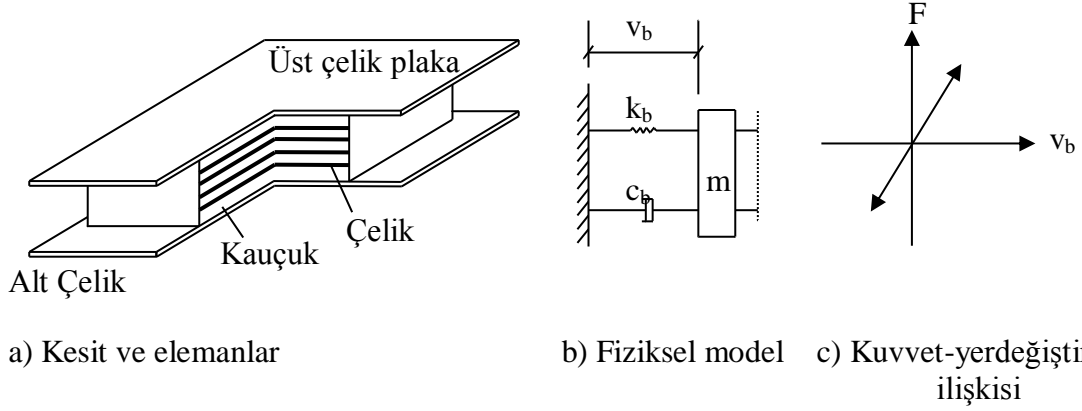
Sismik izolasyon sistemleri, yapının temeli ve kolonları arasına yerleştirilmiş, yatay yönde esnek düşey yönde rijit olan taşıyıcılar olarak tanımlanmaktadır. Uygulamalarda kullanılan sismik izolasyon sistemleri genel olarak kauçuk ve sürtünmeye dayalı izolatörler olarak bilinmektedir.

### **1.6.1. Tabakalı Kauçuk Mesnet Sistemleri**

Tabakalı Kauçuk Mesnet (TKM) sistemi, sismik izolasyon sistemleri arasında en çok tercih edilen sismik izolasyon çeşididir (Jagid ve Datta, 1995). Bu sistem tabakalar halinde kullanılan çelik ve kauçuk plakalardan oluşmaktadır. Sistemin en önemli özelliği sönümün ve rijitliğin paralel etkileridir. Genellikle TKM sistemi yatayda esnek hareket edebilen ve düşeyde rijit olan, yüksek sönüm gösteren izolasyon sistemidir. TKM sisteminin kesiti ve



oluştugu elemanları, fiziksel modeli ve kuvvet–yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 1.11’de gösterilmiştir.

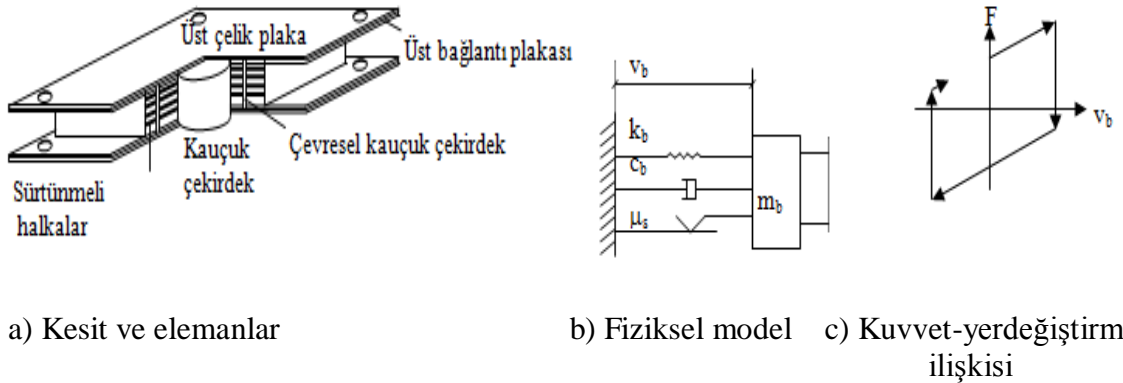


Şekil 1.11. Tabakalı kauçuk mesnet sistemi (Yurdakul, 2011)

Burada,  $F$  kuvvet,  $v_b$  sürtülmeli sarkaç mesnetinin yatay yerdeğiştirmesi,  $k_b$  rijitlik,  $c_b$  sönüm ve  $m_b$  kütleli göstermektedir.

### 1.6.2. Elastik Sürtülmeli Mesnet Sistemleri

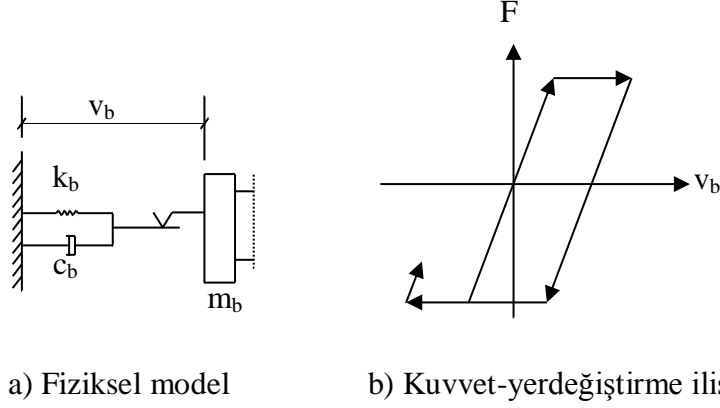
Elastik Sürtülmeli Mesnet (ESM) sistemi, Mostaghel ve Khodaverdian (1987) tarafından önerilmiş bir sürtülmeli mesnet sistemidir. ESM birbirleriyle sürtülmeli bir şekilde teflon ile kaplanmış eşit merkezli daireler halinde bulunan plakalardan ve merkezi bir kauçuk çekirdekten oluşmaktadır. Plakaların birleşimleri sürtünmeden dolayı sönümü arttırmaktadır. Merkezi kauçuk çekirdek, mesnetin yerdeğiştirme ve hızının mesnet yüksekliği boyunca dağıtılmasını sağlamaktadır. ESM sisteminin kesiti ve oluştuğu elemanları, fiziksel modeli ve kuvvet–yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 1.12’de gösterilmiştir.



Şekil 1.12. Elastik sürtülmeli mesnet sistemi (Yurdakul, 2011)

### 1.6.3. Fransız Elektrik Mesnet Sistemleri

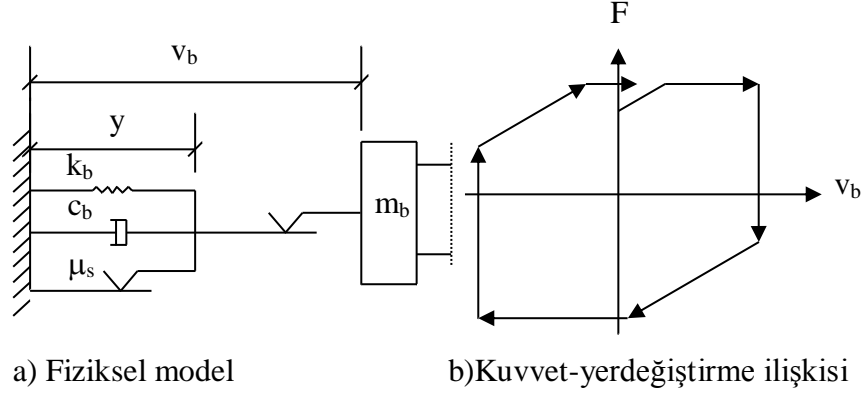
Fransız Elastik Mesnet (FEM) sistemi, Fransız Elektrik Kurumu'nun desteği ile nükleer güç santrallerini depremden korumak için geliştirilmiştir. FEM sisteminin kesiti TKM sistemiyle aynıdır. FEM sisteminin fiziksel modeli, kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 1.13'te gösterilmiştir.



Şekil 1.13. Fransız elektrik mesnet sistemi (Yurdakul, 2011)

### 1.6.4. Kayıcı Elastik Sürtünlü Mesnet Sistemleri

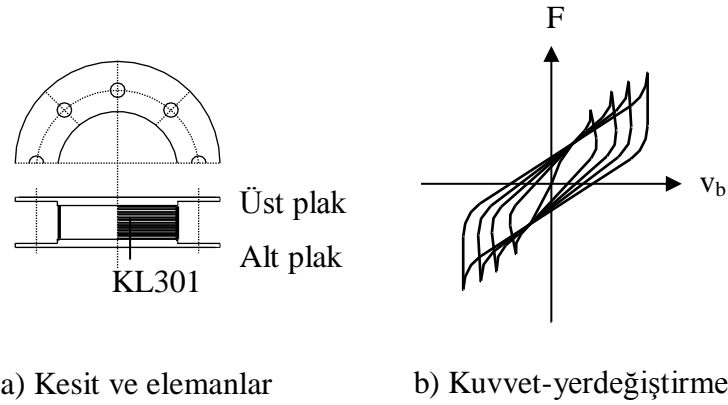
Su vd. (1989a) tarafından önerilen Kayıcı Elastik Sürtünlü Mesnet (KESM) sistemi, ESM ve FEM sistemlerinin özelliklerini taşımaktadır. ESM sisteminin üst yüzeyine sürtünlü bir tabaka yerleştirilmesi sonucunda FEM sistemindeki gibi, yapı temelini üzerinde hareket edebilmektedir. Sismik hareket çok küçük olduğunda sistem ESM gibi davranmaktadır. Sismik hareket büyük olduğunda ise üst sürtünlü plakada kayma meydana gelebilmektedir. Bu da beklenmedik şiddetli yer hareketleri için ilave güvenlik sağlamaktadır. KESM sisteminin fiziksel modeli ve kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 1.14'te gösterilmiştir.



Şekil 1.14. Kayıcı elastik sürtümlü mesnet sistemi (Yurdakul, 2011)

### 1.6.5. Yüksek Sönümlü Kauçuk Mesnet Sistemleri

Yüksek Sönümlü Kauçuk Mesnet (YSKM) sistemi, stratejik öneme sahip yapılar ve anıtsal yapılarda depremin etkisini azalttığı için önem kazanmıştır. YSKM kullanımı ile doğrusal aralıkta istenilen sonuç elde edilir ve yüksek enerji yitimi sağlanır (Ceccoli vd, 1999). Yüksek sönümlü kauçuk mesnet (YSKM) sistemi doğal kauçuktan yapılmaktadır. YSKM sisteminin kesiti ve oluştuğu elemanları ile kuvvet–yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 1.15’te gösterilmiştir.



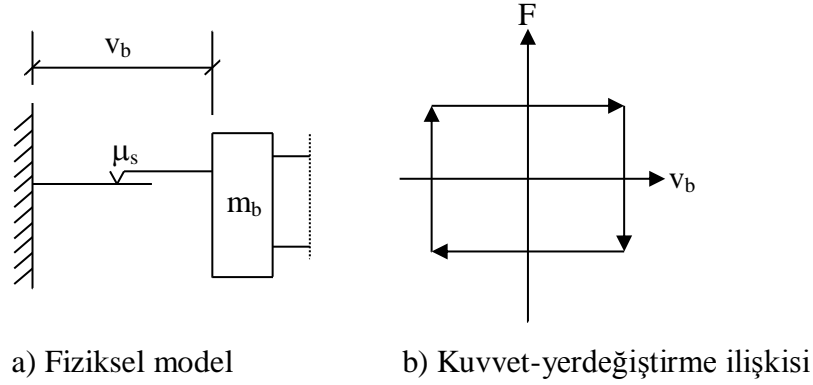
Şekil 1.15. Yüksek sönümlü kauçuk mesnet sistemi (Yurdakul, 2011)

Yüksek Sönümlü Kauçuk Mesnetlerin önemli bir avantajı da çevredeki titreşimlerin azaltılmasına yardımcı olmasıdır. Örneğin; yüksek frekanslı, trafik veya yeraltı demir yollarında, metrolarda titreşimleri filtre ettiğinden titreşim problemlerini ortadan kaldırır. Buna karşın bilinen en önemli deavantajı ise, sistemi rüzgâr yüklerinin yol açabileceği

yapısal risklerden koruyacak yeterli başlangıç rijitliğinin olmamasıdır. Ayrıca bu tür sistemlerin özelliklerinin sıcaklığa bağlı olması ve montaj işçiliğinin pahalı olması yaygın olarak kullanılmasını engellemiştir (Gökhan, 2009).

### 1.6.6. Sürtünmeli Mesnet Sistemleri

Sürtünmeli Mesnet sistemi (SMS) prensip olarak sürtünmeli kayan bir mekanizmadır (Su vd., 1989b; Jangid, 1997). Yatay sürtünme kuvvetleri sayesinde harekete karşı koyar ve oluşan enerjii emer. Bu sistem için verilebilecek en basit örnek, bina temelinde bir silindir veya kum tabakası kullanımı şeklinde düşünülebilir. Geniş frekanslı dağılım için etkili bir mesnet sistemidir. SMS'nin analitik modeli, kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 1.16'da gösterilmiştir.



Şekil 1.16. Sürtünmeli mesnet sistemi (Yurdakul, 2011)

### 1.6.7. Çapraz Doğrusal Hareket Sistemleri

Çapraz Doğrusal Hareket (ÇDH) sistemi, birbirine dik bir şekilde yerleştirilmiş iki doğrusal yaya monte edilen iki adet düşük sürtünmeli doğrusal hareket eden bloktan oluşmaktadır.

ÇDH sistemi üzerinde yer alan tampon bloklar çok düşük sürtünme kuvvetine sahip olup, bundan dolayı düşük kesme kuvvetini de karşılamaktadırlar. Bunun yanında ÇDH sisteminin bir başka özelliği, basınç kuvveti yanında çekme kuvvetine karşı çalışabilmesidir. ÇDH tipi izolatörler, kurşun çekirdekli izolatörler ve diğer izolatör tipleri ile de birlikte kullanılmaktadır (Türker, 2005b). ÇDH sistemi Şekil 1.17'de gösterilmiştir.



Şekil 1.17. Çapraz doğrusal hareket sisteminin görünüşü (Türker, 2005b)

### 1.6.8. Çelik Bilyeli İzolatörler

Çelik Bilyeli İzolatör (ÇBİ), düşük sürtünme katsayısına sahip iki adet çelik levha arasına yerleştirilmiş olup, çok sayıda çelik bilyelerden meydana gelmektedir. Bilyelerin sayısı, binanın düşey yüklerini karşılayacak şekilde izolatörlerin tasarımı sırasında ayarlanmaktadır. ÇBİ sistemi Şekil 1.18’de gösterilmiştir.

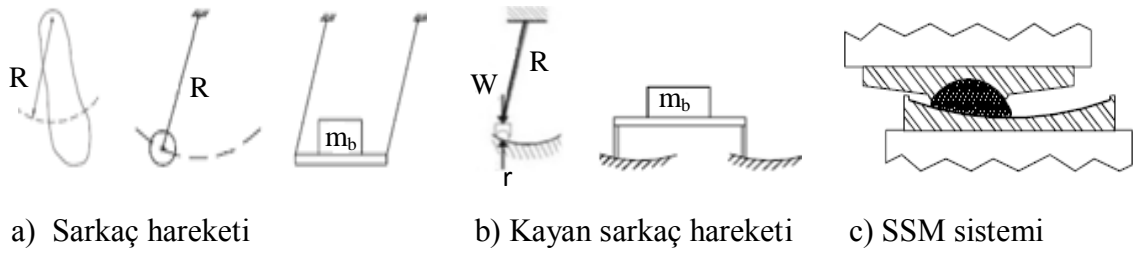


Şekil 1.18. ÇBİ sisteminin görünüşü (Türker, 2005b)

### 1.6.9. Sürtünmeli Sarkaç Mesnet Sistemleri

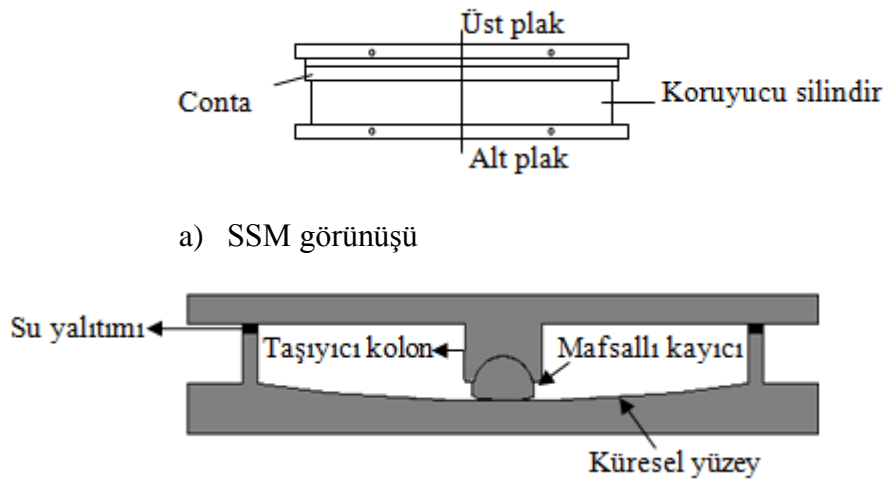
Sürtünmeli Sarkaç Mesnet (SSM) sisteminin üretimi diğer sistemlere göre daha kolaydır ve dayanımları daha yüksektir. SSM sisteminde arzu edilen sismik izolasyon sonuçlarının elde edilebilmesinde sarkacın taşıdığı ağırlıktan ve sarkacın geometrisinden yararlanılmaktadır. Çevresel etkilere karşı dayanıklıdır ve uzun ömürlüdür (Zayas vd.,1989; 1990).

SSM sisteminin prensipleri Hamidi vd. (2003), Mokha vd. (1990a, 1990b) ve Constantinou vd. (1990a, 1990b) tarafından verilmiştir. Bu mesnet sistemi kayıcı olup, silindirik içbükey yüzey üzerinde kayabilen ve yüzeyi bir kauçuk mesnet malzemesi ile kaplanan mafsallı bir kayıcıdan oluşmaktadır. Bu mesnet malzemesi yüksek basınç dayanımına sahiptir. Basit bir sarkaç sisteminden SSM sistemine dönüşüm, Şekil 1.19'da görülmektedir.



Şekil 1.19. Sarkaç hareketinin SSM sistemine geçişinin gösterimi (Yurdakul, 2011)

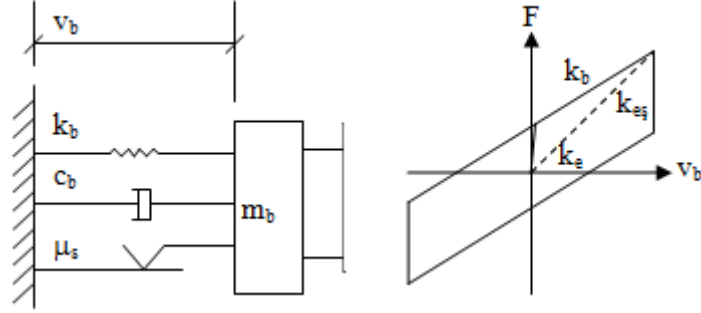
SSM'nin elemanları, en kesiti, fiziksel modeli ve kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 1.20'de gösterilmiştir.



b) SSM kesiti

Şekil 1.20. Sürtünlü sarkaç mesnet sistemi (Yurdakul, 2011)

Şekil 1.20'nin devamı



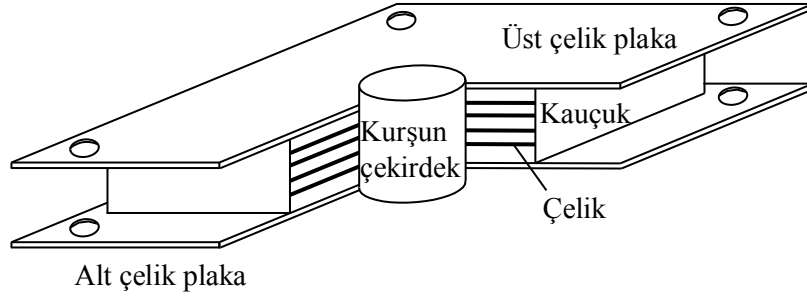
c) Fiziksel model

d) Kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi

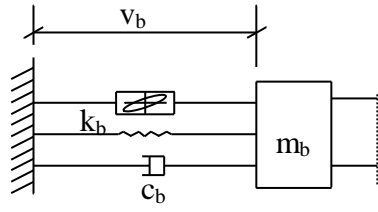
Sürtülmeli sarkaç tipi izolatörlerin en önemli avantajı, elastomerik sistemlerde kullanılan kauçuğun yangına karşı korunması gerekliliğine rağmen sürtülmeli sarkaç tipi izolatörlerde elamanların çelik olması nedeniyle böyle bir önleme gerek olmaması ve montajının kolay olmasıdır. Dezavantajları ise, sürtünme hareketinden önce ve sonra rijitliğin ani olarak değişmesi ve sürtünme katsayısının zamanla ve sıcaklıkla değişmesidir (Celep ve Kumbasar, 2004).

### 1.6.10. Yeni Zelanda Mesnet Sistemleri

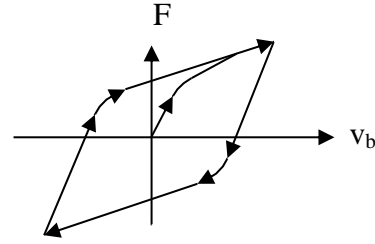
Yeni Zelanda Mesnet (YZM) sisteminin TKM sisteminden farkı; merkezine enerji dağılımında ilave bir rijitlik sağlamak amacıyla yerleştirilen kurşun çekirdek kullanılmasıdır. Kurşun çekirdeğin deprem sırasında oluşan enerji yutma kapasitesi, izolatörün yatay yönde yerdeğiştirme kapasitesini azaltır. YZM sistemi prensip olarak histeretik söndürücü olarak çalışmaktadır (Skinner vd., 1975). Bu sistemin en önemli dezavantajlarından biri depremden dolayı meydana gelen güçlü yer hareketleri sonrası kurşun çekirdeğin zarar görüp görmediğinin tespit edilememesidir. YZM sisteminin kesiti ve oluştuğu elemanları, fiziksel modeli ve kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 1.21'de gösterilmiştir.



a) Kesit ve elemanlar



b) Fiziksel model



c) Kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi

Şekil 1.21. Yeni Zelanda mesnet sistemi (Yurdakul, 2011)

### 1.6.10.1. Kuruşun Çekirdekli Kauçuk Mesnetlerin Mekanik Özellikleri

Bu tez çalışmasında, kuruşun çekirdekli kauçuk mesnetler kullanıldığından mekanik özellikleri verilecektir. Kuruşun çekirdekli kauçuk mesnetler, yapısında bulunan kuruşun malzemeden dolayı lineer olmayan davranış gösterirler. Kuruşun malzeme belirli bir akma değerine ulaşmıca kadar rijitlik değerine katkıda bulunur, akma sınırında ise izolatörün rijitlik değeri değişir ve farklı bir rijitlik değeri ile nihai yerdeğiştirme miktarına ulaşır.

Kuruşun çekirdekli kauçuk mesnetlerin davranışı;  $K_1$ ,  $K_2$  ve  $Q$  parametrelerine bağlı olarak modellenmektedir.  $K_1$  elastik rijitlik değeri olup, belirlenmesi oldukça güçtür.  $K_2$  ise akma sonrası rijitliktir (plastik rijitlik). Plastik rijitlik, mesnetin kesme dayanımından hesaplanabilir.  $Q$  ise karakteristik dayanımdır (histeretik eğrinin kuvvet eksenini kestiği noktanın ordinat değeridir) ve kuruşunun akma gerilmesi ile kuruşun malzeme alanının çarpılmasıyla hesaplanabilmektedir.

Kuruşun çekirdekli kauçuk mesnetlerin etkili rijitliği, ( $K_{eff}$ ),

$$K_{eff} = K_2 + \frac{Q}{D} \quad D \geq D_y \quad (1.40)$$



ile hesaplanmaktadır (Kelly ve Naeim, 1999). Burada  $D$  kauçuk mesnetin üst ucuna ait yatay yerdeğiştirme değerini,  $D_y$  ise izolatörün akma anındaki yerdeğiştirme değerini ifade etmektedir. Mesnetin doğal frekansı,  $\omega$ ,

$$\omega = \sqrt{\frac{K_{\text{eff}} g}{W}} = \sqrt{\omega_0^2 + \mu \frac{g}{D}} \quad (1.41)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Kelly ve Naeim, 1999). Burada,  $g$  yerçekimi,  $\omega_0 = \sqrt{K_2 g / W}$  olup mesnete ait etkili periyot,

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 + \mu \frac{g}{D}}} \quad (1.42)$$

şeklinde hesaplanır (Kelly ve Naeim, 1999).

Kurşun çekirdekli kauçuk mesnetlerin sönüm oranı değeri de tasarımda kullanılan önemli bir parametredir. Yönetmeliklerde sönüm ifadesi genelde iki sınıfa ayrılır. Bunlar, hıza bağlı sönüm ifadesi olan viskoz sönüm oranı ve yerdeğiştirmeye bağlı sönüm ifadesi olan histeretik sönüm oranıdır. İzolasyon sistemlerinde histeretik sönüm ifadesini kullanmak sistemin davranışı için daha uygundur.  $D > D_y$  yerdeğiştirme değerleri için etkili sönüm oranı,  $\beta_{\text{eff}}$ ,

$$\beta_{\text{eff}} = \frac{\text{Histeretik döngü alanı}}{2\pi K_{\text{eff}} D^2} = \frac{4Q(D-D_y)}{2\pi K_{\text{eff}} D^2} \quad (1.43)$$

şeklinde yazılabilir (Kelly ve Naeim, 1999). Histeretik döngü alanı yaklaşık olarak  $4Q(D-D_y)$  değerine eşittir. Akma anındaki yerdeğiştirme değeri  $D_y$ ,

$$D_y = \frac{F_y}{K_1} \quad (1.44)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Kelly ve Naeim, 1999). Burada  $F_y$  akma kuvveti olup,

$$F_y = Q + K_2 D_y \quad (1.45)$$

şeklinde hesaplanmaktadır (Kelly ve Naeim, 1999). (1.44) ve (1.45) denklemlerinden  $D_y$  akma yerdeğiştirmesi,

$$D_y = \frac{Q}{K_1 - K_2} \quad (1.46)$$

şeklinde elde edilmektedir (Kelly ve Naeim, 1999). Genel olarak kurşun çekirdekli kauçuk mesnetlerde  $K_1 = 10 \times K_2$  olacak şekildedir (Kelly ve Naeim, 1999). Buna göre (1.43) denklemi düzenlendiğinde,

$$\beta_{\text{eff}} = \frac{4Q(D - D_y)}{2\pi \left[ K_2 + \frac{Q}{D} \right] D^2} = \frac{4Q(D - D_y)}{2\pi D [K_2 D + Q]} = \frac{4Q(D - \frac{Q}{9K_2})}{2\pi D [K_2 D + Q]} \quad (1.47)$$

ifadesi elde edilmektedir (Kelly ve Naeim, 1999). Kurşun çekirdekli kauçuk mesnetlerin yatay rijitliği,

$$K_H = \frac{4(\pi^2)}{g(T_D)^2} \quad (1.48)$$

şeklinde hesaplanmaktadır (Kelly ve Naeim, 1999). Burada  $T_D$  tasarım periyodunu ifade etmektedir. Kurşun çekirdekli kauçuk mesnetlerin düşey rijitliği,

$$K_v = \frac{E_c A}{t_r} \quad (1.49)$$

ifadesiyle hesaplanmaktadır (Kelly ve Naeim, 1999). Burada  $t_r$  mesnetin kauçuk tabaka yüksekliğini,  $E_c$  kauçuk mesnete ait yüklemeye modülünü,  $A$  ise kauçuk malzeme en kesit alanını ifade etmektedir.

### 1.7. Yakın ve Uzak Fay Yer Hareketlerinin Özellikleri

Deprem sırasında bir bölgedeki dinamik hareketin türünü etkileyen birçok etken içerisinde depremin büyüklüğünün yanı sıra, bölgenin faya olan uzaklığı, topoğrafik özellikleri ve zeminin jeolojik yapısı dikkate alınması gereken en önemli etmenlerdir (Cox ve Asford, 2002).

Yakın alanlardaki yer hareketleri uzak alanlardaki yer hareketlerinden oldukça farklıdır. Uzak alan yer hareketleri deprem kaynağı ile yapı arasında kalan yer kabuğunun dalga yayılma özelliklerini ve yapının altındaki zeminin geoteknik özelliklerini yansıtırken, yakın alan yer hareketleri doğrudan fayın kırılma özelliklerini (veya kaynak özelliklerini) yansıtır. Deprem esnasında bir fay düzgün bir şekilde ve bir defada kırılmaz, parçalar halinde kırılır. Kırılan en büyük parçanın etkisi yakın alandaki yer hareketinde bir ivme darbesi olarak kendini gösterir. Depremin magnitütü arttıkça fayın kırılan parçalarının büyüklüğü artar, dolayısıyla yaydıkları sismik enerji de artar ve yakın alan yer hareketinde daha uzun ivme darbesi oluştururlar (URL-5, 2014).

Liao vd. (2004), yakın fay yer hareketi, bir fayın yakınında kaydedilen (faya uzaklık < 10 km) ve en büyük hız değerinin en büyük ivme değerine oranı (PGV/PGA) 0.1 saniyeden büyük olan yer hareketi olarak tarif etmişlerdir. Bu alan dışındaki zemin hareketleri ise uzak fay yer hareketi olarak adlandırılmaktadır.

Yakın fay deprem hareketi normal fay yönünde ve kalıcı zemin yerdeğiştirmelerinde uzun periyotlu yüksek hız atımları içerdiğinden dolayı uzak fay deprem hareketinden farklıdır (Somerville, 2002).

Yakın fay etkisi içerdiği bilinen ilk kayıtlar; Parkfield (1966) ve San Fernando (1971) Kaliforniya depremleridir. Erzincan (1992), Lander (1992), Northridge (1994), Kobe (1995), Kocaeli (1999), Düzce (1999) ve ChiChi (1999) depremleri ise yakın fay etkisi içermesi ve büyük hasarlara neden olmalarıyla bilinmektedir (Güneş, 2009).

## **2. YAPILAN ÇALIŞMALAR**

### **2.1. Giriş**

Bu çalışmanın birinci amacı, Operasyonel ve Teorik Modal Analiz Yöntemleri kullanılarak çok katlı bir binanın dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi ve mevcut yapının davranışını en iyi şekilde yansıtacak olan sonlu eleman modelinin elde edilmesidir. Bu amaç doğrultusunda 17 katlı betonarme bir bina seçilmiştir. Çalışmada ilk olarak, teorik olarak binanın doğal frekans ve mod şekillerini elde etmek için binanın 3 boyutlu sonlu eleman modeli SAP2000 (2008) programında oluşturulmuştur. Sonrasında ise bina üzerinde Operasyonel Modal Analiz Yöntemi uygulanarak deneysel olarak binanın dinamik karakteristikleri belirlenmiştir. Deneysel ve teorik olarak elde edilen dinamik karakteristikler arasındaki farkı minimize etmek için sınır şartları ve malzeme özellikleri dikkate alınarak binanın sonlu eleman modeli iyileştirilmiştir. Çalışmanın ikinci amacı, yakın ve uzak fay etkisindeki çok katlı betonarme yapıların izolatörlü ve izolatörsüz davranışının araştırılmasıdır. Bu amaçla, mevcut dinamik davranışı yansıtan en iyi model elde edildikten sonra seçilen binanın depreme karşı dayanımını arttırmak amacıyla sisteme izolatör eklenmiştir. Binanın izolatörlü ve izolatörsüz modellerinin yakın ve uzak fay deprem hareketi altında göstermiş olduğu davranış araştırılmıştır.

### **2.2. Seçilen Çok Katlı Bina ve Özellikleri**

Seçilen bina Giresun'un Espiye ilçesinde inşa edilmiştir. Bodrum katlar dâhil olmak üzere toplam 17 kattan oluşan bina, betonarme çerçeve-perde taşıyıcı sisteme sahiptir. Bina toplam yüksekliği 47.6m'dir. Konut olarak kullanılmak amacıyla tasarlanan bina 20mx30m boyutlarındadır. Bina kat yüksekliği 2.8m'dir. Döşeme kalınlığı çoğunlukla 12cm olup, binanın farklı bölgelerinde 16cm olarak uygulanmıştır. Ölçüm işlemlerinin yapıldığı sırada binanın bodrum katlar haricindeki bütün katlarında tuğla duvarlar örülü durumdadır. Binanın mevcut durumu Şekil 2.1'de verilmektedir.



Şekil 2.1. Binanın farklı açılardan görünüşleri

### 2.3. Binanın Teorik Modal Analizi

#### 2.3.1. Üç Boyutlu Sonlu Eleman Modeli

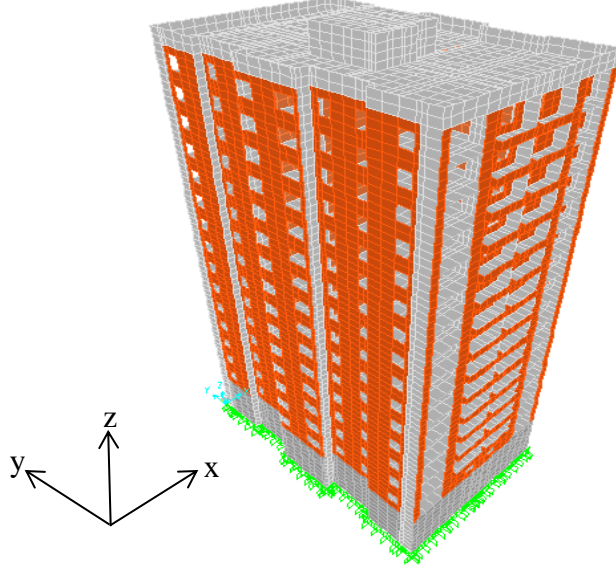
Binanın üç boyutlu modeli SAP2000 sonlu eleman programı kullanılarak elde edilmiştir (SAP2000, 2008). Yapılan literatür araştırması sonucunda, tuğlanın elastisite modülünün betonun elastisite modülüne oranının 1/2 ile 1/40 arasında değerler aldığı görülmüştür. Bu tez çalışmasında tuğlanın elastisite modülünün betonun elastisite modülüne oranı 1/10 olarak alınmıştır (Dönmez, 2006). Binanın modellenmesi sırasında dikkate alınan malzeme özellikleri Tablo 2.1’de verilmektedir.

Tablo 2.1. Binanın teorik modal analizinde kullanılan malzeme özellikleri

Malzeme	Elastisite Modülü (N/m <sup>2</sup> )	Poisson Oranı	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )
C30	3.2E10	0.2	2 450
Tuğla	3.2E9	0.2	1 600

Binanın sonlu eleman modelini oluştururken ilk olarak perde duvarlar ve temel kısmı üç boyutlu katı elemanlar kullanarak modellenmiştir. Ancak, analiz süresi tahmin edilenden fazla olduğu için sonlu eleman modelinin hazırlanmasında, her bir noktasında iki serbestliği olan dört düğüm noktalı düzlem elemanlar ve iki düğüm noktalı çubuk

elemanlar kullanılmıştır. Perdeler, döşemeler, duvarlar ve merdivenler düzlem eleman olarak kirişler de çubuk eleman olarak tasarlanmıştır. Binanın sonlu eleman modeli, 35053 adet düğüm noktası, 4522 adet çubuk eleman, 41068 adet düzlem elemandan oluşmaktadır. Binanın başlangıç sonlu eleman modeli Şekil 2.2’de gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Başlangıç sonlu eleman modeli

### 2.3.2. Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Binanın Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

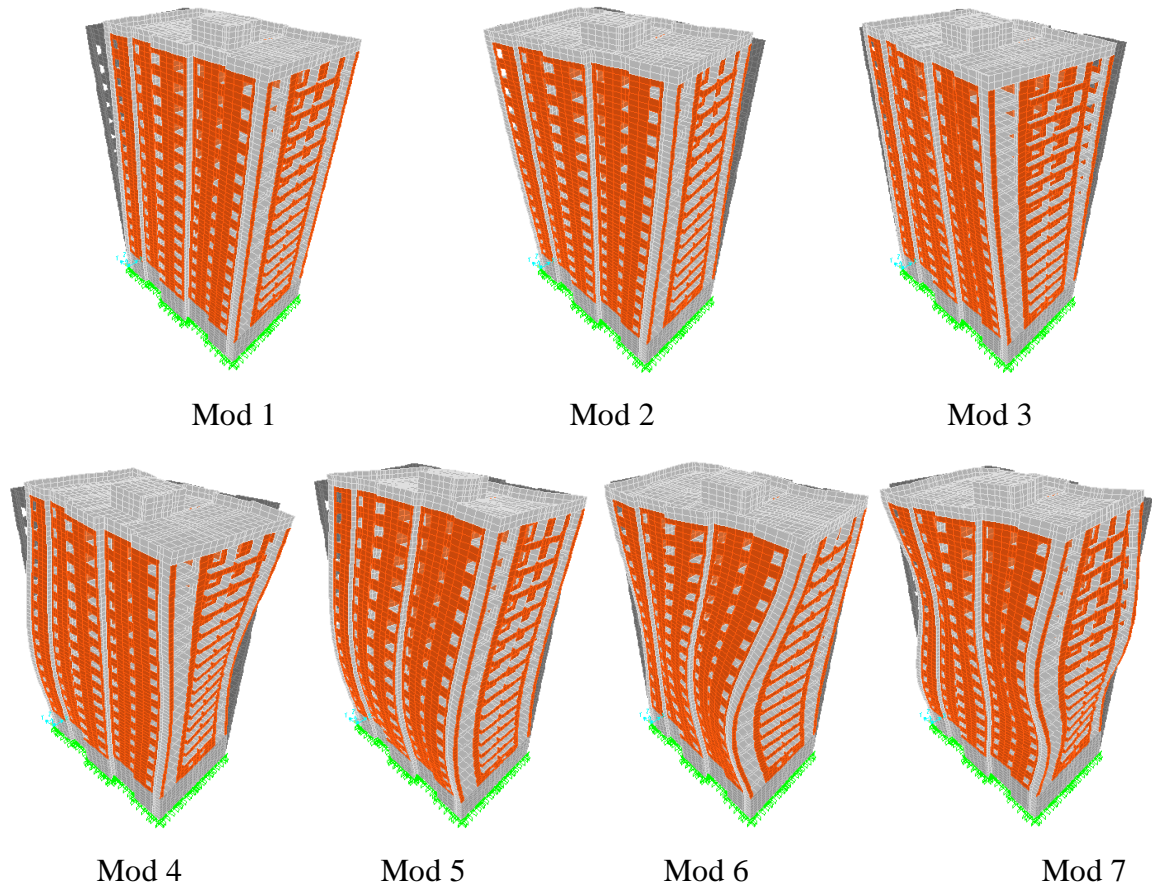
Binanın sonlu eleman modeli başlangıçta mesnetlenme koşulu olarak temel kısmındaki tüm serbestlikler tutularak analiz edilmiştir. Deneysel ölçümler sırasında bina üzerinde hareketli yük olmadığından model sadece kendi ağırlığı altında analiz edilmiştir.

Binanın SAP2000 sonlu eleman programında düzlem eleman kullanılarak elde edilen ilk yedi doğal frekans değerleri 1.639-9.752Hz arasında değişmektedir. Binanın katı eleman ve düzlem elemanlar kullanılarak oluşturulan başlangıç modelinden elde edilen ilk yedi doğal frekans ve periyot değerleri Tablo 2.2’de verilmektedir. Elde edilen katı ve düzlem eleman sonuçlarının birbirine yakın değerler olduğu görülmüştür.

Tablo 2.2. Başlangıç modeline ait doğal frekans ve periyot değerleri

Mod	İlk oluşturulan model (3 boyutlu katı elemanlı)		Başlangıç sonlu eleman modeli (Düzlem ve çubuk elemanlı)	
	Frekans (Hz)	Periyot (s)	Frekans (Hz)	Periyot (s)
1	1.557	0.642	1.639	0.610
2	1.674	0.597	1.819	0.550
3	1.762	0.567	1.907	0.524
4	5.098	0.196	5.482	0.182
5	5.353	0.186	5.581	0.179
6	5.498	0.182	5.856	0.171
7	9.150	0.109	9.752	0.102

Başlangıç sonlu eleman modeline ait her bir frekansa karşılık gelen mod şekilleri Şekil 2.3'te verilmektedir.



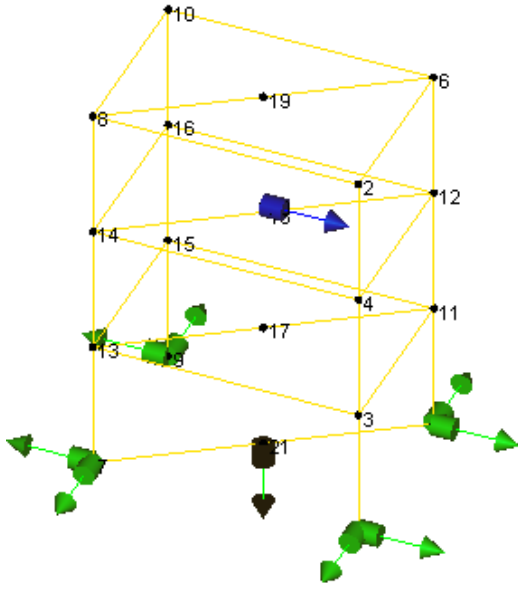
Şekil 2.3. Binanın başlangıç sonlu eleman modeline ait ilk yedi mod şekli

## 2.4. Binanın Operasyonel Modal Analizi

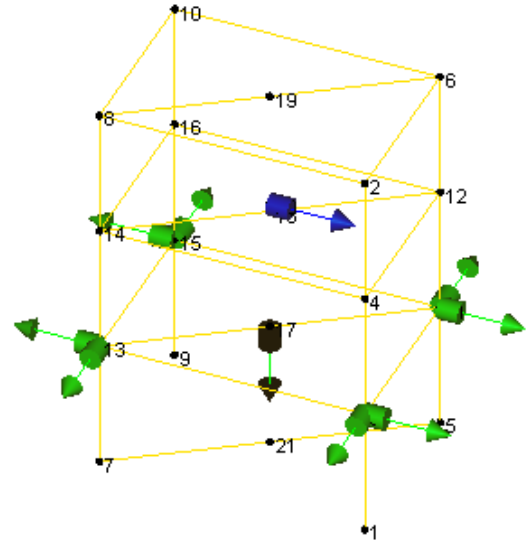
Binanın teorik olarak sonlu eleman modelinden elde edilen dinamik karakteristikleri binanın dinamik davranışı hakkında bir fikir verse de yapının gerçek davranışını belirlemede tek başına yeterli olmamaktadır. Binanın sonlu eleman modelinden elde edilen teorik sonuçların, binanın mevcut davranışını yansıtıp yansıtmadığını anlamak için deneysel yöntemlerle elde edilen sonuçlarla doğrulanması gerekmektedir. Bu doğrultuda deneysel yöntem olan Operasyonel Modal Analiz Yöntemi kullanılarak bina üzerinde ölçümler gerçekleştirilmiştir. Ölçüm esnasında kullanılan ekipmanlar; Brüel&Krajer 8340 tipinde ivmeölçerler, 17 kanallı Brüel&Kjaer 3560 veri toplama ünitesi, çevresel titreşim verilerinden dinamik karakteristikleri elde etmek için kullanılan Operasyonel Modal Analiz (OMA) yazılımı, dizüstü bilgisayar, kablolar ve ivmeölçerleri yapıya sabitlemek için kullanılan vidalama aparatlarıdır.

Bu ekipmanlarla bina dinamik davranışı farklı kat seviyelerinden ölçümler alınarak sinyaller analiz edilmiştir. Ölçümlerde, binanın dört köşe noktasına plan düzleminde enine, boyuna ve düşey doğrultularda sismik ivmeölçerler yerleştirilmiştir. Ölçümlerde, binanın zemin seviyesinden, altıncı katından, on birinci katından ve çatı katı olan on beşinci katından 30 dakikalık ölçümler alınmıştır. Ölçümlerden elde edilen veriler on birinci kata yerleştirilen referans ivmeölçer sinyali dikkate alınarak birleştirilmiştir. Her katta binanın köşe noktalarına plan düzleminde enine ve boyuna doğrultularda olmak üzere sekiz adet, düşey doğrultuda ise 1 adet olmak üzere toplam 9 adet ivmeölçer kullanılmıştır. Ayrıca katlardan ölçülen sinyaller on birinci kata yerleştirilen 1 adet referans ivmeölçer yardımıyla birleştirilmiştir. Şekil 2.4'te her bir ölçüm aşamasındaki ivmeölçer yerleşim düzeni verilmektedir.

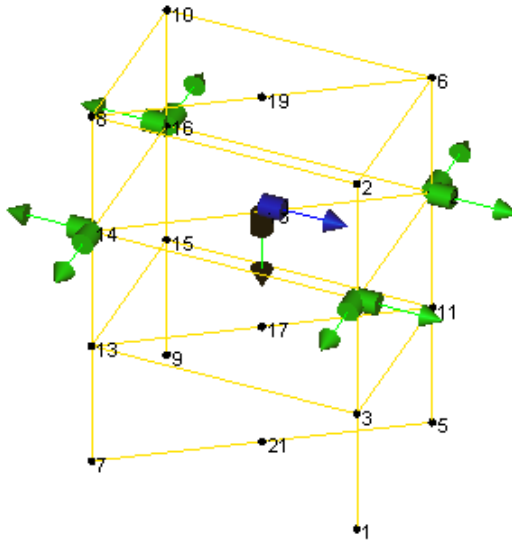




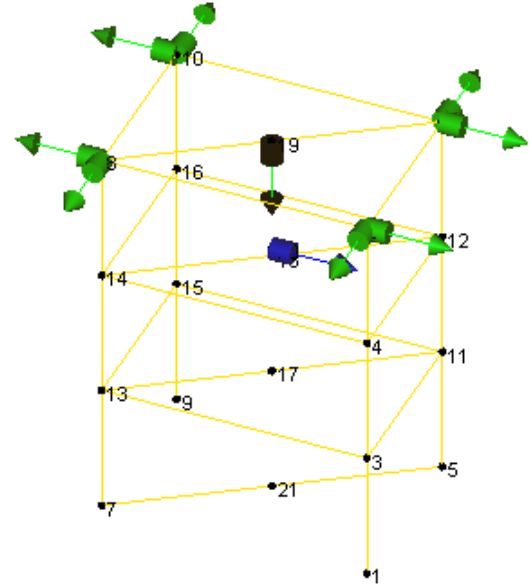
a. Zemin kat ölçümü



b. Altıncı kat ölçümü



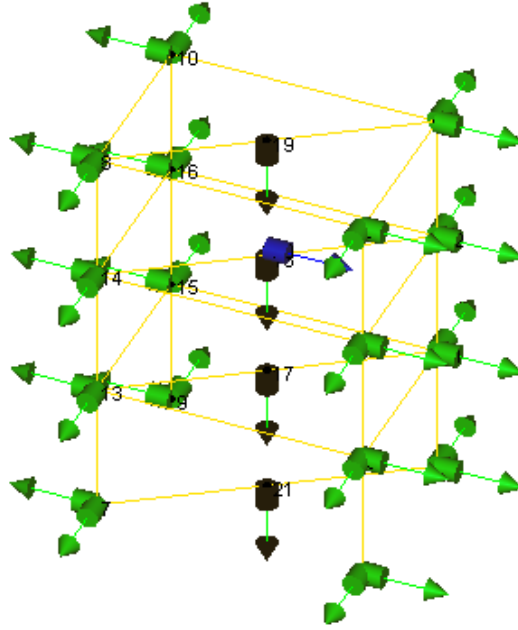
c. On birinci kat ölçümü



d. On beşinci kat ölçümü

Şekil 2.4. Binanın her bir katındaki ivmeölçer yerleşim düzeni

Şekil 2.4'ün devamı



e. Toplam ivmeölçer yerleşimi

İvmeölçerler binaya Şekil 2.5'te gösterilen biçimde kolonların döşemeye yakın alt uçlarına bağlanmıştır. İvmeölçerlerden gelen sinyaller veri toplama ünitesi yardımıyla toplanmış ve bilgisayara aktarılmıştır (Şekil 2.6).



a. Yatay ve düşey ivmeölçerlerin montajı

Şekil 2.5. Binada ivmeölçer yerleşimine ait görüntüler

Şekil 2.5'in devamı



b. Referans ivmeölçer



Şekil 2.6. Veri toplama sistemi

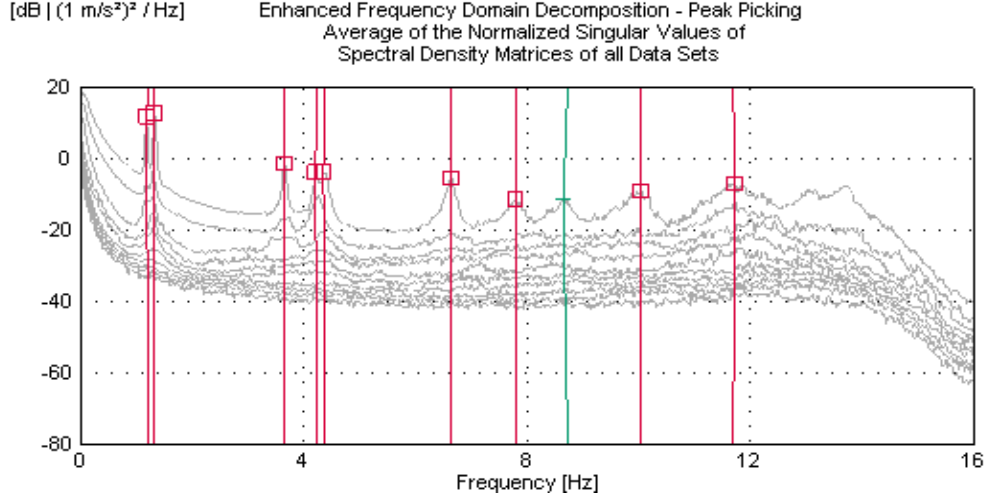
### 2.4.1. Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

Bu tez çalışması kapsamında bina üzerindeki deneysel çalışmalarda, ölçümü gerçekleştirilen binanın dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde Operasyonel Modal Analiz Yönteminde sıklıkla tercih edilen yöntemlerden Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma (GFTAA) Yöntemi kullanılmıştır. Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma (GFTAA) yöntemi kullanılarak, analiz edilen sinyallerden yapının doğal titreşim frekansları, mod şekilleri ve modal sönüm oranları deneysel olarak belirlenmiştir.

#### 2.4.1.1. Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma (GFTAA) Yöntemi ile Elde Edilen Dinamik Karakteristikler

Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayrıştırma Yönteminde dinamik karakteristikler her bir titreşim sinyalinden tekil değerler olarak elde edilir. Bu yöntemde, mod şekilleri, doğal frekanslar ve sönüm oranları sinyal işleme sonucu elde edilen spektral yoğunluk

fonksiyonlarında piklerin seçilmesiyle belirlenmektedir. GFTAA Yöntemi kullanılarak elde edilen spektrum Şekil 2.7’de verilmektedir.



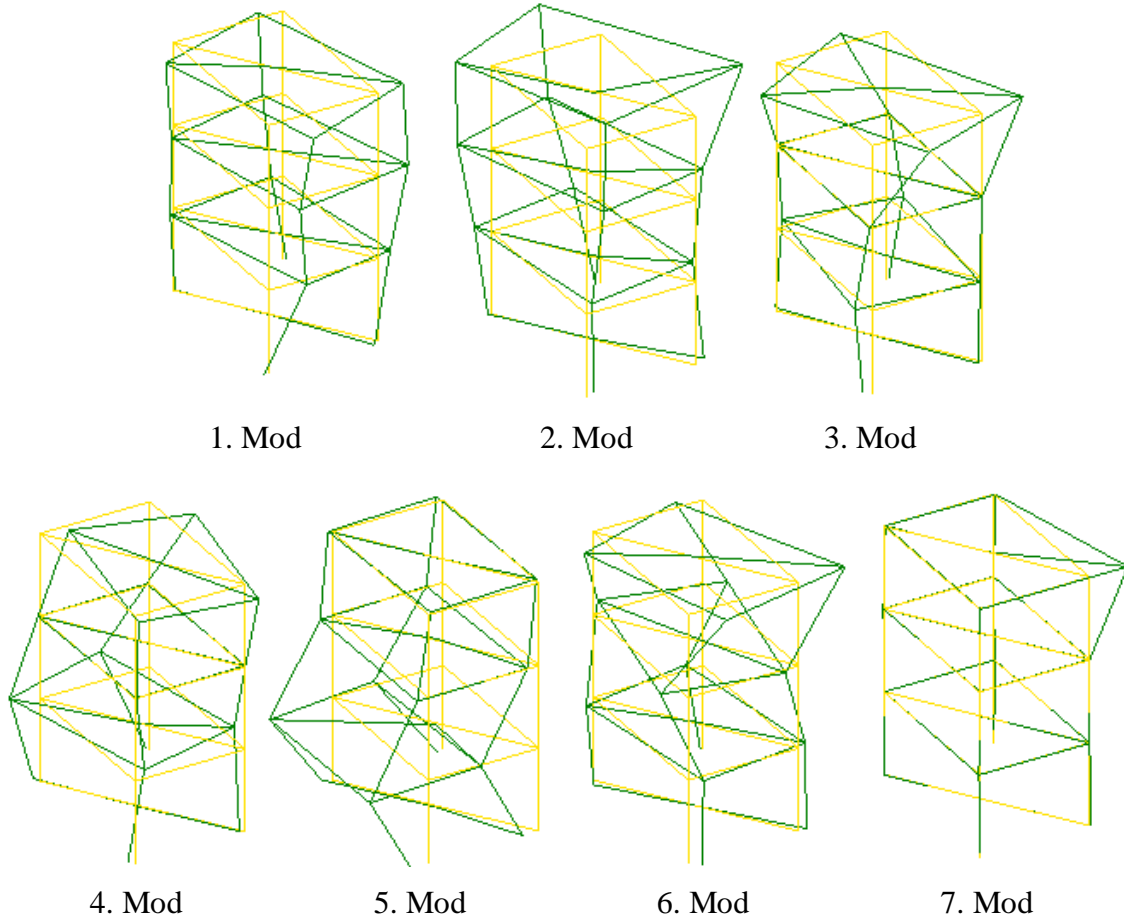
Şekil 2.7. Bina ölçümüne ait GFTAA Yöntemi kullanılarak elde edilen spektrum

Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma (GFTAA) Yöntemi için tekil değerlerden elde edilen doğal titreşim frekansları ve modal sönüm oranları Tablo 2.3’te verilmektedir.

Tablo 2.3. Binanın ölçümlerinden elde edilen doğal frekans ve sönüm oranları

Mod Numarası	GFTAA Yöntemi	
	Frekans (Hz)	Modal Sönüm Oranı (%)
1	1.184	0.973
2	1.328	0.816
3	3.665	0.607
4	4.237	0.801
5	4.380	0.967
6	6.637	0.965
7	7.823	1.283

Bu ölçüm durumu için belirlenen mod şekilleri ise Şekil 2.8’de verilmektedir. Ölçümden binanın ilk üç modu sırasıyla; burulma, boyuna öteleme ve burulma modları şeklinde oluştuğu belirlenmiştir.



Şekil 2.8. Binanın deneysel olarak ölçülen ilk yedi mod şekli

### 2.5. Deneysel ve Teorik Dinamik Karakteristiklerin Karşılaştırılması

Bina üzerinde gerçekleştirilen deneysel ve teorik çalışmalar sonucunda elde edilen dinamik karakteristikler Tablo 2.4’te karşılaştırmalı olarak verilmektedir.

Tablo 2.4. Binanın deneysel ve analitik doğal frekansların karşılaştırılması

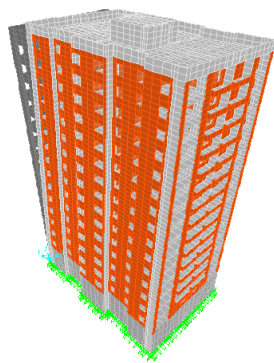
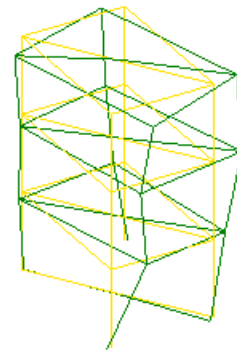
Mod Numarası	Doğal Frekanslar (Hz)		
	Deneysel	Analitik	Fark (%)
1	1.184	1.639	38.4

Tablo 2.4'ün devamı

2	1.296	1.820	40.4
3	1.328	1.907	43.6
4	3.645	5.482	50.4
5	4.219	5.580	32.3
6	4.388	5.856	33.6
7	6.619	9.751	47.3

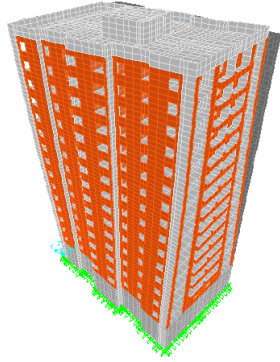
Tablo 2.4'ten de görüldüğü üzere deneysel ve teorik frekanslar arasında %50'ye varan farklılıklar bulunmaktadır. Teorik olarak elde edilen verilerin deneysel verilerden bu kadar farklı olması malzeme özellikleri ve yapıdaki sınır şartlarında yapılan kabullerin gerçek yapı ile tam olarak örtüşmemesinden kaynaklanmaktadır. Değerler arasındaki bu farklılığı minimize etmek için binanın teorik sonlu eleman modelinde iyileştirmeler yapılması gerekmektedir.

Binaya ait deneysel ve teorik mod şekilleri arasında da frekans değerlerinde olduğu gibi bir takım farklılıkların olduğu Şekil 2.9'dan anlaşılmaktadır. Bu farklılıkların frekans değerlerindeki farklarda olduğu gibi analitik modelleme sırasında yapılan kabullerden kaynaklandığı ve bu konuda analitik iyileştirme yapılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

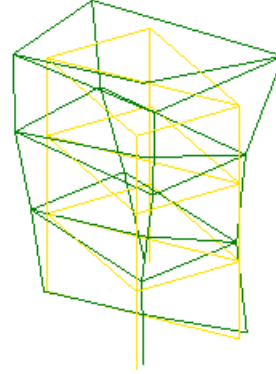
1. mod ( $f_1 = 1.639\text{Hz}$ )1. mod ( $f_1 = 1.184\text{Hz}$ )

Şekil 2.9. Binaya ait deneysel ve teorik mod şekillerinin karşılaştırılması

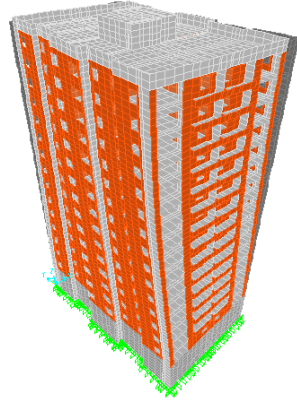
Şekil 2.9' un devamı



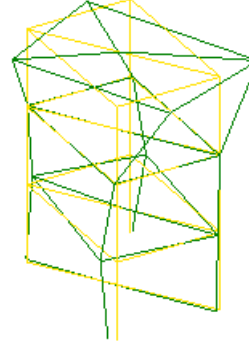
2. mod ( $f_2 = 1.820\text{Hz}$ )



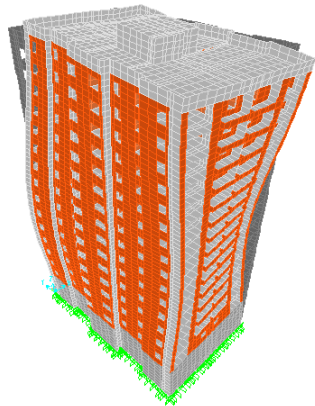
2. mod ( $f_2 = 1.296\text{Hz}$ )



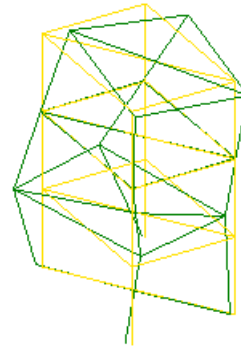
3. mod ( $f_3 = 1.907\text{Hz}$ )



3. mod ( $f_3 = 1.328\text{Hz}$ )

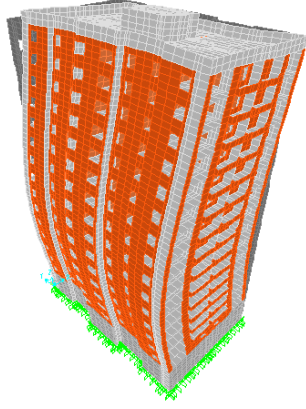


4. mod ( $f_4 = 5.482\text{Hz}$ )

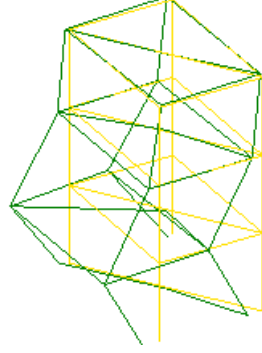


4. mod ( $f_4 = 3.645\text{Hz}$ )

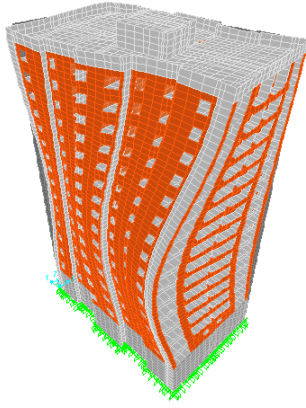
Şekil 2.9' un devamı



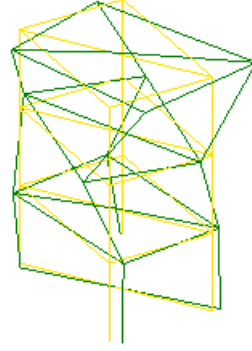
5. mod ( $f_5 = 5.580\text{Hz}$ )



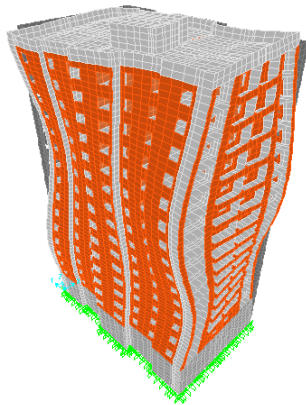
5. mod ( $f_5 = 4.219\text{Hz}$ )



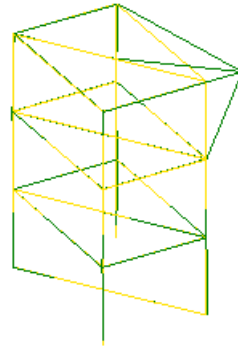
6. mod ( $f_6 = 5.856\text{Hz}$ )



6. mod ( $f_6 = 4.388\text{Hz}$ )



7. mod ( $f_7 = 9.751\text{Hz}$ )



7. mod ( $f_7 = 6.619\text{Hz}$ )



## 2.6. Binanın Sonlu Eleman Modelinin İyileştirilmesi

Bina üzerinde yapılan deneysel ve analitik çalışmalar sonucunda elde edilen mod şekilleri ve frekanslar birbirinden farklılık göstermektedir. Binanın deneysel çalışmalarında elde edilen doğal frekanslar ile analitik modelinden elde edilen doğal frekansların farklılıklarını ortadan kaldırmak amacı ile başlangıç sonlu eleman modeli iyileştirilmiştir. Bu kapsamda binada iyileştirme parametresi olarak sınır şartı ve malzeme özellikleri dikkate alınmıştır. Binanın tabanına ve bodrum kat dış yüzeylerine yapı-zemin etkileşimini sağlayabilmek için yay atanmasının yanında tuğlanın elastisite modülü de değiştirilmiştir. Bu sayede deneysel ve iyileştirilmiş model sonuçları arasındaki fark kabul edilebilir seviyelere getirilmiştir. İyileştirilmiş modelde kullanılan malzeme özellikleri Tablo 2.5'te, yay katsayıları ise Tablo 2.6'da verilmektedir.

Tablo 2.5. Binanın iyileştirilmiş sonlu eleman modeline ait malzeme özellikleri

Malzeme	Elastisite Modülü (N/m <sup>2</sup> )	Poisson Oranı	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )
C30	3.2E10	0.2	2 450
Tuğla	1.08E9	0.2	1 600

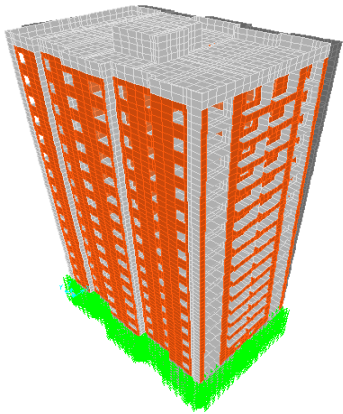
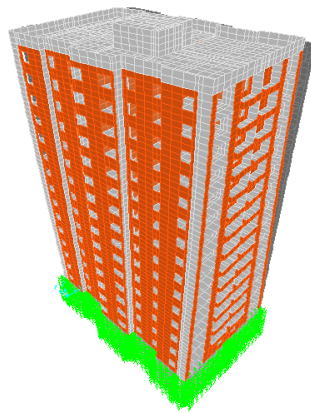
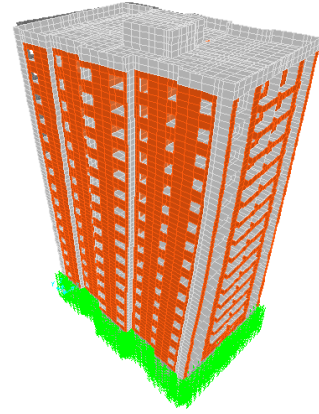
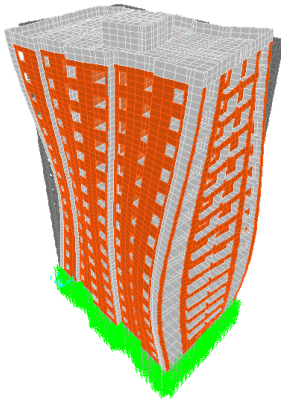
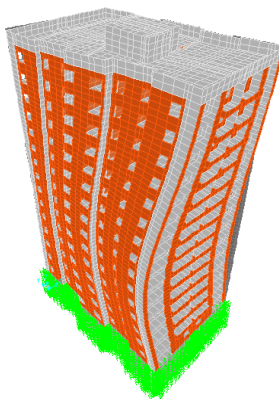
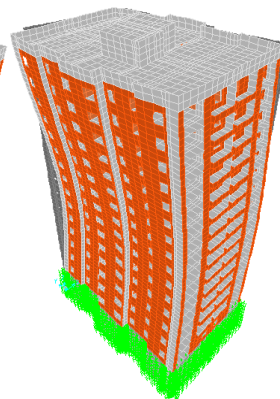
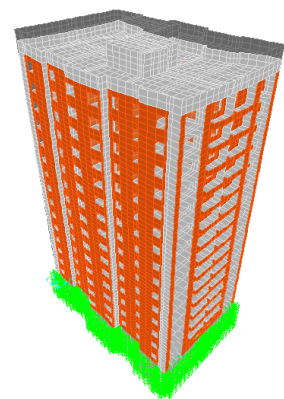
Tablo 2.6. Binanın iyileştirilmiş sonlu eleman modelinde kullanılan yay katsayıları

Sınır Şartları	Yay Katsayıları (kN/m)		
	Enine	Boyuna	Düşey
Taban	36 600	36 600	36 600
Bodrum kat duvarları	12 200	12 200	12 200

İyileştirilmiş modelin frekans değerleri Tablo 2.7'de ve bunlara karşılık gelen mod şekilleri ise Şekil 2.10'da gösterilmektedir.

Tablo 2.7. Binanın iyileştirilmiş sonlu eleman modelinden elde edilen doğal frekanslar

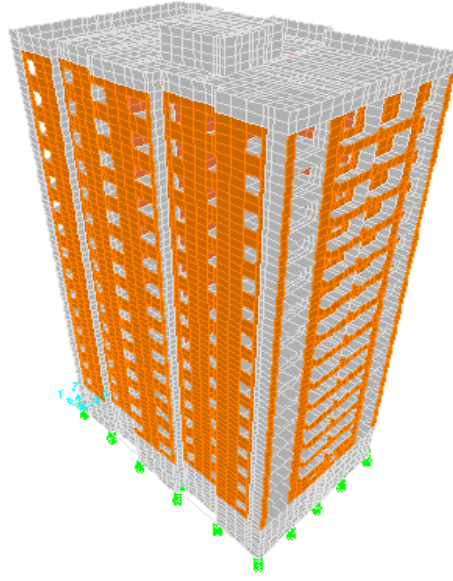
Mod Numarası	Doğal Frekanslar (Hz)			
	Deneyisel	Başlangıç Modeli	İyileştirilmiş Model	Fark (%)
1	1.184	1.639	1.184	0.00
2	1.296	1.820	1.291	0.39
3	1.328	1.907	1.370	3.16
4	3.645	5.482	4.121	13.06
5	4.219	5.580	4.417	4.69
6	4.388	5.856	4.499	2.53
7	6.619	9.751	6.738	1.80

1. Mod ( $f_1 = 1.184\text{Hz}$ )2. Mod ( $f_2 = 1.291\text{Hz}$ )3. Mod ( $f_3 = 1.370\text{Hz}$ )4. Mod ( $f_4 = 4.121\text{Hz}$ )5. Mod ( $f_5 = 4.417\text{Hz}$ )6. Mod ( $f_6 = 4.499\text{Hz}$ )7. Mod ( $f_7 = 6.738\text{Hz}$ )

Şekil 2.10. Binanın iyileştirilmiş sonlu eleman modeline ait ilk yedi mod şekli

## 2.7. Binanın Sonlu Eleman Modelinin İzolatörlü Olarak Oluşturulması

SAP2000 (SAP2000, 2008) sonlu eleman programında modellenen 17 katlı binanın iyileştirme işlemini tamamladıktan sonra iyileştirilmiş model üzerinde izolatörlerin binanın dinamik davranışına nasıl bir değişim yaptığını görmek amacıyla bina tabanına izolatör ilave edilmiştir. Binanın taban izolasyonunda kullanılan izolatör tipi kurşun çekirdekli kauçuk mesnet olarak seçilmiştir. Binaya kırk yedi adet izolatör yerleştirilmiş olup, her biri perde duvarların altına konmuştur. Sisteme eklenen izolatörler 2.7s'lik tasarım periyodu ve 50 cm'lik yerdeğiştirme kapasitesine göre boyutlandırılmışlardır. Kullanılan izolatörlere ait mekanik özellikler 1.6.10.1. başlığı altındaki formülizasyona göre hesaplanmış olup, elde edilen değerler Tablo 2.8'de verilmektedir. Binanın izolatörlü üç boyutlu sonlu eleman modeli Şekil 2.11'de verilmektedir.



Şekil 2.11. Binanın izolatörlü sonlu eleman modeli

Tablo 2.8. İzolatörlere ait doğrusal ve doğrusal olmayan özellikler

Kurşun Çekirdekli Kauçuk İzolatör			Özellik					
			Doğrusal			Doğrusal Olmayan		
			Sembol	Birim	Değer	Sembol	Birim	Değer
Doğrultu	Düşey	Rijitlik	$K_v$	kN/m	3.14E8	-	-	-
	Yatay	Rijitlik	$K_{eff}$	kN/m	1158	$K_1$	kN/m	10763
		Akma Dayanımı	-	-	-	Q	kN	45.9
		Akma Sonrası Rijitlik Oranı	-	-	-	$K_2/K_1$	-	0.1

### 2.7.1. İzolatörlü ve İzolatörsüz Binanın Dinamik Karakteristiklerinin Karşılaştırılması

Bina üç boyutlu sonlu eleman modeli izolatörlü ve izolatörsüz olarak modellenmiş olup, analiz sonucunda elde edilen periyot değerleri Tablo 2.9' da verilmektedir. Tablodaki verilerden de görüldüğü üzere izolatörlü modeldeki periyot değerleri izolatörsüz modeldeki periyot değerlerinin yaklaşık üç katı büyüklüğündendir. İzolatörlerin yapıdaki periyot değerlerini önemli ölçüde arttırdığı görülmektedir. Ayrıca, elde edilen periyotların hesaplanan tasarım periyodu olan 2.7 s'yi aşmadığı görülmüştür.

Tablo 2.9. İzolatörlü ve izolatörsüz sonlu eleman modeline ait periyot değerleri

Mod Numarası	Periyotlar (s)		
	İzolatörsüz Modeller		İzolatörlü Model
	Başlangıç Modeli	İyileştirilmiş Model	
1	0.606	0.845	2.700
2	0.546	0.784	2.697
3	0.520	0.738	2.673
4	0.181	0.246	0.437
5	0.177	0.229	0.431
6	0.169	0.223	0.404
7	0.102	0.147	0.201

## 2.8. Yakın ve Uzak Fay Yer Hareketleri İçin İzolatörsüz ve İzolatörlü Bina Modellerinin Analizi

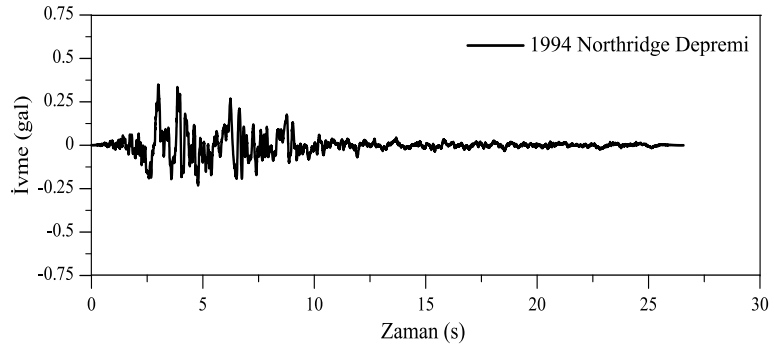
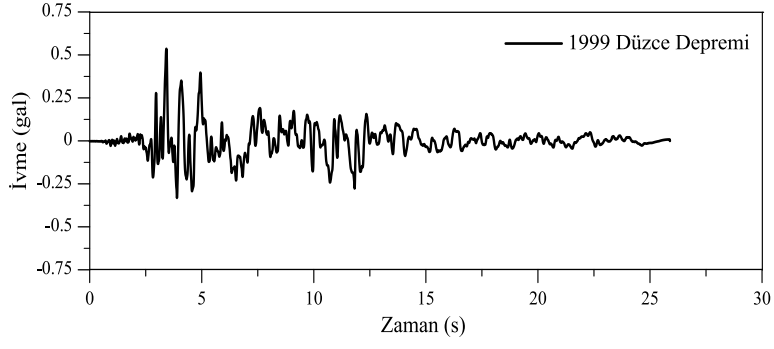
### 2.8.1. Seçilen Yakın ve Uzak Fay Yer Hareketleri

Bu tez çalışmasında, dört farklı deprem yer hareketinden yararlanılmıştır. Bunlardan 1999 Düzce Depremi ve 1994 Northridge Depremi yakın fay deprem hareketi olarak, 1999 Kocaeli Depremi ve 1974 Imperial Valley Depremi de uzak fay deprem hareketi olarak analizlerde kullanılmıştır (URL-6, 2014). Bu kayıtlara ait bazı bilgiler Tablo 2.10'da verilmiştir.

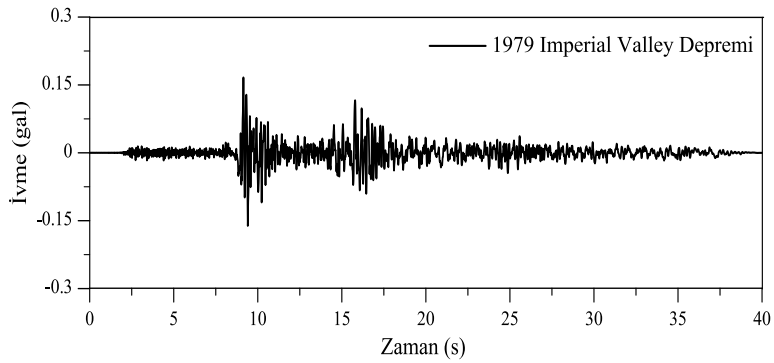
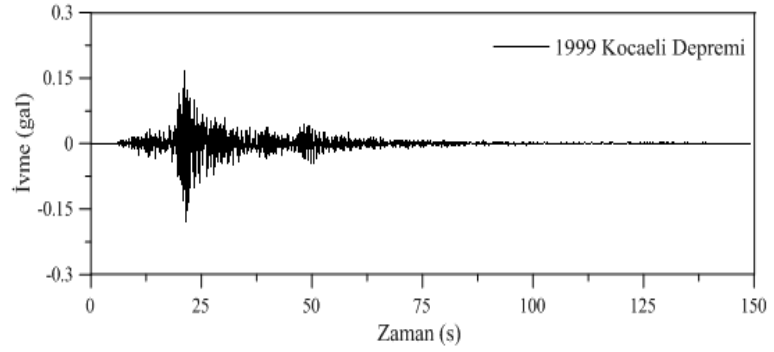
Tablo 2.10. Analizlerde kullanılan yakın ve uzak fay deprem hareketlerinin özellikleri

Deprem Adı	İstasyon	Kayıt/Bileşen	M	d (km)	PGA (g)	PGV (cm/s)	PGD (cm)	Deprem Hareketi Tipi
1999 Düzce	Düzce	DUZCE/DZC270	7.1	8.2	0.535	83.5	51.59	Yakın-fay
1994 Northridge	00000 La Dam	NORTHR/LDM334	6.7	2.6	0.349	50.8	15.11	Yakın-fay
1999 Kocaeli	Çekmece	KOCAELI/CNA000	7.4	76.1	0.179	18.4	18.25	Uzak-fay
1979 Imperial Valley	6610 Victoria	IMPVALL/H-VCT345	6.5	54.1	0.167	8.3	1.05	Uzak-fay

Çalışmada deprem hareketleri binaya X eksenini doğrultusunda (binanın zayıf doğrultusunda) uygulanmıştır. Seçilen deprem hareketlerine ait ivme-zaman, hız-zaman ve yerdeğiştirme-zaman grafikleri sırasıyla Şekil 2.12 - 2.14'te verilmektedir.

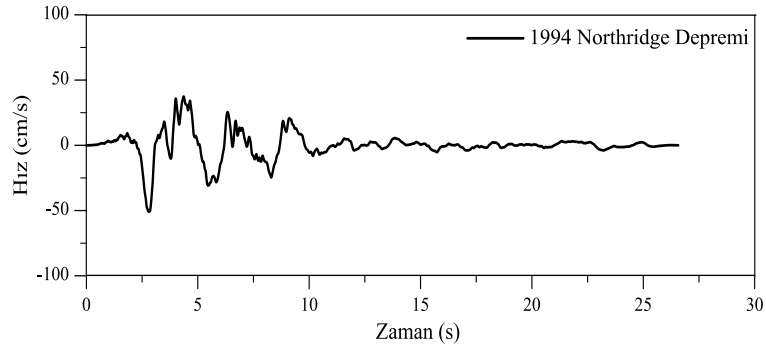
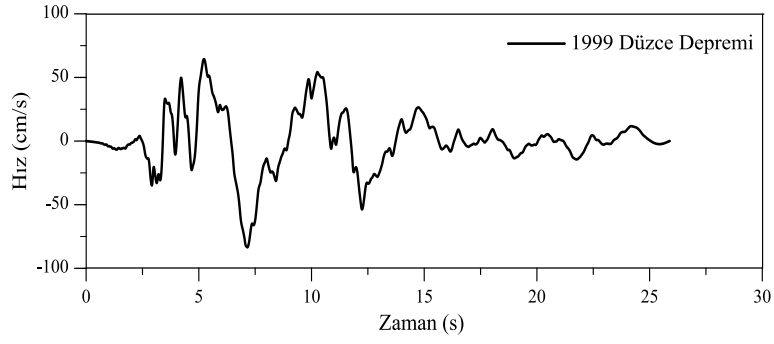


a) Yakın fay yer hareketleri

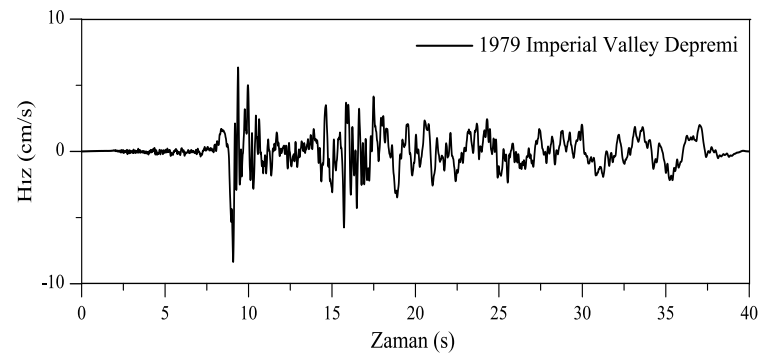
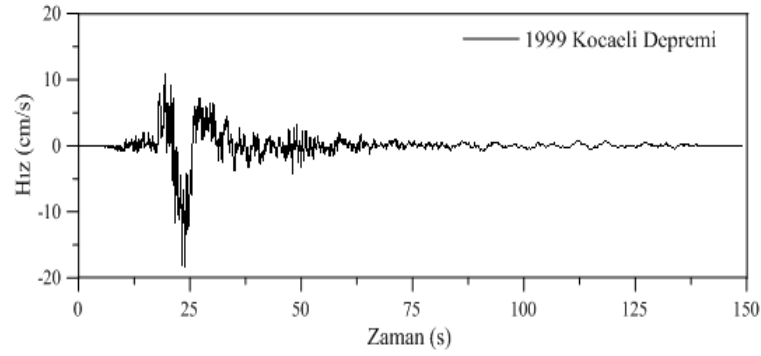


b) Uzak fay yer hareketleri

Şekil 2.12. Seçilen depremlere ait ivme-zaman grafikleri

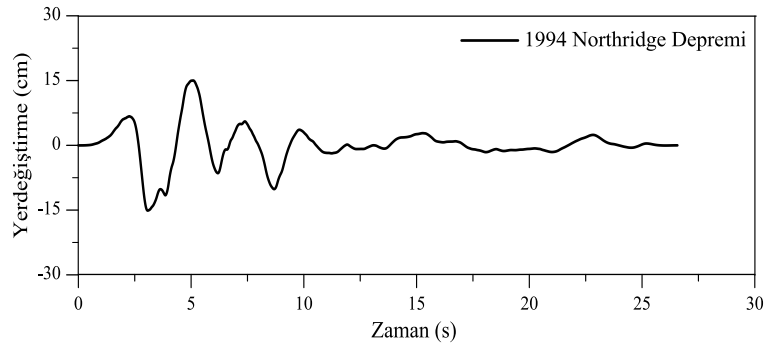
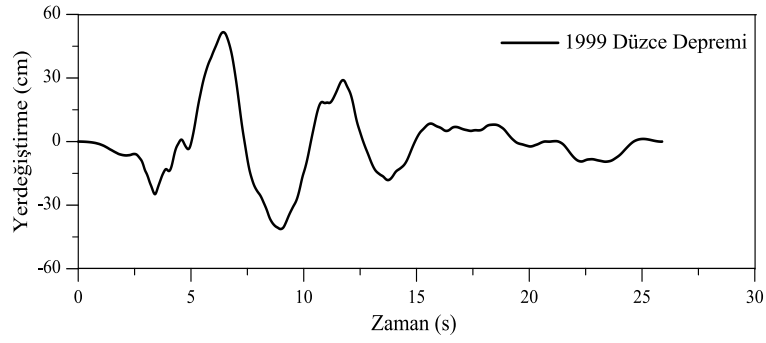


a) Yakın fay yer hareketleri

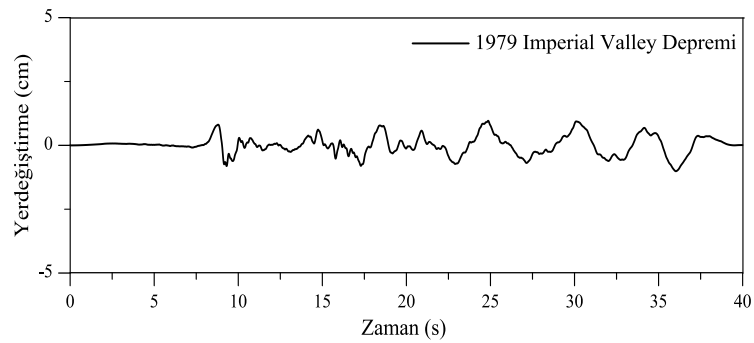
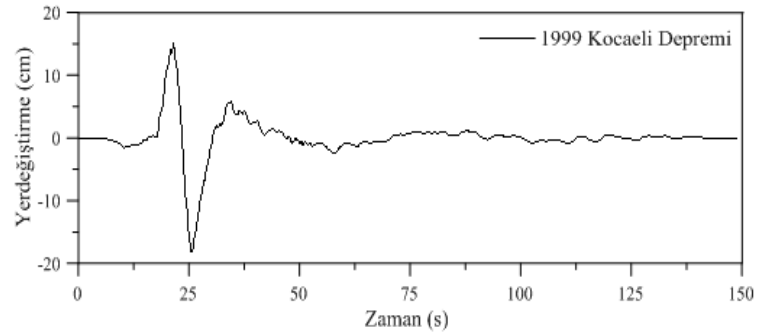


b) Uzak fay yer hareketleri

Şekil 2.13. Seçilen depremlere ait hız-zaman grafikleri



a) Yakın fay yer hareketleri

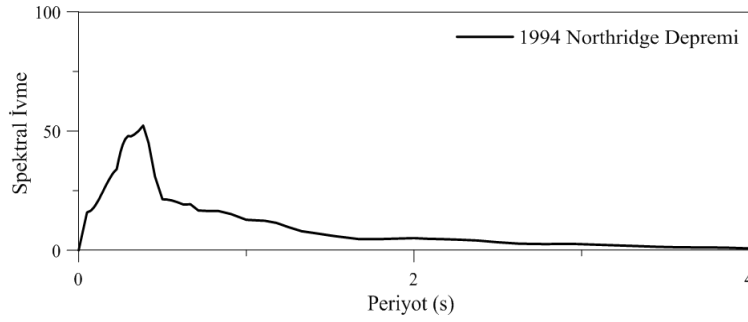
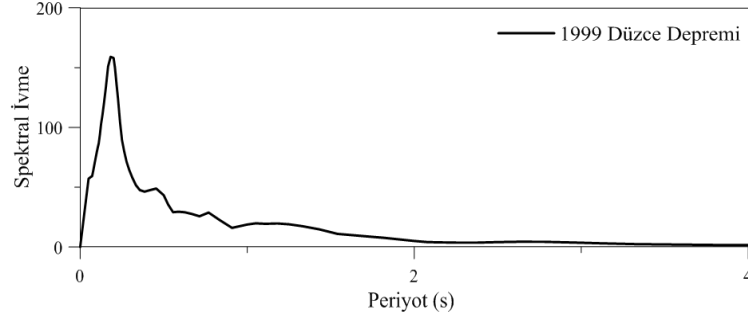


b) Uzak fay yer hareketleri

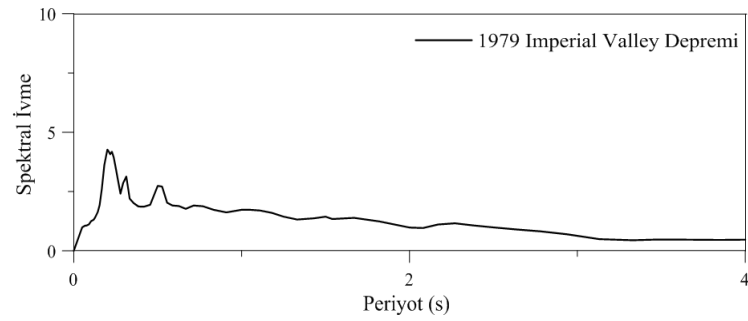
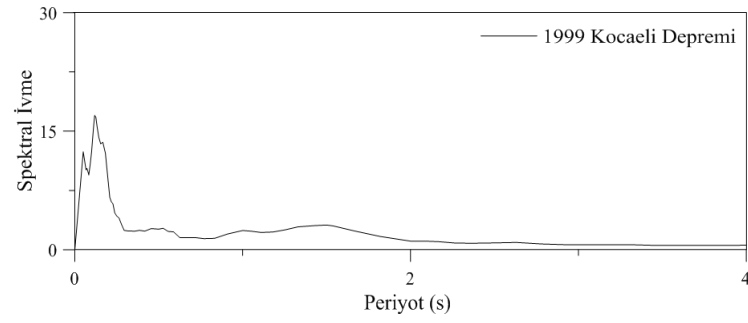
Şekil 2.14. Seçilen depremlere ait yerdeğiştirme-zaman grafikleri



%5 sönüm için seçilen deprem hareketlerine ait spektrum eğrileri Şekil 2.15'te gösterilmektedir.



a) Yakın fay yer hareketleri

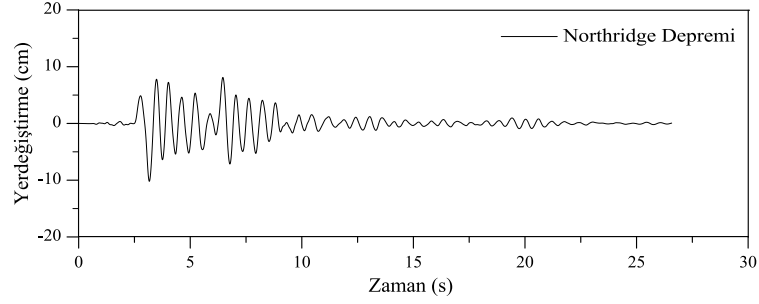
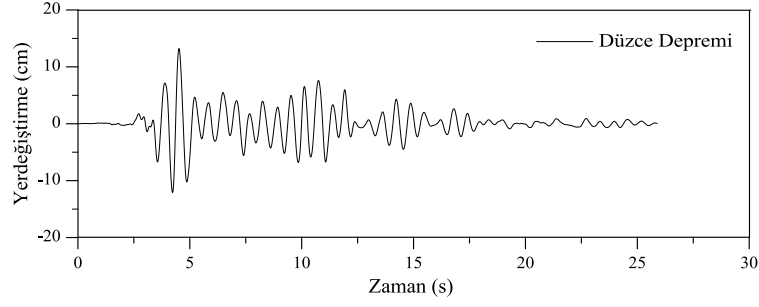


b) Yakın fay yer hareketleri

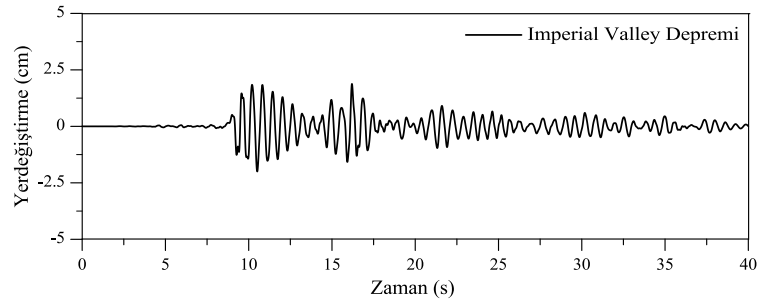
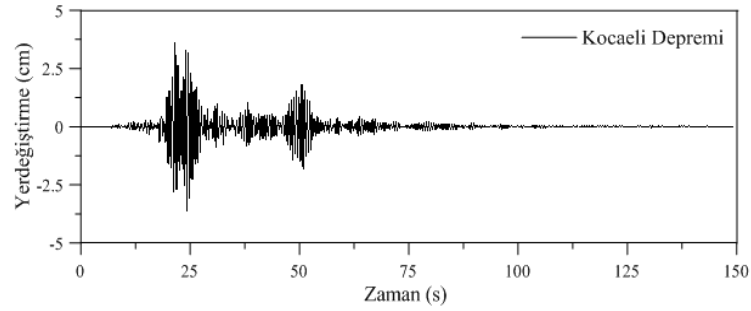
Şekil 2.15. Seçilen depremlere ait spektrum eğrileri

### 2.8.2. Yakın ve Uzak Fay Yer Hareketleri İçin Binanın Başlangıç Modelinin Analizi

Binanın başlangıç modeli yakın ve uzak fay etkisi altında analiz edilmiş olup, bu analiz sonucu en üst katta meydana gelen X eksenli doğrultusundaki yerdeğiştirme-zaman grafikleri Şekil 2.16'da gösterilmektedir.



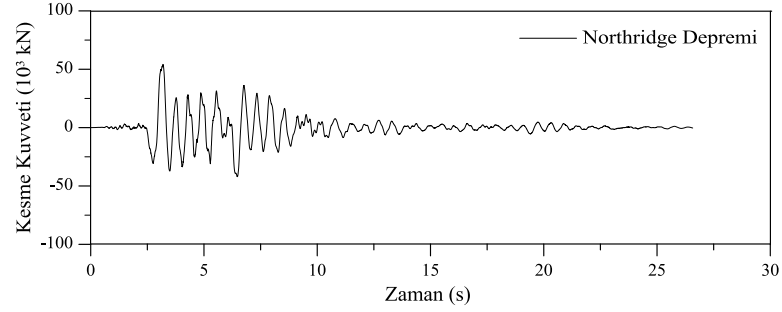
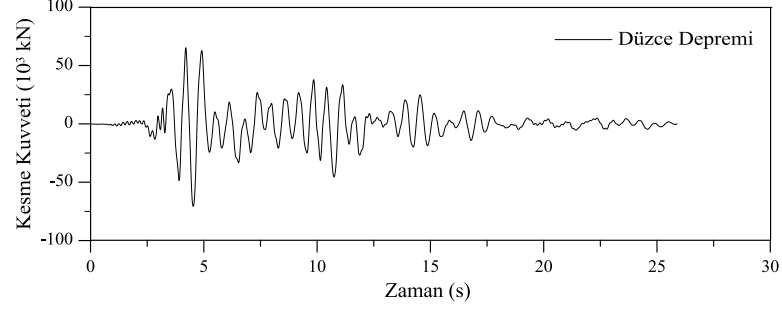
#### a) Yakın fay kaynaklı yerdeğiştirmeler



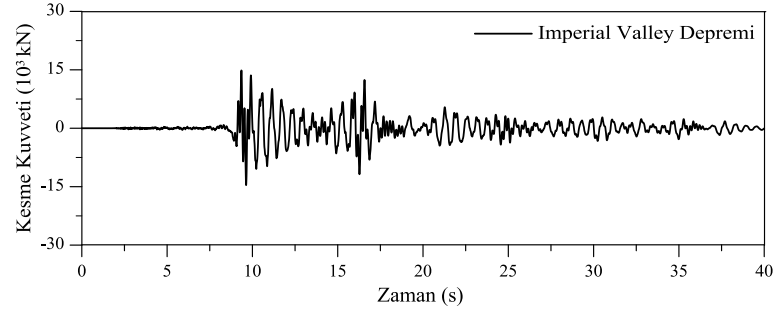
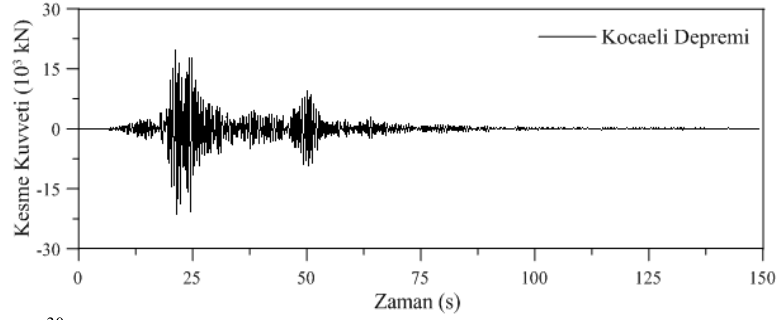
#### b) Uzak fay kaynaklı yerdeğiştirmeler

Şekil 2.16. Başlangıç modeline ait yerdeğiştirme-zaman grafikleri

Yakın ve uzak fay deprem hareketleri altında binanın başlangıç modeline ait X eksenini doğrultusundaki taban kesme kuvvetlerinin zamanla değişimini gösteren grafikler Şekil 2.17’de gösterilmektedir.



a) Yakın fay kaynaklı kesme kuvvetleri

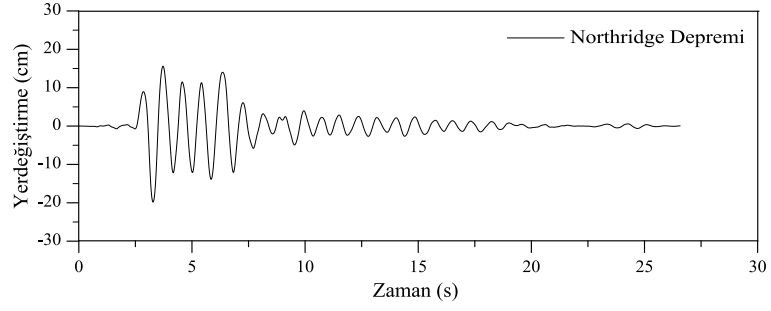
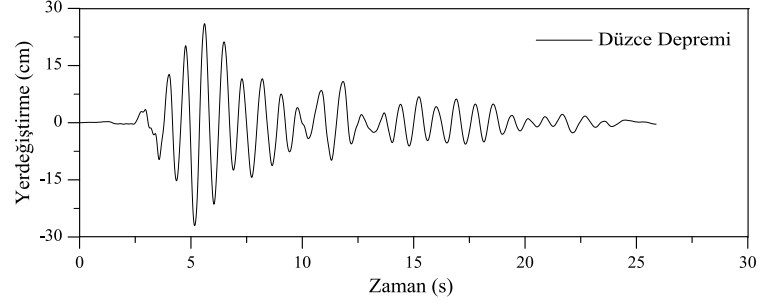


b) Uzak fay kaynaklı kesme kuvvetleri

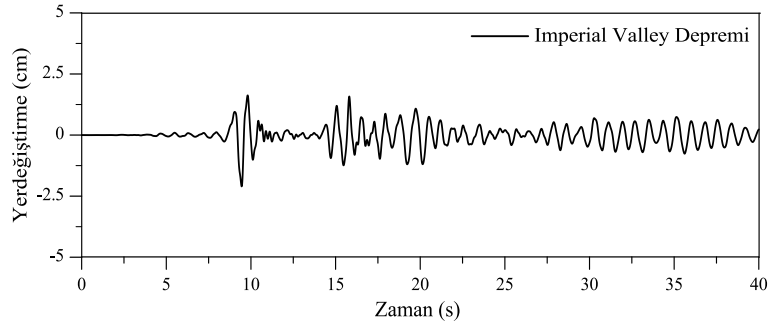
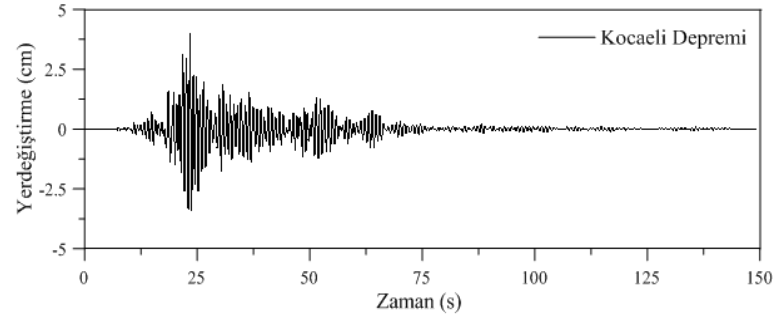
Şekil 2.17. Başlangıç modeline ait taban kesme kuvveti-zaman grafikleri

### 2.8.3. Yakın ve Uzak Fay Yer Hareketleri İçin Binanın İyileştirilmiş Modelinin Analizi

Binanın iyileştirilmiş modeli yakın ve uzak fay etkisi altında analiz edilmiş olup bu analiz sonucu en üst katta meydana gelen X eksenli doğrultusundaki yerdeğiştirme-zaman grafikleri Şekil 2.18’de verilmektedir.



#### a) Yakın fay kaynaklı yerdeğiştirmeler

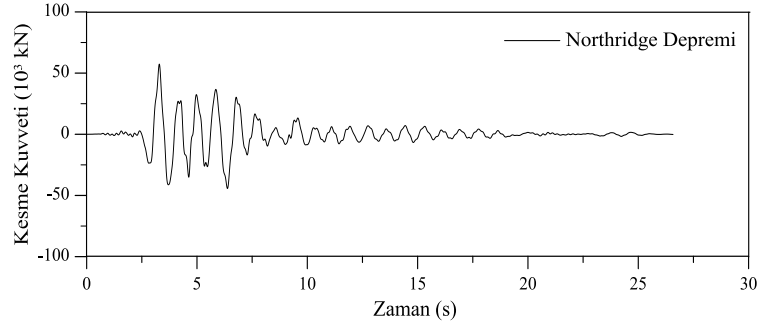
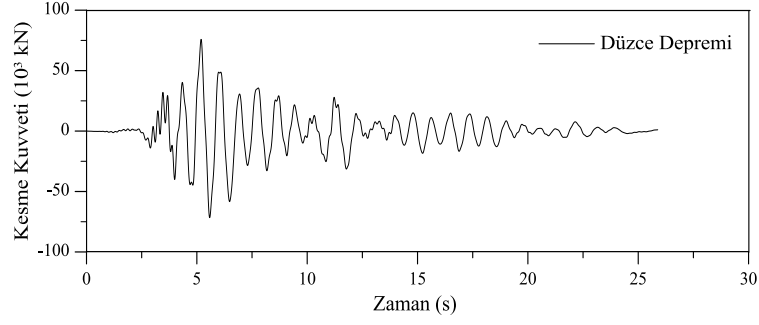


#### b) Uzak fay kaynaklı yerdeğiştirmeler

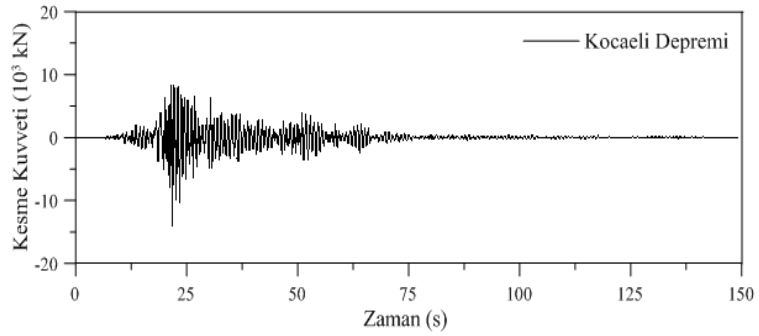
Şekil 2.18. İyileştirilmiş modele ait yerdeğiştirme-zaman grafikleri

Binanın mevcut durumunu daha iyi yansıtan iyileştirilmiş modele ait yerdeğiştirme miktarları, yakın ve uzak fay deprem etkileri altında başlangıç modeline göre daha büyük olarak elde edilmiştir.

Yakın ve uzak fay deprem hareketleri altında binanın iyileştirilmiş modeline ait X eksenini doğrultusundaki taban kesme kuvvetlerinin zamanla değişimini gösteren grafikler Şekil 2.19'da verilmektedir.



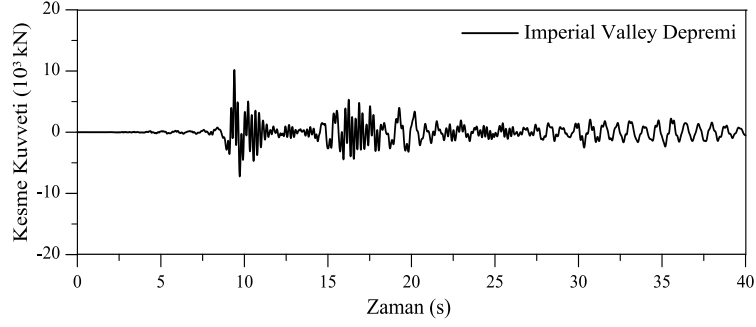
a) Yakın fay kaynaklı taban kesme kuvvetleri



b) Uzak fay kaynaklı taban kesme kuvvetleri

Şekil 2.19. İyileştirilmiş modele ait taban kesme kuvveti-zaman grafikleri

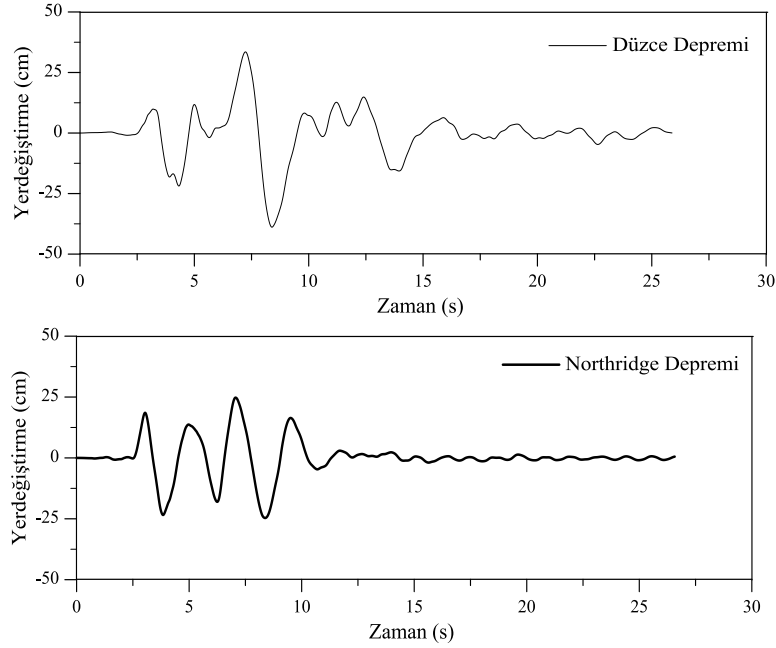
Şekil 2.19'un devamı



Şekil 2.19'dan yakın fay deprem etkisi altında iyileştirilmiş modelde meydana gelen taban kesme kuvveti değerlerinin başlangıç modeline göre daha büyük, uzak fay deprem etkisi altında ise daha küçük olduğu görülmüştür.

#### 2.8.4. Yakın ve Uzak Fay Yer Hareketleri İçin Binanın İzolatörlü Modelinin Analizi

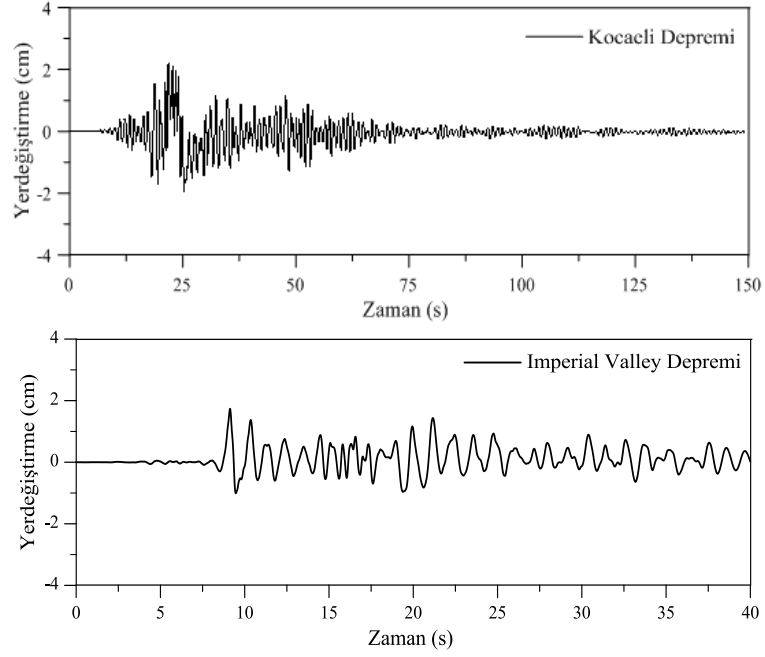
Binanın izolatörlü modeli yakın ve uzak fay etkisi altında analiz edilmiş olup bu analiz sonucu en üst katta meydana gelen X eksenli doğrultusundaki yerdeğiştirme-zaman grafikleri Şekil 2.20'de verilmektedir.



a) Yakın fay kaynaklı yerdeğiştirmeler

Şekil 2.20. İzolatörlü modele ait yerdeğiştirme-zaman grafikleri

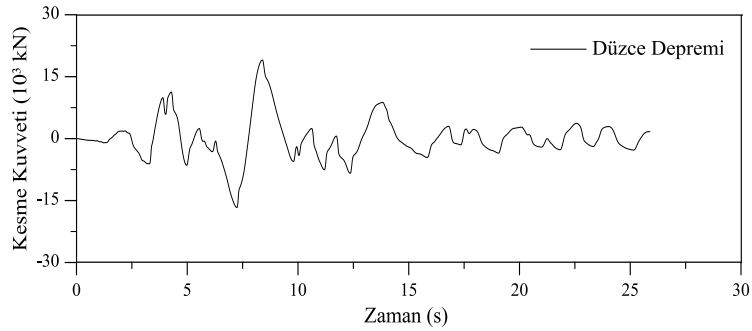
Şekil 2.20'nin devamı



b) Uzak fay kaynaklı yerdeğiştirmeler

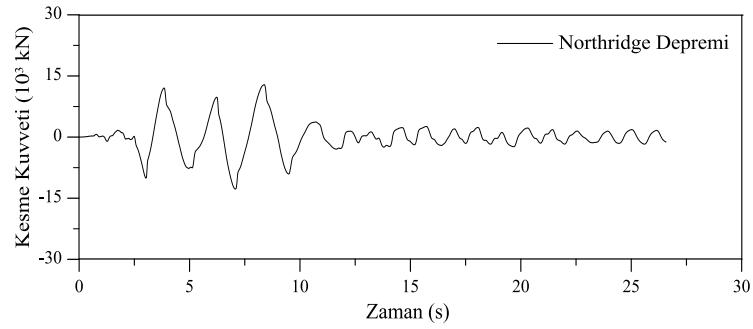
Binanın izolatörlü modeline ait yerdeğiştirme zaman grafiklerinden (Şekil 2.20) yakın fay etkisi altında izolatörsüz modellere (Şekil 2.16 ve Şekil 2.18) göre yerdeğiştirme kapasitesinin arttığı görülmüştür.

Yakın ve uzak fay deprem hareketleri altında binanın izolatörlü modeline ait X eksenini doğrultusundaki taban kesme kuvveti-zaman grafikleri Şekil 2.21'de verilmektedir.

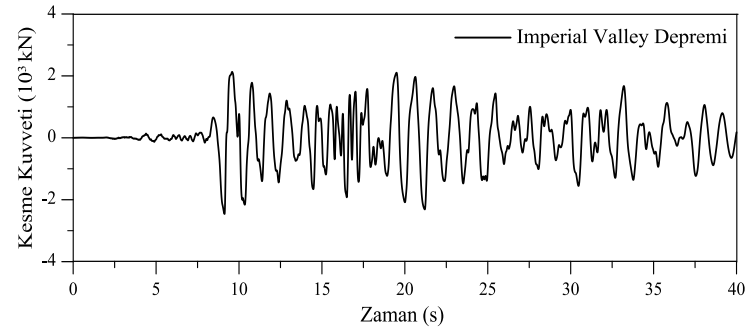
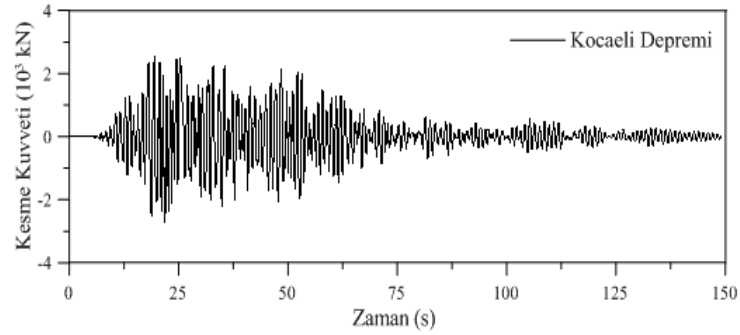


Şekil 2.21. İzolatörlü modele ait taban kesme kuvveti-zaman grafikleri

Şekil 2.21'in devamı



a) Yakın fay kaynaklı taban kesme kuvvetleri



b) Uzak fay kaynaklı taban kesme kuvvetleri

Şekil 2.21'den, izolatörlü modelde meydana gelen taban kesme kuvvetlerinin izolatörsüz modellerde meydana gelen taban kesme kuvvetlerine göre daha küçük olduğu görülmüştür.



### 2.8.5. Yakın ve Uzak Fay Yer Hareketleri İçin Sonuçların Karşılaştırılması

Modelin yakın ve uzak fay depremleri etkisi altında izolatörlü ve izolatörsüz durumuna ait en üst kattaki yerdeğiştirme ve taban kesme kuvveti değerlerindeki değişim Tablo 2.11’de gösterilmektedir.

Tablo 2.11. Yakın ve uzak fay deprem etkisi altında izolatörlü ve izolatörsüz modellerin yer değiştirme ve taban kesme kuvveti değerleri

	Doğrultu	Deprem	Model Türü		
			İzolatörsüz Model		İzolatörlü Model
			Başlangıç Modeli	İyileştirilmiş Model	
Yerdeğiştirme (cm)	X Ekseni	Düzce (1999)	13.21	27.02	38.87
		Northridge (1994)	10.20	19.80	24.74
		Kocaeli (1999)	3.64	3.99	2.23
		Imperial Valley (1979)	2.00	2.10	1.74
Taban Kesme Kuvveti (kN)	X Ekseni	Düzce (1999)	70 690	75 900	19 030
		Northridge (1994)	54 210	57 330	12 850
		Kocaeli (1999)	21 490	14 120	2 732
		Imperial Valley (1979)	14 820	10 120	2 449

Tablo 2.11’den de görüldüğü üzere özellikle yakın fay etkisi altında izolatörlü modelin yapmış olduğu yerdeğiştirme miktarı izolatörsüz modellere göre artmıştır. Bunun yanında izolatörlü modelin tabanında meydana gelen kesme kuvveti değerleri ise izolatörsüz modellere göre oldukça azalmıştır.

### 3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında çok katlı betonarme binaların dinamik karakteristikleri teorik ve deneysel olarak belirlenerek, yakın ve uzak fay yer hareketi etkisindeki izolatörlü ve izolatörsüz davranışlarının elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, ilk olarak seçilen çok katlı betonarme binanın dinamik karakteristiklerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ve Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılarak belirlenmesi ve binanın mevcut davranışlarını en iyi şekilde yansıtacak sonlu eleman modellerinin iyileştirilmesi işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra ise izolatörlerin dinamik karakteristiklerde yapmış olduğu değişimi incelemek adına model izolatörlü olarak oluşturularak izolatörlü ve izolatörsüz sonlu eleman modelleri üzerinde yakın ve uzak fay deprem etkisi incelenmiştir.

Uygulama olarak Giresun-Espiye’de bulunan 17 katlı betonarme bir bina seçilmiştir. Binanın üç boyutlu sonlu eleman modeli SAP2000 programı kullanılarak hem katı hem de çubuk ve düzlem elemanlar kullanılarak oluşturulmuş ve binanın modal analizleri yapılarak teorik dinamik karakteristikleri (mod şekilleri ve doğal frekansları) elde edilmiştir. Daha sonra bina üzerinde Operasyonel Modal Analiz Yöntemi uygulanmıştır. Deneysel yöntemde çevresel titreşim hareketlerinden (yaya hareketleri, rüzgar ve trafik yükleri vb.) yararlanılmıştır. Oluşturulan sonlu eleman modelinin binaya ait gerçek davranışları temsil edip etmediğinin kontrolü için deneysel ve teorik olarak elde edilen dinamik karakteristikler karşılaştırılmış ve aralarında farklılıklar olduğu görülmüştür. Sonuçlar arasındaki farklılıklar malzeme özellikleri ve sınır şartlarındaki belirsizlikler dikkate alınarak minimum düzeye indirilmiş ve binanın mevcut durumunu en iyi şekilde yansıtacak olan sonlu eleman modeli elde edilmiştir. Binanın depreme karşı dayanımını arttırmak ve izolatörlerin bina üzerindeki etkisinin araştırmak için modele izolatör yerleştirilerek dinamik karakteristikler belirlenmiştir. Son olarak başlangıç analitik modeli, iyileştirilmiş model ve izolatörlü model yakın ve uzak fay deprem etkisi altında analiz edilmiştir. Bu tez kapsamında yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar maddeler halinde aşağıda sunulmaktadır:

- Binanın modellenmesi sırasında katı elemanların kullanılmasının analiz süresini çok fazla arttırdığı görülmüş olup, elde edilen frekanslarda çubuk ve düzlem elemanlı modele göre % 5’lik bir fark olduğu gözlemlenmiştir.

- Binanın başlangıç modeli üzerindeki teorik modal analiz sonucunda elde edilen ilk yedi doğal frekansı 1.639-9.752Hz aralığında elde edilmiştir.
- Binanın başlangıç analitik modelinin ilk üç mod şekli sırasıyla burulma, boyuna ötelenme ve burulma şeklinde olduğu görülmüştür.
- Bina üzerinde gerçekleştirilen 30'ar dakikalık toplamda 2 saatlik Operasyonel Modal Analiz Yöntemi sonuçlarına göre Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma Yöntemi kullanılarak elde edilen ilk 7 doğal frekans değerinin 1.184-7.823Hz arasında, sönüm oranlarının ise %0.973–1.283 aralığında değerler aldıkları gözlemlenmiştir.
- Binanın teorik ve deneysel doğal frekans değerleri karşılaştırıldığında aralarındaki en büyük farkın %50'ye kadar çıktığı görülmüştür. Bu farklılıklardan dolayı bina modelinin iyileştirilmesi gerektiğine karar verilmiştir.
- Binanın teorik ve deneysel doğal frekansları arasında farklılık olduğu için binanın başlangıç analitik modeli sınır şartları ve malzeme elastisite modüllerindeki değişim dikkate alınarak iyileştirilmiştir.
- Binanın iyileştirilmiş analitik modeline ait ilk 7 doğal frekans değerleri 1.184-6.738Hz arasında değişmekte olup, deneysel ilk üç doğal frekans arasındaki fark %3.6'ya kadar düşürülmüştür.
- Binaya yerleştirilen izolatörler, binanın ilk periyodunu iyileştirilmiş modele göre yaklaşık 3 kat arttırmıştır.
- Yakın fay deprem hareketlerinin uzak fay deprem hareketlerine göre daha büyük ivme, hız ve yerdeğiştirme değerlerine sahip olduğu görülmüştür.
- Binaya uygulanan yakın fay deprem hareketlerinin uzak fay deprem hareketlerine göre daha büyük taban kesme kuvveti ve yerdeğiştirme meydana getirdiği görülmüştür.
- Binaya ait izolatörlü modelin, yakın fay etkisi altında izolatörsüz modellere göre daha fazla yerdeğiştirme kapasitesine sahip olduğu görülmüştür.
- Yakın ve uzak fay deprem etkisi altındaki izolatörlü ve izolatörsüz modellerin davranışından, izolatörlerin taban kesme kuvveti değerlerinde önemli bir azalma meydana getirdiği görülmüştür.
- İzolasyon sistemlerinin güçlü depremler altında daha iyi performans gösterdiği görülmüştür.

Bu tez çalışmasında birçok yapıda olduğu gibi çok katlı betonarme binaların dinamik karakteristiklerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle belirlenebileceği ve elde edilen bu veriler yardımıyla çok katlı binaların en iyi şekilde temsil edecek sonlu eleman modellerinin oluşturulabileceği görülmüştür. Bunun yanında çok katlı binalara uygulanan taban izolasyon sistemlerinin binaların depreme karşı dayanımlarını arttırdığı gözlenmiştir. Çok katlı binalarda uzak fay yer hareketi yanında yakın fay yer hareketi etkisinin de analizlerde göz önüne alınması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Elde edilen sonuçlardan yola çıkarak bundan sonra yapılacak çalışmalar için aşağıda bazı öneriler verilmektedir:

- Deneysel ölçüm sonuçları kullanılarak bina üzerinde hasar tespit çalışmaları yapılabilir.
- Çok katlı binalar üzerinde OMA Yöntemine dayalı birçok ölçüm gerçekleştirilerek, bu binalar için basitleştirilmiş frekans formülleri elde edilebilir.
- Farklı yüksekliklere sahip çok katlı binalarda frekans ve sönüm oranlarının yükseklikle değişimi incelenebilir.
- Az katlı ve çok katlı binalara uygulanan taban izolasyonlarının binaların üzerindeki etkisi araştırılabilir.
- Farklı tipte izolasyon sistemlerinin çok katlı binaların davranışı üzerindeki etkisi incelenebilir.
- Yakın ve uzak fay yer hareketleri ölçeklendirilerek, bir çok kayıt için çok katlı binaların davranışı araştırılabilir.

#### 4. KAYNAKLAR

- Akgöner, A., 2005. Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı ve Onarım-Güçlendirme Tekniklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Altunışık, A.C., 2010. Karayolu Köprülerinin Yapısal Davranışlarının Analitik ve Deneysel Yöntemlerle Belirlenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Anderson J.C.ve Bertero V.V., 1987. Uncertainties in Establishing Design Earthquake. Journal of Structural Engineering, ASCE; 113, 8, 1709-24.
- Au, S.K., Zhang, F.L. ve To, P., 2012. Field Observations on Modal Properties of Two Tall Buildings under Strong Wind, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 101, 12-23.
- Bertero, V.V., Mahin, S.A. ve Herrera, R.A., 1978. A Seismic Design Implications of San Fernando Earthquake Records. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 6, 1, 31-42.
- Bendat, J.S. ve Piersol, A.G., 2004. Random Data: Analysis and Measurement Procedures, 3th Edition, John Wiley and Sons, USA.
- Birinci, F., 2010. Taş Kemer Köprülerin Sonlu Eleman Modellerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Bisch, P., 1993, Base Isolation: Principles and Applications, Proceedings of the 17th Regional European Seminar on Earthquake Engineering, Haifa, Israel, September, 327-347.
- Brincker, R., Zhang, L. ve Andersen, P., 2000. Modal Identification from Ambient Responses using Frequency Domain Decomposition, 18th International Modal Analysis Conference, San Antonio, USA, 4062, 2, 625-630.
- Ceccoli, C., Mazzotti C. ve Savoia, M., 1999. Non-Linear Seismic of Base Isolated RC Frame Structures, Earthquake Engineerings and Structural Dynamics, 28, 633-653.
- Celep, Z., ve Kumbasar, N., 2004. Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı, İstanbul.
- Chassiakos, A.G., Masri, S.F., Nayeri, R.D., Caffrey, J.P., Tzong, G., ve Chen, H.P., 2007. Use of Vibration Monitoring Data to Track Structural Changes in a Retrofitted Building. Structural Control and Health Monitoring, 14,2, 218-238.

- Chopra, A., K., 1995. Dynamics of Structures, Prentice Hall International, Inc., Toronto.
- Chopra, A., K., 2006. Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering, Third Edition, Prentice Hall, USA, 4th Edition, 995.
- Constantinou, M.C., Mokha, A. ve Reinhorn, A.M., 1990a. Teflon Bearing in Base Isolation I: Modeling, Journal of Structural Engineering, ASCE, 116, 455-474.
- Constantinou, M.C., Mokha, A. ve Reinhorn, A.M., 1990b. Teflon Bearing in Base Isolation II: Modeling, Journal of Structural Engineering, ASCE, 116, 455-474.
- Cox, K.E. ve Asford, S.A., 2002. Characterization of Large Velocity Pulses for Laboratory Testing, Peer Report,22, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California.
- Dönmez, S., 2006. Deprem Etkisinde Betonarme Binalarda Hasarın Oluşmasında Dolgu Duvarların Modellenmesi ve Taşıyıcı Sisteme Katkısı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Gökhan, E., 2009. Betonarme Yapılarda İzolatör Kullanımının Taşıyıcı Sistem Davranışına Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Güneş, N., 2009. Yakın Fay Yer Hareketleri ve Performansa Dayalı Tasarıma Uyarlanmaları, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Hall, J.F., Heaton, T.H., Halling, M.W. ve Wald D.J., 1995. Near-source Ground Motion and Its Effects on Flexible Buildings. Earthquake Spectra, 11, 4, 569-605.
- Hamidi, M. El Naggari, M. H. ve Vafai, A., 2003. Response of Structures Supported on SCF Isolation Systems, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 32, 1555-1584.
- Higashino, M., Aizawa, S., Yamamoto, M. ve Toyama, K., 1998. Application of Active Mass Damper (AMD) System, and Earthquake and Wind Observation Results, Proceedings of the Second World Conference on Structural Control, Kyoto, Japan, June-July, 785-794.
- Jacobsen, N.J., Andersen, P. ve Brincker, R., 2006. Using Enhanced Frequency Domain Decomposition as a Robust Technique to Harmonic Excitation in Operational Modal Analysis, Proceedings of ISMA2006: International Conference on Noise and Vibration Engineering, Leuven, Belgium.
- Jangid, R.S. ve Datta, T.K., 1995. Seismic Behaviour of Base-Isolated Buildings: A State of Art Review, Proc. Instn Civ. Engrs Structstand Bldgs, 110, 186-203.
- Jangid, R.S., 1997. Response of Pure-Friction Sliding Structures to Bi-Directional Harmonic Ground Motion, Engineering Structures, 19, 2, 97-104.

- Kamanlı, M., Öztürk, B.K., Demir, S. ve Demiröz, A., 2012. Taban İzolasyon Sistemlerinin Betonarme Bir Binaya Uygulanması ve Maliyet Analizi, Selçuk Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 27, 2, 47-60.
- Kelly, J.M., 1991. Base Isolation: Origins and Development, Earthquake Engineering Research Center News, 12, 1.
- Kelly J.M. ve Naeim, F., 1999. Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice, John Wiley & Sons Inc., Canada.
- Li, Q.S., Wu, J.R., Liang, S.G., Xiao, Y.Q., ve Wong, C.K., 2004. Full-Scale Measurements and Numerical Evaluation of Wind-Induced Vibration of a 63-Story Reinforced Concrete Tall Building, Engineering Structures, 26, 12, 1779-1794.
- Liao, W., Loh, C.H. ve Lee, B.H., 2004. Comparison of Dynamic Response of Isolated and Non-Isolated Continuous Girder Bridges Subjected to Near-Fault Ground Motions, Engineering Structures, 26, 2173-2183.
- Lord, J.F. ve Ventura, C.E., 2002. Measured and Calculated Modal Characteristics of a 48-Story Tuned Mass System Building in Vancouver, International Modal Analysis Conference-XX: A Conference on Structural Dynamics, Society for Experimental Mechanics, Los Angeles, CA, USA, 2, 1210-1215.
- Malhotra, P.K., 1999. Response of Buildings to Near-Field Pulse-Like Ground Motions, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 28 ,1309-1326.
- Mokha, A.S., Constantinou, M.C. ve Reinhorn, A.M., 1990a. Teflon Bearings in Base Isolation I: Testing. Journal of Structural Engineering, 116, 2, 438-454.
- Mokha, A.S., Constantinou, M.C. ve Reinhorn, A.M., 1990b. Experimental Study and Analytical Prediction of Earthquake Responce of a Sliding Isolation System with Spherical Surface. Technical Report NCEER-90-0020, State University of New York at Buffalo.
- Mostaghel, N. ve Khodaverdian, M., 1987. Seismic Response Structures Suppoerted on RFBI System, Earthquake Engineerings and Structural Dynamics, 15, 3, 379-390.
- OMA, 2006. Operational Modal Analysis, Release 4.0. Structural Vibration Solution A/S, Denmark.
- Pekgökgöz, R.K., Gürel, M.A., Kömür, M. ve Çılı, F., 2007. Cost Analysis of a Building With Seismic Base Isolation System, Journal of Engineering and Natural Sciences, 25, 3, 236-246.
- Peeters, B., 2000. System Identification and Damage Detection in Civil Engineering, PhD Thesis, Katholieke University, Leuven, Belgium.
- Petyt, M., 1990. Introduction to Finite Element Vibration Analysis, Cambridge University Pres, Cambridge.

- PULSE, 2006. Analyzers and Solutions, Release 11.2. Bruel and Kjaer, Sound and Vibration Measurement A/S, Denmark.
- Ramos, J.L.F.S., 2007. Damage Identification on Masonry Structures Based on Vibration Signatures, PhD Dissertation, Minho University, Portugal.
- SAP2000, 2008. Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures, Computers and Structures, Inc., Berkeley, California, USA.
- Shi, W., Shan, J. ve Lu, X., 2012. Modal identification of Shanghai World Financial Center both from Free and Ambient Vibration Response. Engineering Structures, 36, 14-26.
- Skinner, R.I., Kelly, J.M. ve Heine, A.J., 1975. Hysteretic Dampers for Earthquake Resistance Structures, Earthquake Engineerings and Structural Dynamics, 3, 287-296.
- Somerville, P.G., 2002. Characterizing Near Fault Ground Motion for the Design and Evaluation of Bridges, Third National Conference and Workshop on Bridges and Highways. Portland, Oregon.
- Su, L., Ahmadi, G. ve Tadjbakhsh, I.G., 1989a. A Comparative Study of Performances of Various Base Isolation Systems, Part I: Shear Beam Structures, Earthquake Engineerings and Structural Dynamics, 18, 1, 11-32.
- Su, L., Ahmadi, G. ve Tadjbakhsh, I.G., 1989b. Performance of Sliding Resilient-Friction Base Isolation System, Journal of Structural Engineering, 117, 165-181.
- Şahin, A., 2009. Yapıların Deneysel ve Operasyonel Modal Analizleri İçin Sayısal Sinyal İşleme, Dinamik Karakteristik Belirleme ve Sonlu Eleman Model İyileştirme Yazılımları: SignalCAD-ModalCAD-FemUP, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Tezcan, S.S. ve Cimilli, S., 2002. Seismic Base Isolation, Yüksek Öğrenim Eğitim ve Araştırma Vakfı, 99.
- Thibert, K., Ventura, C.E., Turek, M., ve Guerrero, S., 2007. Dynamic Soil-Structure Interaction Study of a Reinforced Concrete High-Rise Building. In Procs. of the 2nd International Operational Modal Analysis Conference (IOMAC), Copenhagen, Denmark.
- Türker, T., 2005a. Çelik Çerçeve Sistemlerin Dinamik Karakteristiklerinin Deneysel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Türker, H., 2005b. Sismik İzolasyon Sistemlerinin Kullanış Tipleri Örnek Bir Maliyet Analizi, Deprem Sempozyumu, Kocaeli, Türkiye, Bildiriler Kitabı, 538-545.



- Türker, T., 2011. Çevresel Titreşim Verileri Kullanılarak Yapıların Hasar Durumlarının Tespiti ve Değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Ventura, C.E., Lord, J.F., Turek, M., Brincker, R., Andersen, P., ve Dascotte, E., 2005. FEM Updating of Tall Buildings Using Ambient Vibration Data. in Proceedings of the Sixth European Conference on Structural Dynamics, 4-7.
- Ventura, C.E. ve Thibert, K.M., 2007. Dynamic Properties of a 32-Storey Building Determined from Different Analysis Methods of Ambient Vibration Test Data. In Proceedings of The Second International Operational Modal Analysis Conference, Copenhagen, Denmark, 557-564.
- Yurdakul, M. ve Ateş, Ş., 2010. Modeling of Triple Concave Friction Pendulum in SAP2000 for Isolation of Buildings, 9th International Congress on Advances in Civil Engineering, September, Karadeniz Technical University, Trabzon, Abstrack Book: 300.
- Yurdakul, M., 2011. Üç Eğrilikli Sürtünmeli Sarkaç Mesnetli Yapıların Dinamik Davranışına Zemin Eğilebilirliğinin Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Zayas, V.A., Low, S.S., Mahin, S.A. ve Bozzo L., 1989. Feasibility and Performance Studies on Improving the Eartquake Resistance of New Existing Building Using the Friction Pendulum System, Report No:UCB/EERC 89-09, University of California, Berkeley.
- Zayas, V., Low, S.S. ve Mahin, S.A., 1990. A Simple Pendulum Technique for Achieving Seismic Isolation, Earthquake Spectra, 6, 2, 317-333.
- Zhou, Y., Yi, W.J., 2008. Ambient Vibration Measurement And Earthquake Resistant Behavior Analysis on a Two tower Tall Building with Enlarged Base. The 14 th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China.
- Wu, J. R., Li, Q. S., 2004. Finite Element Model Updating for a High-Rise Structure Based on Ambient Vibration Measurements, Engineering Structures, 26, 7, 979-990.
- URL\_1,<http://www.vibratek.com.tr/TR/Genel/BelgeGoster.aspx?F6E10F8892433CFAAA F6AA849816B2EF157DD6E0CF8B4E79>. 01 Eylül 2014.
- URL\_2,<http://www.rmc.com.tr/darbe-cekicleri/>. 01 Eylül 2014.
- URL\_3,<http://www.docstoc.com/docs/159460003/Piezoelectric-Accelerometers-Theory-and-Application-MMF-Metra>. 01 Eylül 2014.
- URL\_4,[http://www.industrial-electronics.com/DAQ/industrial\\_electronics/input\\_devices\\_sensors\\_transducers\\_transmitters\\_measurement/Accelerometers.html](http://www.industrial-electronics.com/DAQ/industrial_electronics/input_devices_sensors_transducers_transmitters_measurement/Accelerometers.html). 03 Eylül 2014.
- URL\_5, <http://www.e-kutuphane.imo.org.tr/pdf/15725.pdf>. 6 Ekim 2014.
- URL\_6,<http://peer.berkeley.edu/smcat/search.html>. 29 Temmuz 2014.

## ÖZGEÇMİŞ

Betül DEMİRTAŞ, 1988 yılında Trabzon ilinin Of ilçesinde doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Of'ta tamamladı. 2007 yılında başlamış olduğu Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümün'den 2011 yılında mezun oldu. Aynı yıl K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsünde yüksek lisans öğrenimine başladı. Eylül 2012'de Bayburt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Anabilim Dalında Araştırma Görevlisi olarak atandı. Nisan 2014'ten itibaren ÖYP araştırma görevlisi olarak Karadeniz Teknik Üniversitesi'nde çalışmaktadır. Bekar olan Betül DEMİRTAŞ, iyi derecede İngilizce bilmektedir.