

**ORTAK YALITIM DÜZLEMİNDE BULUNAN
SİSMİK YALITIMLI İKİ BAĞIMSIZ YAPININ
KAPSAMLI PARAMETRİK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mücahit BEKİN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2018

**ORTAK YALITIM DÜZLEMİNDE BULUNAN
SİSMİK YALITIMLI İKİ BAĞIMSIZ YAPININ
KAPSAMLI PARAMETRİK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Mücahit BEKİN
(501151035)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Barış ERKUŞ

HAZİRAN 2018

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501151035 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Mücahit BEKİN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “ORTAK YALITIM DÜZLEMİNDE BULUNAN SİSMİK YALITIMLI İKİ BAĞIMSIZ YAPININ KAPSAMLI PARAMETRİK İNCELENMESİ” başlıklı tezini aşağıdaki imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Dr. Öğr. Üyesi Barış ERKUŞ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Dr. Öğr. Üyesi Barlas Özden ÇAĞLAYAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Canan GİRGİN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **04 Mayıs 2018**
Savunma Tarihi : **07 Haziran 2018**

Aileme,

ÖNSÖZ

Tez çalışmamın tüm süreçlerinde bana kıymetli vaktini ayıran, çalışmam boyunca engin bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım değerli danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Barış ERKUŞ'a sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum. Kendisinin ilgi, özveri ve desteği sayesinde çalışmam nihayetlenmiştir.

Yüksek lisans hayatım boyunca her zaman yanımda olan ve her türlü desteğini esirgemeyerek beni yalnız bırakmayan kıymetli hocalarım Dr. Öğr. Üyesi Barlas Özden ÇAĞLAYAN ve Dr. Öğr. Üyesi Pınar Özdemir ÇAĞLAYAN'a içtenlikle teşekkür ederim.

Tez jürimde olmayı kabul ederek değerli vaktini ayıran Prof. Dr. Canan GİRGİN'e çok teşekkür ederim.

Profesyonel mühendislik hayatımda kıymetli bilgilerini benimle paylaşan ve yüksek lisans çalışmam boyunca beni her zaman destekleyen Dr. Mehmet Burak YILMAZ'a minnettarım.

Lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca kendilerinden ders aldığım tüm hocalarıma bana kattığı değerler için teşekkürlerimi sunarım.

Desteğini ve ilgisini benden esirgemeyen, her sıkıntıda yanımda olan ablam Ceyda ERDOĞAN ile eniştem İlke Can ERDOĞAN'a ve varlığıyla her daim mutluluk kaynağım olan yeğenim Çınar ERDOĞAN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmam boyunca kahrımı çeken, bana gösterdiği ilgi ve alaka sayesinde çalışma motivasyonu bulabildiğim kıymetli meslektaşım Büşra ÇAYIR'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 2018

Mücahit BEKİN
İnşaat Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR.....	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xvii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xix
ÖZET	xxiii
SUMMARY	xxv
1. GİRİŞ	1
1.1 Sismik Yalıtımlı Yapılar	1
1.2 Sismik Yalıtımlı Yapıların Tasarımı	4
1.2.1 Sismik yalıtımlı yapıların tasarım yöntemlerinin irdelenmesi	5
1.2.2 Eşdeğer doğrusal analiz.....	6
1.2.3 Mod birleştirme yöntemi	7
1.3 Sismik Yalıtımlı Yapıların Doğrusal Olmayan Çözümleme Yöntemleri	9
1.4 Sismik Yalıtımlı Yapı Düzenlemesi.....	12
1.5 Ortak yalıtım düzleminde bulunan yapılar	12
1.6 Problemin Tanımı	14
1.7 Çalışmanın Kapsamı.....	15
1.8 Çalışmanın İçeriği	16
2. TEORİK ALTYAPI	19
2.1 Giriş	19
2.2 Sismik Yalıtımlı Tek Yapılı Sistemlere Ait Hareket Denklemleri.....	19
2.3 Sismik Yalıtımlı Çok Yapılı Sistemlere Ait Hareket Denklemleri	23
2.4 Hareket Denklemlerinin Doğrusal Olmayan Çözüm Yöntemi	27
2.5 Yapısal Sönüm Modeli	30
2.5.1 Üst yapı sönüm modeli.....	30
2.5.2 Histeretik sönümün eşdeğer sönüme çevrilmesi	30
2.6 Sismik Yalıtımlı Yapıların Eşdeğer Doğrusal Analiz Yöntemi	32
3. SİSMİK YALITIMLI İKİ YAPILI SİSTEMLERİN PARAMETRİK İNCELENMESİ	37
3.1 Giriş	37
3.2 İncelenen Yapıların Özellikleri.....	37
3.3 Deprem Kayıtlarının Seçilmesi	39
3.4 Sismik Yalıtımlı Tek Yapıların Analizi ve Doğrulanması	40
3.4.1 Tek serbestlik dereceli sönümsüz sistem.....	41
3.4.2 Çok serbestlik dereceli sönümsüz sistem	42

3.4.3 Çok serbestlik dereceli sönümlü sistem	44
3.5 Ortak Yalıtım Düzleminde Bulunan İkili Yapıların Analizi ve Doğrulanması	46
3.6 Ortak Yalıtım Düzleminde Bulunan İkili Yapıların İncelenmesi	50
3.6.1 Analiz prosedürü	50
3.6.2 Kesme kuvveti katsayılarının irdelenmesi.....	55
3.6.3 Kat kesme kuvvetlerinin irdelenmesi	66
3.6.4 Kat ivmelerinin irdelenmesi	70
3.6.5 Görelî kat ötelemelerinin irdelenmesi	73
3.6.6 Deprem derz mesafelerinin irdelenmesi	76
3.7 Ortak Yalıtım Düzleminde Bulunan İki'den Fazla Yapıların İncelenmesi	78
3.7.1 Ortak yalıtım düzleminde bulunan üç bağımsız yapının incelenmesi	78
3.7.2 Ortak yalıtım düzleminde bulunan dört bağımsız yapının incelenmesi .	84
4. SONUÇ VE ÖNERİLER	91
KAYNAKLAR.....	95
ÖZGEÇMİŞ	99

KISALTMALAR

AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials
ASCE	: American Society of Civil Engineers
CALTRANS	: California Department of Transportation
DBYBHY	: Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik
FEMA	: Federal Emergency Management Agency
PEER	: Pacific Earthquake Engineering Research Center
SEI	: Structural Engineering Institute
TBDY	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği

SEMBOLLER

a	: Denklem 2.68’da belirtilen istatistiksel parametre
a_0	: Rayleigh sönüm matrisi için kütle matrisi çarpanı
a_1	: Rayleigh sönüm matrisi için rijitlik matrisi çarpanı
C	: Sismik yalıtım sistemi sönüm matrisi
C_b	: Yalıtım birimi sönüm matrisi
c_i	: i. katın sönümü
$c_{i,j}$	: Ortak yalıtım düzlemindeki i. yapının j. katının sönümü
$C_{iso,o}$	: Ortak yalıtım düzlemindeki yapıların izolatör seviyesindeki kesme kuvvetinin üst yapı ve yalıtım düzlemi kütleleri toplamına bölünerek elde edilen kesme kuvveti katsayısı
$C_{iso,o,err}$	: Ortak yalıtım düzlemindeki yapıların izolatör seviyesindeki kesme kuvveti katsayısının toplam kesme kuvveti katsayısına göre bağlı hatası
$C_{o,1}$	: Ortak yalıtım düzlemindeki 1. yapının taban kesme kuvvetinin üst yapı kütlelerine bölünerek elde edilen kesme kuvveti katsayısı
$C_{o,2}$	: Ortak yalıtım düzlemindeki 2. yapının taban kesme kuvvetinin üst yapı kütlelerine bölünerek elde edilen kesme kuvveti katsayısı
$C_{o,1,err}$	: Ortak yalıtım düzlemindeki 1. yapı taban kesme kuvveti katsayısının toplam kesme kuvveti katsayısına göre bağlı hatası
C_s	: Üst yapı sönüm matrisi
$C_{s,i}$	: Ortak yalıtım düzlemindeki i. yapının sönüm matrisi
C_t	: Ortak yalıtım düzlemindeki 1. ve 2. yapının taban kesme kuvvetlerinin vektörel toplamının üst yapı kütlelerine bölünerek elde edilen toplam kesme kuvveti katsayısı
$C_{t,err}$	: Ortak yalıtım düzlemindeki 1. ve 2. yapıların taban kesme kuvveti katsayılarının toplamının toplam kesme kuvveti katsayısına göre bağlı hatası
D_D	: Yalıtım birimleri tasarım deplasmanı
E_c	: Betonarme elastisite modülü
E_D	: Histeretik davranışın bir çevriminde sönmölenen enerji
E_{So}	: Şekil değıştirme enerjisi
F_{iso}	: Yalıtım birimlerinde oluşan kesme kuvveti vektörü
F_{iso}^{NL}	: Yalıtım birimlerinin doğrusal olmayan yay kuvvet vektörü
$F_{iso,b,1}$	: Bağımsız yalıtım düzlemindeki 1. yapının izolatör seviyesindeki kesme kuvveti
$F_{iso,b,2}$	: Bağımsız yalıtım düzlemindeki 2. yapının izolatör seviyesindeki kesme kuvveti
$F_{iso,o}$	: Ortak yalıtım düzlemindeki yapıların izolatör seviyesindeki kesme kuvveti
f_j	: j. kat düzlemine ait deprem kuvveti
f_{max}	: Sismik yalıtım birimi en büyük kuvveti

F_s	: Üst yapı taban kesme kuvvetinin yalıtım düzleminde oluşturduğu tepki kuvveti
F_s	: i zaman adımı için kuvvet fonksiyonu vektörü
$F_{s,b,1}$	: Bağımsız yalıtım düzlemindeki 1. yapının taban kesme kuvveti
$F_{s,b,2}$	: Bağımsız yalıtım düzlemindeki 2. yapının taban kesme kuvveti
$F_{s,i}$	: Ortak yalıtım düzlemindeki i . yapının taban kesme kuvvetinin yalıtım düzleminde oluşturduğu tepki kuvveti
$F_{s,o,1}$	: Ortak yalıtım düzlemindeki 1. yapının taban kesme kuvveti
$F_{s,o,2}$	: Ortak yalıtım düzlemindeki 2. yapının taban kesme kuvveti
F_x	: Sismik yalıtımlı yapı taban kesme kuvvetinin x seviyesindeki payı
f_y	: Sismik yalıtım birimi akma kuvveti
h	: Kat yüksekliği
h_i	: i . kat yüksekliği
I	: Atalet momenti
K	: Sismik yalıtım sistemi rijitlik matrisi
k_1	: Sismik yalıtım birimi birincil rijitliği
k_2	: Sismik yalıtım birimi ikincil rijitliği
K_b	: Yalıtım birimi rijitlik matrisi
k_{bi}	: Atalet kuvveti dağıtım katsayısı
k_{Dmax}	: En büyük eşdeğer rijitlik
k_{eff}	: Sismik yalıtım birimi sekant rijitliği
k_i	: i . katın rijitliği
$k_{i,j}$	: Ortak yalıtım düzlemindeki i . yapının j . katının rijitliği
K_s	: Üst yapı rijitlik matrisi
$K_{s,i}$	: Ortak yalıtım düzlemindeki i . yapının rijitlik matrisi
$K_{T,i}^j$	: i zaman adımı ve j iterasyonu için teğetsel rijitlik matrisi
M	: Sismik yalıtım sistemi kütle matrisi
M_b	: Yalıtım düzlemi kütle matrisi
m_i	: i . katın kütlesi
$m_{i,j}$	: Ortak yalıtım düzlemindeki i . yapının j . katının kütlesi
M_s	: Üst yapı kütle matrisi
$M_{s,b,1}$	: Bağımsız yalıtım düzlemindeki 1. yapının kütlesi
$M_{s,b,2}$	: Bağımsız yalıtım düzlemindeki 2. yapının kütlesi
$M_{s,i}$	: Ortak yalıtım düzlemindeki i . yapının kütle matrisi
$M_{s,o,1}$	: Ortak yalıtım düzlemindeki 1. yapının kütlesi
$M_{s,o,2}$	: Ortak yalıtım düzlemindeki 2. yapının kütlesi
P	: Deprem kuvvet vektörü
Q	: Karakteristik dayanım
R	: Deprem etki vektörü
R	: Taşıyıcı sistem davranış katsayısı
R^T	: Deprem etki vektörünün transpozu
R_1	: Taşıyıcı sistem davranış katsayısı
R_i	: Ortak yalıtım düzlemindeki i . yapının deprem etki vektörü
R_i^T	: Ortak yalıtım düzlemindeki i . yapının deprem etki vektörünün transpozu
S_1	: Etki vektörü
S_{ae}	: Elastik spektral ivme
$S_{ae}^{DD-1}(T_M)$	: En büyük deprem yer hareketi seviyesinde T_M periyodundaki spektral ivme [g]

T_{eff}	: Sismik yalıtım birimi sekant rijitliği ile belirlenen yalıtım periyodu
T_{iso}	: Sismik yalıtım birimi birincil rijitliği ile belirlenen yalıtım periyodu
T_S	: Yalıtım birimleri üzerindeki sistemin periyodu
t	: Nümerik integrasyon zaman adımı
$u_g(t)$	: Zemin yer değiştirmesi
u_{iso}	: Yalıtım birimi yer değiştirmesi
u_{max}	: Sismik yalıtım birimi en büyük yer değiştirmesi
u_y	: Sismik yalıtım birimi akma yer değiştirmesi
V_b	: Yalıtım seviyesinde meydana gelen kesme kuvveti
V_M	: Sismik yalıtımlı yapı taban kesme kuvveti
V_s	: Sismik yalıtımlı yapı taban kesme kuvveti
V_{st}	: Sismik yalıtımlı yapı taban kesme kuvveti
W	: Yalıtım birimleri üzerinde bulunan yapı ağırlığı
w_i	: i. kat kütlesi
W_s	: Üst yapı ağırlığı
$W_{s,b,1}$	: Bağımsız yalıtım düzlemindeki 1. yapının ağırlığı
$W_{s,b,2}$	: Bağımsız yalıtım düzlemindeki 2. yapının ağırlığı
$W_{s,o,1}$	: Ortak yalıtım düzlemindeki 1. yapının ağırlığı
$W_{s,o,2}$	: Ortak yalıtım düzlemindeki 2. yapının ağırlığı
w_x	: Yalıtım birimleri üzerinde bulunan yapı ağırlığının x seviyesindeki payı
x	: Sismik yalıtım sistemi yer değiştirme vektörü
$\dot{x}$	: Sismik yalıtım sistemi hız vektörü
$\ddot{x}$	: Sismik yalıtım sistemi ivme vektörü
x^b	: Üst yapının yalıtım düzlemine göre bağıl yer değiştirme vektörü
$\dot{x}^b$	: Üst yapının yalıtım düzlemine göre bağıl hız vektörü
$\ddot{x}^b$	: Üst yapının yalıtım düzlemine göre bağıl ivme vektörü
$\ddot{x}_b^{abs}$	: Yalıtım düzleminin mutlak ivme vektörü
x_b^g	: Yalıtım düzleminin zemine göre bağıl yer değiştirme vektörü
$\dot{x}_b^g$	: Yalıtım düzleminin zemine göre bağıl hız vektörü
$\ddot{x}_b^g$	: Yalıtım düzleminin zemine göre bağıl ivme vektörü
$x_{b,1}^b$	: Bağımsız yalıtım düzlemindeki 1. yapının yalıtım düzlemine göre bağıl yer değiştirmesi
$x_{b,2}^b$	: Bağımsız yalıtım düzlemindeki 2. yapının yalıtım düzlemine göre bağıl yer değiştirmesi
$\ddot{x}_g^{abs}$	: Yer ivmesi vektörü
x_i	: i zaman adımı için yer değiştirme vektörü
$\dot{x}_i$	: i zaman adımı için hız vektörü
$\ddot{x}_i$	: i zaman adımı için ivme vektörü
x_i^{abs}	: i. katın mutlak yer değiştirme vektörü
$\dot{x}_i^{abs}$	: i. katın mutlak hız vektörü
$\ddot{x}_i^{abs}$	: i. katın mutlak ivme vektörü
x_i^b	: i. katın yalıtım düzlemine göre bağıl yer değiştirmesi
$\dot{x}_i^b$	: i. katın yalıtım düzlemine göre bağıl hızı
$\ddot{x}_i^b$	: i. katın yalıtım düzlemine göre bağıl ivmesi

$x_{i,j}^b$	: Ortak yalıtım düzlemindeki i. yapının j. katının yalıtım düzlemine göre bağlı yer değiştirme
$\dot{x}_{i,j}^b$	: Ortak yalıtım düzlemindeki i. yapının j. katının yalıtım düzlemine göre bağlı hızı
$\ddot{x}_{i,j}^b$	: Ortak yalıtım düzlemindeki i. yapının j. katının yalıtım düzlemine göre bağlı ivmesi
$x_{i,j}^b$	: Ortak yalıtım düzlemindeki i. yapının yalıtım düzlemine göre bağlı yer değiştirme vektörü
$\dot{x}_{i,j}^b$	: Ortak yalıtım düzlemindeki i. yapının yalıtım düzlemine göre bağlı hız vektörü
$\ddot{x}_{i,j}^b$	: Ortak yalıtım düzlemindeki i. yapının yalıtım düzlemine göre bağlı ivme vektörü
$x_{o,1}^b$	: Ortak yalıtım düzlemindeki 1. yapının yalıtım düzlemine göre bağlı yer değiştirme
$x_{o,2}^b$	: Ortak yalıtım düzlemindeki 2. yapının yalıtım düzlemine göre bağlı yer değiştirme
β	: Newmark integrasyon sabiti
β_D	: Tasarım depremi yer hareketi seviyesinde yalıtım birimi eşdeğer sönüm oranı
γ	: Newmark integrasyon sabiti
$\delta_{s,b,1}^b$	: Bağımsız yalıtım düzlemindeki 1. yapının yalıtım düzlemine göre bağlı kat ötelemesi
$\delta_{s,o,1}^b$	: Ortak yalıtım düzlemindeki 1. yapının yalıtım düzlemine göre bağlı kat ötelemesi
$\Delta F_{s,i}$	: i zaman adımı için artımsal kuvvet fonksiyonu vektörü
$\Delta F_{s,i}^{fictive,j}$	: i zaman adımı ve j iterasyonu için fiktif iç kuvvet
$\Delta F_{s,i}^{int,j}$	: i zaman adımı ve j iterasyonu için içsel kuvvet
$\Delta F_{s,i}^{res,j}$	: i zaman adımı ve j iterasyonu için dengelenmemiş kuvvet
ΔP_i	: i zaman adımı için artımsal kuvvet vektörü
Δt	: Nümerik integrasyon zaman aralığı
Δu_i^j	: i zaman adımı ve j iterasyonu için yer değiştirme vektörü
Δx_i	: i zaman adımı için artımsal yer değiştirme vektörü
$\Delta \dot{x}_i$	: i zaman adımı için artımsal hız vektörü
$\Delta \ddot{x}_i$	: i zaman adımı için artımsal ivme vektörü
η	: Sönüm düzeltme katsayısı
η_M	: En büyük deprem yer hareketi düzeyi için sönüm ölçeklendirme katsayısı
ξ_{eff}	: Sismik yalıtım birimi eşdeğer sönüm oranı
ξ_i	: Sismik yalıtımsız yapının birinci açısal frekansına karşılık gelen sönüm oranı
ξ_j	: Sismik yalıtımsız yapının sonuncu açısal frekansına karşılık gelen sönüm oranı
ω_{eff}	: Yalıtım birimi sekant rijitliği ile hesaplanan açısal frekans
ω_i	: Sismik yalıtımsız yapının birinci açısal frekansı
ω_j	: Sismik yalıtımsız yapının sonuncu açısal frekansı

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1: Çalışma kapsamında incelenen sistemlerin tabanı ankastre olması durumu için hesaplanan yapısal özellikleri.....	38
Çizelge 3.2: Zaman tanım analizlerinde kullanılan deprem kayıtları.....	39
Çizelge 3.3: Çalışma kapsamında yapılan analizlerde kullanılan etkin periyot değeri, etkin sönüm katsayısı ve yapı numaraları.....	50
Çizelge 3.4: Ortak yalıtım düzleminde bulunan üç yapının toplam taban kesme kuvveti katsayıları.....	83
Çizelge 3.5: Ortak yalıtım düzleminde bulunan üç yapının taban kesme kuvveti katsayıları toplamının toplam taban kesme kuvveti katsayılarına göre bağlı hataları.	83
Çizelge 3.6: Ortak yalıtım düzleminde bulunan üç yapının izolatör kesme kuvveti katsayıları.....	83
Çizelge 3.7: Ortak yalıtım düzleminde bulunan üç yapının izolatör kesme kuvveti katsayılarının toplam taban kesme kuvveti katsayılarına göre bağlı hataları.	83
Çizelge 3.8: Ortak yalıtım düzleminde bulunan dört yapının toplam taban kesme kuvveti katsayıları.....	89
Çizelge 3.9: Ortak yalıtım düzleminde bulunan dört yapının taban kesme kuvveti katsayıları toplamının toplam taban kesme kuvveti katsayılarına göre bağlı hataları.	89
Çizelge 3.10: Ortak yalıtım düzleminde bulunan dört yapının izolatör kesme kuvveti katsayıları.....	89
Çizelge 3.11: Ortak yalıtım düzleminde bulunan dört yapının izolatör kesme kuvveti katsayılarının toplam taban kesme kuvveti katsayılarına göre bağlı hataları.	89

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 : Kurşun çekirdekli kauçuk izolator.....	2
Şekil 1.2 : Sürtünmeli sarkaç tipi izolator.....	3
Şekil 1.3 : Sabiha Gökçen Uluslararası Havalimanına ait sismik izolator kolon kiriş birleşimi ve çelik üst yapı [1].	4
Şekil 1.4 : Eşdeğer Tek Serbestlik Dereceli Sistem.....	4
Şekil 1.5 : Yönetmeliklerde verilen sönüm düzeltme katsayılarının karşılaştırılması.....	9
Şekil 1.6 : Bağımsız ve ortak yalıtım düzlemlerinde bulunan yapılar.	15
Şekil 2.1 : Sismik yalıtımlı tek yapının şekil değiştirmiş hali ve serbest cisim diyagramı.	20
Şekil 2.2 : Sismik yalıtımlı çoklu yapıların şekil değiştirmiş hali.	23
Şekil 2.3 : Yalıtım düzleminin serbest cisim diyagramı.	26
Şekil 2.4 : Newton-Raphson yöntemi.	28
Şekil 2.5 : Rayleigh sönümü ve modal sönüm oranlarının açıl frekanslara bağlı değişimi.....	31
Şekil 2.6 : Kuvvet-yer değiştirme grafiğinde bir çevrimde sönümlenen enerji miktarı ve doğrusal şekil değiştirme enerjisi.	31
Şekil 2.7 : Yalıtım birimlerinin histeretik davranışı.....	32
Şekil 2.8 : Mod birleştirme yönteminde kullanılan kompozit spektrum.	35
Şekil 3.1 : 3 nolu yapıya ait analitik model ve yapının şekil değiştirmiş hali. ...	38
Şekil 3.2 : Eşleştirilmiş deprem kayıtlarının ivme spektrumları.....	40
Şekil 3.3 : Eşleştirilmiş deprem kayıtlarının yer değiştirme spektrumları.....	40
Şekil 3.4 : MSBIS programının doğrulanması amacıyla kullanılan doğrusal olmayan kesme yayına ait parametreler.....	41
Şekil 3.5 : Tek serbestlik dereceli sönümsüz sistemin yalıtım birimlerine ait kesme kuvveti-yer değiştirme grafiğinin karşılaştırması.	42
Şekil 3.6 : Tek serbestlik dereceli sönümsüz sistemin yer değiştirme-zaman grafiğinin karşılaştırması.....	42
Şekil 3.7 : Çok serbestlik dereceli sönümsüz sistemin yalıtım birimlerine ait kesme kuvveti-yer değiştirme grafiğinin karşılaştırması.	43
Şekil 3.8 : Çok serbestlik dereceli sönümsüz sistemin yalıtım düzlemi yer değiştirme-zaman grafiğinin karşılaştırması.....	44
Şekil 3.9 : Çok serbestlik dereceli sönümsüz sistemin 2. kat toplam yer değiştirme-zaman grafiğinin karşılaştırması.....	44
Şekil 3.10 : Çok serbestlik dereceli sönümlü sistemin yalıtım birimlerine ait kesme kuvveti-yer değiştirme grafiğinin karşılaştırması.	45
Şekil 3.11 : Çok serbestlik dereceli sönümlü sistemin yalıtım düzlemine ait yer değiştirme-zaman grafiğinin karşılaştırması.....	45

Şekil 3.12	: Çok serbestlik dereceli sönümlü sistemin 2. kat toplam yer değiştirme-zaman grafiğinin karşılaştırması.	46
Şekil 3.13	: Sismik yalıtımlı çoklu yapıli sistemin yalıtım birimlerine ait kesme kuvveti-yer değiştirme grafiğinin karşılaştırması.	47
Şekil 3.14	: Sismik yalıtımlı çoklu yapıli sistemin yalıtım düzlemine ait yer değiştirme-zaman grafiğinin karşılaştırması.	47
Şekil 3.15	: Sismik yalıtımlı çoklu yapıli sistemin birinci yapısına ait toplam tepe yer değiştirme-zaman grafiğinin karşılaştırması.	48
Şekil 3.16	: Sismik yalıtımlı çoklu yapıli sistemin ikinci yapısına ait toplam tepe yer değiştirme-zaman grafiğinin karşılaştırması.	48
Şekil 3.17	: Sismik yalıtımlı çoklu yapıli sistemin birinci yapısına ait taban kesme kuvveti-zaman grafiğinin karşılaştırması.	49
Şekil 3.18	: Sismik yalıtımlı çoklu yapıli sistemin ikinci yapısına ait taban kesme kuvveti-zaman grafiğinin karşılaştırması.	49
Şekil 3.19	: MSBİS programı akış şeması.	52
Şekil 3.20	: 1 nolu yapıların ortak yalıtım düzleminde bulunması durumlarında kullanılan kuvvet-yer değiştirme iskelet eğrileri.	53
Şekil 3.21	: 1 nolu yapıya karşılık değişen ikinci yapılar için kullanılan kuvvet-yer değiştirme iskelet eğrileri.	54
Şekil 3.22	: Sismik yalıtımlı tek ve çok yapıli sistemlerin yalıtım düzlemi serbest cisim diyagramı.	55
Şekil 3.23	: Ortak yalıtım düzleminde bulunan iki yapıdan birinci yapının taban kesme kuvveti katsayısının yapıların açısai frekanslarına göre değişimi.	57
Şekil 3.24	: Ortak yalıtım düzleminde bulunan birinci yapının taban kesme kuvveti katsayısının bağımsız yalıtım düzleminde bulunan yapının taban kesme kuvveti katsayısına oranının yapıların açısai frekanslarına göre değişimi.	58
Şekil 3.25	: Ortak yalıtım düzleminde bulunan iki yapının toplam taban kesme kuvveti katsayısının yapıların açısai frekanslarına göre değişimi.	59
Şekil 3.26	: Ortak yalıtım düzleminde bulunan iki yapının izolatör kesme kuvveti katsayısının yapıların açısai frekanslarına göre değişimi.	60
Şekil 3.27	: 1 nolu yapının ortak ve bağımsız yalıtım düzleminde bulunması durumu için hesaplanan histeretik eğrileri.	62
Şekil 3.28	: Ortak yalıtım düzleminde bulunan iki yapıdan birinci yapının taban kesme kuvveti katsayısının toplam taban kesme kuvveti katsayısına göre bağıl hatasının yapıların açısai frekanslarına göre değişimi.	63
Şekil 3.29	: Ortak yalıtım düzleminde bulunan iki yapının taban kesme kuvveti katsayıları toplamının toplam taban kesme kuvveti katsayısına göre bağıl hatasının yapıların açısai frekanslarına göre değişimi.	64
Şekil 3.30	: Ortak yalıtım düzleminde bulunan iki yapının izolatör kesme kuvveti katsayısının toplam taban kesme kuvveti katsayısına göre bağıl hatasının yapıların açısai frekanslarına göre değişimi.	65

Şekil 3.31	: Bir katlı birinci yapı normalize kesme kuvvetlerinin ikinci yapının kat sayısına göre değişimi.	67
Şekil 3.32	: On katlı birinci yapı normalize kat kesme kuvvetlerinin ikinci yapının kat sayısına göre değişimi.	68
Şekil 3.33	: On katlı birinci yapı kat kesme kuvveti katsayılarının ikinci yapının kat sayısına göre değişimi.	69
Şekil 3.34	: Bir katlı birinci yapı normalize kat ivmelerinin ikinci yapının kat sayısına göre değişimi.	71
Şekil 3.35	: On katlı birinci yapı normalize kat ivmelerinin ikinci yapının kat sayısına göre değişimi.	72
Şekil 3.36	: Bir katlı birinci yapı normalize görel kat ötelemelerinin ikinci yapının kat sayısına göre değişimi.	74
Şekil 3.37	: On katlı birinci yapı normalize görel kat ötelemelerinin ikinci yapının kat sayısına göre değişimi.	75
Şekil 3.38	: Bir katlı birinci yapı için gerekli deprem derz mesafelerinin ikinci yapının kat sayısına göre doğrusal ve doğrusal olmayan yöntemler için değişimi.	77
Şekil 3.39	: Ortak yalıtım düzleminde bulunan üç bağımsız yapı düzeni.	78
Şekil 3.40	: Ortak yalıtım düzleminde bulunan üç bağımsız yapı için yalıtım birimi kuvvet-yer değiştirme iskelet eğrileri.	80
Şekil 3.41	: Ortak yalıtım düzleminde bulunan üç yapının taban kesme kuvveti katsayılarının bağımsız yalıtım düzleminde bulunan yapıların taban kesme kuvveti katsayılarına oranı.	81
Şekil 3.42	: Ortak yalıtım düzleminde bulunan üç yapının taban kesme kuvveti katsayılarının toplam taban kesme kuvveti katsayılarına göre bağıl hataları.	82
Şekil 3.43	: Ortak yalıtım düzleminde bulunan dört bağımsız yapı düzeni.	84
Şekil 3.44	: Ortak yalıtım düzleminde bulunan dört bağımsız yapı için yalıtım birimi kuvvet-yer değiştirme iskelet eğrileri.	86
Şekil 3.45	: Ortak yalıtım düzleminde bulunan dört yapının taban kesme kuvveti katsayılarının bağımsız yalıtım düzleminde bulunan yapıların taban kesme kuvveti katsayılarına oranı.	87
Şekil 3.46	: Ortak yalıtım düzleminde bulunan dört yapının taban kesme kuvveti katsayılarının toplam taban kesme kuvveti katsayılarına göre bağıl hataları.	88

ORTAK YALITIM DÜZLEMİNDE BULUNAN SİSMİK YALITIMLI İKİ BAĞIMSIZ YAPININ KAPSAMLI PARAMETRİK İNCELENMESİ

ÖZET

DepremSELLİĞİN yüksek olduğu bölgelerde bulunan yapıların kuvvetli yer hareketleri sebebiyle hasar almalarını engellemek amacıyla sismik yalıtım sistemleri sıklıkla kullanılmaktadır. Sismik yalıtımlı yapılar üst yapı, yalıtım düzlemi ve yalıtım birimlerinden oluşmaktadır. Bu sistemler çoğunlukla izolatörlerin üzerinde görece olarak rijit hareket ettiği kabul edilen konut, veri merkezi binası, hastane yapıları, sıvı tankı ve açık deniz petrol platformu gibi tek yapılardır. Birbirinden bağımsız sismik yalıtımlı yapıların birlikte kullanılmaları durumunda çözülmesi gereken mimari detaylar karmaşık ve pahalı olmaktadır. Bu sebeple pratikte birbirinden bağımsız bina tipi yapılar ortak yalıtım düzleminde tasarlanmaktadır. Özellikle Türkiye’de son yıllarda yapılan hastane yapıları bu tanıma uymaktadır.

Geçmişte yapılan çalışmalar neticesinde belirlenen doğrusal tasarım yöntemleri, sismik yalıtımlı yapıları tek veya çok serbestlik dereceli bir yapıdan oluşan sistemler olarak değerlendirmektedir. Bu nedenle yönetmeliklerde yer alan tasarım prosedürleri bağımsız yalıtım düzleminde bulunan sismik yapılar hazırlanmıştır. Ortak yalıtım düzleminde bulunan sismik yalıtımlı yapılar için ise yönetmeliklerde tasarım kriteri bulunmamaktadır. Pratikte ortak yalıtım düzleminde tasarlanmış yapıların her biri bağımsız yalıtım düzleminde analiz edilerek boyutlandırılmaktadır. Bu sebeple izolatörlerin histeretik davranışlarından kaynaklanan yüksek mod etkileri dolayısıyla yapıların dinamik etkileşimi değerlendirilememektedir.

Bu çalışmanın amacı ortak yalıtım düzleminde bulunan iki yapı için kapsamlı parametrik inceleme yapılarak üst yapıların dinamik etkileşimi sebebiyle oluşan taban kesme kuvvetlerindeki amplifikasyonun irdelenmesidir.

Çalışma kapsamında ortak yalıtım düzlemine sahip iki yapının dinamik etkileşimi, parametrik olarak değişen sistemler üzerinden incelenmiştir. Ayrıca ortak yalıtım düzleminde bulunan üç ve dört yapıli sistemler için örnek çözümler yapılmıştır. Burada üst yapı kat sayısı, yalıtım birimleri eşdeğer periyot ve eşdeğer sönüm değerleri birer parametre olarak ele alınmıştır. Ortak yalıtım düzleminde bulunan iki yapı kat sayısının birden ona değiştiği durumlar için analizler yapılmıştır. Tüm analizler yalıtım birimlerinin 1.5, 2.5 ve 4.0sn eşdeğer periyot ve %10, %20 ve %30 eşdeğer sönüm değerleri için tekrarlanmıştır. Yalıtım birimlerinin histeretik özellikleri, değişen üst yapı kütlelerine karşılık doğrusal olmayan analizler sonucunda sabit eşdeğer periyot ve eşdeğer sönüm değerlerini elde edebilmek amacıyla normalize edilmiştir. Bu işlem istenilen eşdeğer periyot değerine karşılık gelen rijitlik ve eşdeğer sönüm değerleri ile yapılan doğrusal zaman tanım analizlerinden elde edilen yalıtım birimi yer değiştirmelerine karşılık akma sonrası rijitlik ve karakteristik dayanımın belirlenmesi ile gerçekleştirilmektedir.

Analizler yalnızca yapıların ortak yalıtım düzleminde bulunduğu doğrultu için yapılmıştır. Diğer yöndeki etkiler ve yalıtım birimlerinin iki yönlü etkileşimi göz ardı edilmiştir. Üst yapıların kat kütle ve kat rijitlikleri tüm analizler için sabit alınmıştır. Yalıtım düzlemi kütlesi ise her yapı için sabit olup ortak yalıtım düzleminde bulunan yapı sayısı çarpılarak hesaplanmıştır. Yalnızca kesme yaylarının dikkate alındığı modellerde üst yapılar çok serbestlik dereceli ve doğrusal elastik olarak tanımlanmıştır. Yalıtım birimlerinin doğrusal olmayan davranışları ise çift doğrulu eleman ile temsil edilmektedir. Yalıtım birimlerinde yalnızca doğrusal olmayan davranıştan kaynaklanan histeretik sönüm kullanılmıştır. Analizlerde kullanılan deprem kayıtları, 50 yılda aşılma olasılığı %2 olan deprem yer hareketi düzeyine göre oluşturulan tasarım spektrumuna uygun olarak eşleştirilmiştir.

Tüm analizler tez kapsamında geliştirilen, bağımsız ve ortak yalıtım düzleminde bulunan sismik yalıtımlı yapıların doğrusal olmayan analizlerinin parametrik olarak çözülebilmesine imkan sağlayan MSBIS programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen programın doğruluğu, genel kabul görmüş yapısal analiz programı olan SAP2000 ile karşılaştırılarak gösterilmiştir.

Yer ivmeleri etkisinde doğrusal olmayan dinamik analizler yapılarak birinci yapıda meydana gelen kat kesme kuvvetleri, kat ivmeleri ve görel kat ötelemeleri ikinci yapının değişen açısal frekansına ve yalıtım birimlerinin farklı eşdeğer periyot ve eşdeğer sönüm değerlerine göre değişimi incelenmiştir. Ayrıca birinci yapının on katlı olması durumunda ikinci yapının değişen kat sayıları için kat kesme kuvveti katsayıları değişimi irdelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, incelenen yapıların bağımsız yalıtım düzleminde bulunması durumunda elde edilecek büyüklüklere göre normalize edilmiştir. Böylece yapıların taban kesme kuvvetlerindeki amplifikasyon üst yapı açısal frekanslarına, yalıtım birimi eşdeğer periyot ve eşdeğer sönümüne bağlı olarak tespit edilebilmektedir. Ortak yalıtım düzleminde bulunan yapıların taban kesme kuvveti katsayıları elde edilerek sonuçlar yapıların dinamik analizde vektörel olarak toplanarak elde edilen toplam kesme kuvveti katsayısına göre kıyaslanmıştır. Tespit edilen bu hata oranı yapıların dinamik etkileşiminin mertebesi ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Buna ek olarak ortak yalıtım düzleminde bulunan iki yapının gerekli deprem derz mesafeleri, yönetmeliklerde belirtilen yöntemler ile hesaplanarak doğrusal olmayan dinamik analizlerden elde edilen sonuçlar ile kıyaslanmıştır.

Çalışma sonucunda, yalıtım birimlerinin histeretik sönümlerinin artması nedeniyle oluşan yüksek mod etkilerinin ortak yalıtım düzleminde bulunan yapıların taban kesme kuvveti katsayılarını, görel kat ötelemelerini ve en büyük kat ivmelerini önemli ölçüde artırdığı tespit edilmiştir. Bu artışın, iki yapının açısal frekansların ayrıklaşması ile arttığı görülmüştür. Dolayısıyla iki yapının da aynı açısal frekansa sahip olması durumunda elde edilen iç kuvvet ve yer değiştirmeler, yalıtım birimlerinin aynı eşdeğer periyot ve sönüm değerleri için eşit bulunmaktadır. Ortak yalıtım düzleminde bulunan iki yapıdan incelenen bir katlı yapının taban kesme kuvvetleri ikinci yapının değişen kat sayılarına karşılık bağımsız yalıtım düzleminde bulunması durumuna göre artmaktadır. On katlı yapının incelendiği durumda ise kat kesme kuvvetleri alt katlarda artarken üst katlar için azaldığı belirlenmiştir. Ortak yalıtım düzleminde bulunan üç ve dört yapı sistemleri için yapılan analizler sonucunda ise incelenen yapıdan farklı açısal frekansa sahip yapı sayısının artmasıyla taban kesme kuvveti katsayılarının arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca histeretik sönümün artması ile taban kesme kuvvetinin üst yapıya dağılımında ters üçgen formunun olduğu belirlenmiştir.

COMPREHENSIVE PARAMETRIC INVESTIGATION OF TWO BASE ISOLATED STRUCTURES WITH COMMON ISOLATION PLANE

SUMMARY

Rubber bearings are used to prevent vibrations in the buildings and to allow the bearings to be displaced due to thermal expansion in the bridges. The first use of rubber bearings in order to protect constructions against earthquake effects, occurred in Pestalozzi primary school in Skopje, Yugoslavia in 1969. The same horizontal and vertical stiffness of the rubber supports applied as a single block caused the bulge to occur due to the weight of the building on the side surfaces. The French engineer Eugène Freyssinet, who discovered that the axial loading capacities of the rubber layers were inversely proportional to their height, suggested strengthening the rubber layers by adding thin steel plates in the vertical direction. Here the bond between the layers is provided due to the friction force. Thanks to the vulcanization method used to ensure that the thin steel plates and rubber layers adhere to each other, studies and applications of modern seismic isolators have begun to increase.

Seismic isolation systems are frequently used to prevent damage to structures in areas with high seismicity due to strong ground motions. Base isolated structures consist of superstructure, isolation plane and base isolators. These systems are single structures such as residential, data center building, hospital, liquid tank and offshore oil platform which are assumed to displace relatively rigid over the base isolators. The architectural details to be solved in the case of using separate base isolated structures together, are complex and expensive. For this reason independent superstructures are designed in common isolation plane. More particularly, constructed hospital buildings in recent years in Turkey, meets this definition.

Linear design methods, which are determined in consequence of carried out studies in the past, are consider the base isolated systems as consist of single or multi degree of freedom systems. Therefore design procedures in standards are prepared for base isolated structures with independent isolation plane. There is no design criteria in standards for dynamic interaction of base isolated structures with common isolation plane. Each of the base isolated structures which are designed in common isolation plane are considered in practice as if structures with independent isolation plane. As a consequence of this assumption causes the higher mode effect due to the hysteretic behavior of the isolators and therefore the dynamic interaction of superstructures to be unevaluated.

Purpose of this study is to determine amplification of the base shear coefficient due to interaction of superstructures by performing comprehensive parametric investigation for the two base isolated structures with common isolation plane.

Within the scope of this study, dynamic interaction of two base isolated structures with common isolation plane is investigated through the systems changes parametrically. In addition to this sample analyses are carried out for three and four base

isolated structures with common isolation plane. In this case, number of story of superstructures, equivalent period and equivalent damping ratio of base isolators are considered as parameter. Analyses are carried out for the cases where the number of story of two base isolated structures with common isolation plane changes from one to ten. All analyses are repeated for 1.5, 2.5, 4.0s equivalent period and %10, %20, %30 equivalent damping ratio of base isolators. The hysteretic properties of the base isolators are normalized to obtain constant equivalent period and equivalent damping ratios as a result of nonlinear analysis versus varying superstructure mass. This process is performed by determining the yielded stiffness and characteristic strength by determining the isolator displacements obtained from the linear time-history analysis with the stiffness corresponding intended equivalent period and the equivalent damping values.

Analyses are carried out only for the direction in which the structures are located in the common insulation plane. The effects that occur other directions and the bi-directional interactions of the isolators are out of scope of this study. Story mass and story stiffnesses of superstructures are fixed for all analyses. Mass of the isolation plane is fixed for each structure and is calculated by multiplying the number of structures in the common isolation plane. Only linear elastic shear springs are considered in superstructure models which are defined as multi degree of freedom system. Hysteretic behavior of isolators are represented by a bilinear element. Only hysteretic damping which is caused by nonlinear behavior is considered in base isolators. The ground motion records used in the analyses are matched in accordance with the design spectrum generated according to earthquake ground motion level with probability of exceeding %2 in 50 years.

All analyzes were carried out by means of the MSBIS program, which was developed within the scope of this study, which allows nonlinear analysis of base isolated structures with independent and common isolation plane to be solved parametrically. Numerical solution of equation of motions is carried out with Newmark- β method. Dynamical balance is provided by Newton-Raphson method doing iteration in every time step. The accuracy of the developed program is demonstrated by comparison with SAP2000, the generally accepted structural analysis program.

Resultant shear forces, story accelerations and story drifts of the first structure is determined by means of nonlinear time history analyses according to changing angular frequency of the second structure and effective period and damping values of base isolators. In addition, for the case of first structure have ten stories, the variation of story shear force coefficients for the changing number of story of the second structure is examined. Results are normalized according to values which obtain from the inspected base isolated structures with independent isolation plane. Thus, amplification in base shear forces of the structures can be determined depending on the angular frequency of the superstructures, equivalent period and equivalent damping of base isolator. Base shear force coefficients of the structures with common isolation plane are obtained and the results are compared according to the total shear force coefficient obtained by vector summation in the dynamic analysis. This rate of error is increasing in direct proportion to the order of the dynamic interaction of the structures. Additionally necessary joint spacing of two base isolated structures with common isolation plane is calculated as per related standard and compared to results obtained from the nonlinear dynamic analysis.

As a result of this study, it is determined that dynamic interaction of two base isolated structures with common isolation plane due to increasing damping ratio of base isolators, causes to increase shear coefficients, story drifts and maximum story accelerations significantly. This increment is determined to increase with the separation of the angular frequencies of the two structures. Therefore, if two structures have the same angular frequency, the resulting internal forces and displacements are equal for the same equivalent period and equivalent damping ratios base isolators. Base shear force of one story structure inspected from two base isolated structures with common isolation plane, increase with respect to vary other structure number of story according to situation that inspected structure with independent isolation plane. When the ten-story structure is examined, it is determined that the story shear forces increase in the lower stories and decrease in the upper stories. As a result of the analyses carried out for the three and four base isolated structure with common isolation plane, it is determined that the base shear force coefficients increase with the increase of the number of buildings having different angular frequency from the examined structure. Moreover, increasing in hysteretic damping causes to change lateral distribution of base shear forces to superstructure. Base shear force of structure is evenly distributed to every story for an equivalent damping value of %1, which is assumed to be linear of the isolators. Nevertheless, base shear force of structure is distributed in the form of an inverted triangle for increasing damping ratios.

1. GİRİŞ

1.1 Sismik Yalıtımlı Yapılar

Deprem bölgelerinde yapılacak binalarda yaygın olarak kullanılan kuvvet esaslı tasarıma göre, yapının karşılaşması beklenen en büyük deprem kuvveti altında göreceli olarak büyük yer değiştirmeler yapması, yapısal taşıyıcı elemanlarda hasar oluşması ve dolayısıyla deprem enerjisinin büyük bir kısmının kalıcı şekil değiştirmeler ile sönmelenmesi beklenir. Yapının önem derecesine bağlı olarak depremde daha az hasar almasını sağlamak amacıyla göreceli kat ötelemelerinin sınırlandırılması gerekmektedir. Bu durum, yapının rijitliğini artırarak katlarda daha büyük ivmelerin oluşmasına ve buna bağlı olarak yapısal olmayan elemanlarda daha büyük kuvvetlerin oluşmasına sebep olmaktadır. Kat ivmelerinin azaltılması ise yapı rijitliğinin düşürülmesi ile mümkündür. Ancak bu durumda göreceli kat ötelemeleri ve yapısal hasarlar artmaktadır. Yapıların depremden korunmasının bir yolu, zemin ile yapı temeli arasında, yatay rijitliği yapıya oranla düşük bir katman oluşturmaktır.

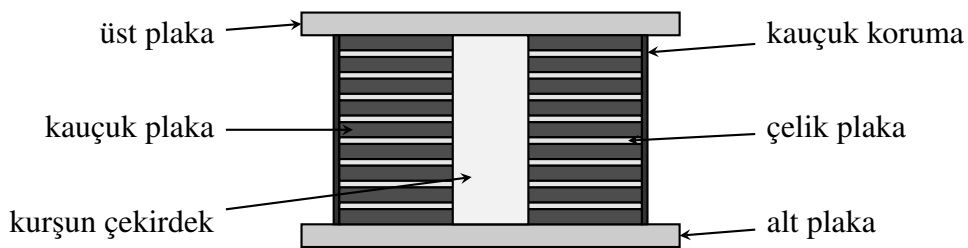
Yapılarda kuvvetli yer hareketleri sebebiyle oluşan hasarları engellemek amacıyla birçok yöntem üzerine çalışmalar yapılmıştır. Touaillon 1870 yılında, ABD patent ofisine yaptığı başvuruda, temel ve binaya sabitlenen konkav metal plakaların arasında bulunan küreler sayesinde deprem sebebiyle yapıların yıkılmasının önleneceğini söylemektedir [2]. Benzer bir yalıtım sistemi ise Bechtold tarafından 1907 yılında patent başvurusu yapılan, binaların altına yerleştirilen rijit taban plakasının bazalt, gnays veya granitten yapılacak küreler üzerinde kayan bir sistem önerisidir [3]. Dr. Calantarines ise yapı temelini ince kum, mika veya talk üzerinde kayabildiği bir "serbest mesnet" fikri ile 1909 yılında İngiltere patent ofisine başvurmuştur [4].

Yeni yöntemlerin araştırılmasının yanında üst katlarda önemli hasarların oluşmasını engellemek amacıyla yumuşak ilk kata sahip yapılar da depreme etkileri altında incelenmiştir. Chopra ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada ilk katı yumuşak kata

sahip sekiz katlı bir binanın, deprem etkileri altında üst katlarında hasar oluşmasını engellemek amacıyla ilk katın akma koşulları incelenmiştir [5].

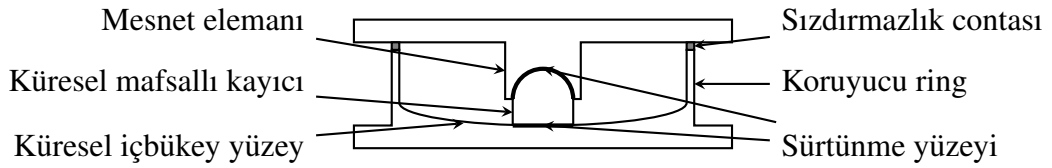
Kauçuk mesnetler, binalarda titreşimleri engellemek ve köprülerde ise ısı genleşmeler sebebiyle mesnetlerin yer değiştirebilmelerini sağlamak amacıyla kullanılmıştır. Yapıların deprem etkilerinden korunmaları amacıyla ilk kullanımı 1969 yılında Yugoslavya'nın Skopje ilinde bulunan Pestalozzi ilkokulunda gerçekleşmiştir. Tek bir blok olarak uygulanan kauçuk mesnetlerin yatay ve düşey rijitliklerinin aynı olması, yan yüzeylerde binanın ağırlığından dolayı şişkinlik oluşmasına neden olmuştur. Kauçuk katmanların eksenel taşıma kapasitelerinin yükseklikleri ile ters orantılı olduğunu tespit eden Fransız mühendis Eugène Freyssinet, kauçuk katmanların aralarına eksenel kuvvete dik doğrultuda ince çelik plakalar ilave ederek güçlendirmeyi önermiştir. Burada katmanlar arasındaki bağ sürtünme kuvveti sebebiyle sağlanmaktadır. İnce çelik plakalar ile kauçuk katmanların birbirlerine yapışmalarını sağlamak amacıyla kullanılan vulkanizasyon yöntemi sayesinde modern haline kavuşan sismik izolatörler ile ilgili yapılan çalışmalar ve uygulama örnekleri artmaya başlamıştır. Kelly tarafından yapılan çalışmada 1900-1984 yılları arasında sismik yalıtım çalışmaları özetlenerek alfabetik ve kronolojik bibliyografya sunulmuştur [6].

Robinson ve Tucker tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Şekil 1.1'de gösterilen çelik plakalar ile güçlendirilmiş kauçuk izolatörün merkezine kurşun silindir yerleştirilerek tekrarlı yatay yükler etkisindeki davranışı incelenmiştir [7]. Çelik ve kauçuk ile sargılı olan kurşun silindirde tamamen kayma deformasyonları meydana gelmektedir. Çalışmada, günümüzde yaygın olarak kullanılan bu sistemin sahip olduğu histeretik sönüm kapasitesi, kurşun çekirdeğin eksenel dayanımı ve geri çağırım kuvveti gibi faydaları belirtilerek büyük deprem etkileri ve küçük rüzgar yüklerinde yeterli performans sergileyeceği vurgulanmıştır.



Şekil 1.1 : Kurşun çekirdekli kauçuk izolatör.

Yapıların mesnetleri üzerinde sarkaç gibi hareket etmelerini sağlayan sismik yalıtım yöntemi Zayas ve diğerleri tarafından 1990 yılında yapılan çalışmalar neticesinde önerilmiştir [8]. Şekil 1.2’de kesiti verilen sürtünmeli sarkaç tipi izolatörlerin yalıtım periyotları konkav yüzeyin yarıçapı ile belirlenmektedir. Deprem enerjisinin sönmüldüğü histeretik davranış, yüzeylerde oluşan sürtünme kuvvetleri nedeniyle oluşmaktadır. Sistemin sarkaç hareketine başlaması, sürtünme kuvvetlerinin aşılmasıyla mümkün olmaktadır. Bu nedenle yapının rüzgar yükleri altında yalıtım birimlerinden beklenen rijitlik elde edilmiş olmaktadır. Sürtünmeli sarkaç tipi izolatörlerin malzeme belirsizliklerinden en az düzeyde etkilenmesi, sismik yalıtımlı yapıların deprem etkileri altındaki davranışlarının öngörülebilir olmasını sağlamaktadır. Ayrıca yapılan testlere göre büyük deplasmanlarda eksenel taşıma kapasitesinde düşme veya stabilite kaybı olmadığı ve histeretik çevrimler ile dayanım azalmasının oluşmadığı görülmüştür.



Şekil 1.2 : Sürtünmeli sarkaç tipi izolatör.

Sismik izolasyon, dünyada depremselliği yüksek olan bölgelerde yoğun olarak kullanılmaktadır. Japonya, Çin, Rusya, İtalya ve ABD başta olmak üzere 30 dan fazla ülkede 23.000’i aşkın bina, sismik izolasyon ve sönmüleyiciler ile korunmaktadır [9]. Aktif fay hatları üzerinde bulunan ülkemizde ise sismik izolasyon kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Ağırlıklı olarak depremden hemen sonra kesintisiz kullanımın hedeflendiği hastaneler ve veri merkezleri gibi önemli binalarda uygulanmaktadır. İstanbul’da bulunan Sabiha Gökçen Uluslararası Havalimanında üç sürtünme yüzeyli sarkaç tipi izolatörler kullanılarak sismik yalıtım uygulanmıştır. Toplamda 160.000 m²’den fazla alana kurulu havalimanında 252 sismik izolatör bulunmaktadır. Üç sürtünme yüzeyli sismik izolatörler ve çelik üst yapının montajı 2008’de tamamlanmıştır (Şekil 1.3).

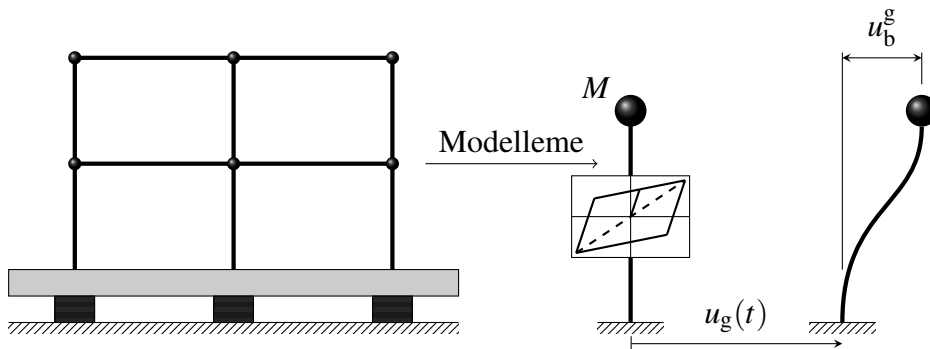


Şekil 1.3 : Sabiha Gökçen Uluslararası Havalimanına ait sismik izolatör kolon giriş birleşimi ve çelik üst yapı [1].

1.2 Sismik Yalıtımlı Yapıların Tasarımı

Sismik yalıtımlı yapıların tasarımı, doğrusal yöntemlerle ön boyutlandırma aşaması ve doğrusal olmayan dinamik analizlerle tasarımın doğrulanması olmak üzere iki aşamalıdır. Ön tasarım aşamasında eşdeğer doğrusal analiz ve mod birleştirme yöntemleri kullanılmaktadır.

Sismik yalıtımlı yapılarda izolatörlerin hakim frekansları ile tabanı ankastre kabul edilen üst yapı frekansları belirgin biçimde ayrışır. Göreli olarak düşük yatay rijitliğe sahip yalıtım birimleri, üst yapının yapacağı deformasyonları azaltmaktadır. Bu nedenlerle elastik sınırlar içerisinde davranması beklenen yapının, yapısal düzensizliklerinin bulunmaması halinde gerekli idealleştirmeler yapılarak sistem basitleştirilebilir. Ayrıca yapının sahip olduğu doğrusal olmayan dinamik özellikler, idealleştirilmiş sisteme karşılık gelen parametrelerle ifade edilebilir. Eşdeğer doğrusal analiz yönteminde tüm yapı, Şekil 1.4’de belirtildiği gibi tek serbestlik dereceli bir sistem olarak temsil edilmektedir.



Şekil 1.4 : Eşdeğer Tek Serbestlik Dereceli Sistem.

Sismik yalıtımlı yapı sisteminin, tasarlanacağı yönetmelikte eşdeğer doğrusal analiz için belirtilen uygulama sınırları dışında kalması durumunda veya üst yapı taşıyıcı sisteminin sahip olduğu serbestlik dereceleri de dikkate alınarak daha detaylı bir çözüm yapılmak istendiğinde mod birleştirme yöntemi tercih edilmektedir. Üst yapının çok serbestlik dereceli sistem olarak modellendiği bu yöntemde, izolatörlerin temsil edildiği doğrusal kesme yaylarında eşdeğer rijitlik değerleri kullanılmaktadır. Böylece kütlesi ve rijitliği belli olan sistemin doğrusal mod şekilleri ve bu modlara karşılık gelen periyot ve frekans değerleri hesaplanır. Tüm modlardan elde edilen iç kuvvet ve yer değiştirmeler birleştirilerek sistemin deprem etkileri hesaplanır.

Doğrusal yöntemlerle tasarımı tamamlanan sismik yalıtımlı yapıların kontrolü, geçmiş depremlerden elde edilen veya bölgenin depremsellik özelliklerine uygun biçimde yapay olarak üretilen yer ivmeleri etkisinde, yapıların doğrusal olmayan davranışlarının modellendiği, zaman tanım alanında yapılan analizler ile sağlanır. İzolatör birimleri için kullanılan kesme yaylarında doğrusal olmayan davranışların çeşitli malzeme modelleri ile ifade edilebileceği gibi, eksenel yaylar, eğilme ve burulma yayları da tanımlanabilmektedir. Ayrıca bu yayların birbirleri ile bağlı olarak çalışması gerçeğe daha yakın analiz sonuçlarının elde edilmesini sağlamaktadır. Bu analizde yapısal davranışlar, kütle ve rijitliklerin yanında yer hareketlerinin içeriğine de bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu nedenle yapının doğrusal olmayan dinamik analizinde, tasarımda uyulan yönetmelik koşullarında belirtilen sayıda ve tasarım spektrumuna göre ölçeklenmiş veya eşlenmiş yer ivmesi kullanılarak bulunan sonuçların ortalaması değerlendirilmektedir.

1.2.1 Sismik yalıtımlı yapıların tasarım yöntemlerinin irdelenmesi

Sismik yalıtımlı yapıların tasarım metotları 1970'lerden günümüze kadar fiziksel deneyler veya analitik modellerden elde edilen bilgiler ışığında pek çok kez irdelenmiştir. Yapılan araştırmalar içinde doğrusal tasarım metotlarının geçerliliği, kullanım sınırları ve doğruluk mertebeleri incelenen konular arasında bulunmaktadır. Sismik yalıtımlı yapıların tasarımında kullanılan doğrusal yöntemler, konvansiyonel yapılardan farklı olarak yalnızca ön tasarım aşamasında kullanılmaktadır. Öngörülen en büyük depremden sonra dahi yapının kesintisiz olarak kullanılma gerekliliği, yapısal tasarımda gerçeğe en yakın sonuçların elde edilmesini sağlayacak analizlerin

uygulanma zorunluluğunu da beraberinde getirmektedir. Dolayısıyla ana hatları doğrusal analizler ile belirlenen sismik yalıtımlı sistem tasarımlarının, bölgenin depremselliğine uygun olarak seçilecek deprem kayıtları kullanılarak yapılacak doğrusal olmayan dinamik analizler sayesinde kontrol edilerek son hale getirilmesi önemlidir. Fakat bu ileri seviye analizler, karmaşık olabilmekte ve uzun zaman almaktadır. Bu nedenle, son aşamaya kadar doğrusal yöntemler ile ilerletilen sismik yalıtımlı yapı projelerinde bu analizlerin doğruluğu önem arz etmektedir. İlerleyen başlıklarda doğrusal analiz yöntemleri irdelenmiştir.

1.2.2 Eşdeğer doğrusal analiz

Eşdeğer doğrusal analiz yönteminde kullanılan sistemde izolatörlerin üzerinde bulunan yalıtım düzlemi ve üst yapı, tek bir kütle olarak değerlendirilmektedir. İzolatör eşdeğer rijitliği, her bir izolatör biriminin tasarım deplasmanı için elde edilecek sekant rijitlikleri toplamını belirtmektedir. Buna bağlı olarak izolatör periyodu, tek serbestlik dereceli sistem için hesaplanmaktadır. Sistemin sönümleyeceği enerji ise izolatörlerin doğrusal olmayan histeretik davranışlarından elde edilecek eşdeğer viskoz sönüm oranı cinsinden ifade edilir. Eşdeğer doğrusal analiz yöntemi, içerdiği kabul ve idealleştirmeler sebebi ile kullanılan yönetmeliklerde belirtilen kriterlerin sağlanması durumunda uygulanabilmektedir.

Ön tasarım aşamasında izolatörlerde meydana gelecek en büyük yatay yer değiştirme değerinin tespit edilmesi izolatör boyutlarının belirlenmesinde önemli bir kriterdir. En büyük yer değiştirme değeri, en büyük izolatör kuvvetinin eşdeğer rijitliğe bölümü ile bulunmaktadır. Fakat eşdeğer rijitlik değerinin belirlenebilmesi, izolatörün en büyük yer değiştirme değerinin bilinmesi ile mümkün olmaktadır. Ön tasarımın ilk adımında oluşan bu belirsizlik, detayları Bölüm 2’de sunulan iterasyonlar ile ortadan kaldırılmaktadır.

Üst yapının ön tasarımı için gerekli taban kesme kuvveti, bu yöntemde yalıtım düzleminde oluşan kesme kuvvetine göre hesaplanmaktadır. Tasarımda takip edilen yönetmeliğe bağlı olarak taban kesme kuvvetinin belirlenmesi ve bu kuvvetin üst yapı katlarına dağıtılma biçimi farklılık göstermektedir. EN 1998-1:2004’e göre, katlara etkiyen yatay kuvvetler eşdeğer periyot ve sönüme göre hesaplanacak spektral ivmenin, ilgili kat kütlesi ile çarpımından elde edilmektedir [19]. Burada kat

kütlelerinin eşit olduğu kabulü yapılırsa kesme kuvvetlerinin katlara eşit miktarda dağıtıldığı görülmektedir. Ayrıca yalıtım birimi seviyesinde meydana gelen kesme kuvvetinin yapı kütlesine oranı ile üst yapı taban kesme kuvvetinin üst yapı toplam kütlesine oranı eşit olmaktadır.

ASCE/SEI-7-10 (2010) ve TBDY (2018) yönetmeliklerinde yer alan formüle göre taban kesme kuvveti, yalıtım seviyesinde oluşan kesme kuvvetine eşit alınarak üst yapı katlarına üçgen formunda dağıtılmaktadır [10, 11].

ASCE/SEI-41-13 (2014) ve ASCE/SEI-7-16 (2016) yönetmeliklerinde ise yalıtım düzleminde oluşacak kesme kuvveti, yapı taban kesme kuvvetine eşit olarak alınmamaktadır [12, 13]. York ve Ryan tarafından yapılan çalışma, eşdeğer viskoz sönüm oranının artması halinde, yapı taban kesme kuvvetinin yalıtım düzleminde oluşan kesme kuvvetine oranının da artacağını göstermektedir [14]. Buna bağlı olarak önerilen formül, istatistiksel parametreyi temsil eden katsayıda bulunan değişiklik ile birlikte bu güncel yönetmeliklerde yer almaktadır. Elde edilen artırılmış taban kesme kuvveti ise katlara çalışmada önerilen formülün güncel haline göre paylaştırılmaktadır.

TBDY (2018) yönetmeliğine göre hesaplanacak taban kesme kuvvetinde belirlenecek deprem yükü azaltma katsayısı R , hedeflenecek kesintisiz kullanım ve sınırlı hasar performans düzeyleri için dayanım fazlalığı katsayısı D ile eşit verilmektedir [11]. Benzer olarak ASCE/SEI-7-10 (2010) yönetmeliğinde belirtilen formülde yer alan R_1 katsayısı, üst yapı yatay taşıyıcı sistemine bağlı olarak belirlenecek R katsayısının $3/8$ 'i alınarak hesaplanmakta ve en fazla 2 olarak belirlenebilmektedir [10]. Dolayısıyla R_1 katsayısı, hiçbir taşıyıcı sistem için dayanım fazlalığı katsayısı Ω_0 'dan büyük olmamaktadır. Böylece yapının karşılaşması beklenen en büyük deprem etkisi altında elastik sınırlar içinde kalması, yalnızca eşdeğer doğrusal analiz yönteminin belirlediği kabuller çerçevesinde, yalıtım düzlemi kesme kuvvetinin üst yapı taban kesme kuvvetine eşit olması durumunda mümkün olmaktadır.

1.2.3 Mod birleştirme yöntemi

Sismik yalıtımlı yapı sistemlerinin en düşük frekansa sahip modu, yalıtım birimlerinin deforme olduğu ve üst yapının görel olarak çok düşük ötelenmeler yaptığı yalıtım modudur. Dolayısıyla sistemin birinci moduna ait periyodunun büyük çoğunluğu izolatör birimlerinin eşdeğer periyoduna karşılık gelmektedir. İzolatörlerin, doğrusal

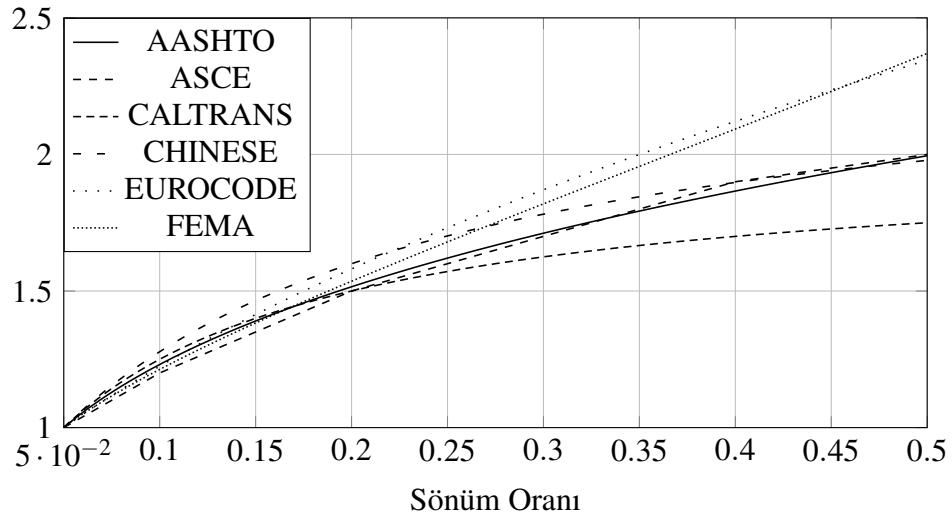
olmayan histeretik davranışları neticesinde yapıda meydana getirecekleri ilave sönümler, yalıtım modunda değerlendirilmektedir. Bu sebeple tasarım spektrumunun yönetmeliklerde belirtilen düzeltme katsayısı ile çarpılarak azaltılmış hali, yalnızca yalıtım moduna ait periyotlara karşılık gelen spektral ivmelerin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Sistemin daha yüksek frekanslara sahip modlarında ise üst yapının dinamik özellikleri baskın olmaktadır. Bu modlarda konvansiyonel yapılarda kullanılan sönüm oranlarının kullanılması uygun olmaktadır. Dolayısıyla, düşük periyotlu modlara karşılık gelen spektral ivmelerde %5 sönüm oranı için verilen tasarım spektrumunun kullanılması çoğu zaman uygundur. Bu sebeple, yalıtım moduna karşılık gelen azaltılmış spektrum ile üst yapı modlarına karşılık gelen azaltılmamış tasarım spektrumu bir araya getirilerek oluşturulan kompozit spektrum, mod birleştirme yönteminde kullanılmaktadır.

Mod birleştirme yönteminde, izolatör birimlerinde, üst yapı tabanında veya katlarda meydana gelen kesme kuvvetleri, her bir moddan elde edilen kuvvetlerin birleştirilmesi ile elde edilir. Dolayısıyla bu yöntem ile yapılacak tasarımda, uygulanacak idealleştirmelerin azaltılması, eşdeğer doğrusal analiz yöntemine kıyasla daha detaylı hesaplama yapılmasının yanında doğruya daha yakın sonuçların elde edilmesine imkan tanımaktadır. Ancak yine de yapılan analizlerin doğrusal olması ve sistemin histeretik davranışlarından kaynaklanan etkilerin hesaplanamaması yöntemin içerdiği hatalardan bazılarıdır.

Mod birleştirme yönteminde elde edilen büyüklükler, üst yapı ve yalıtım birimlerinin doğrusal yaylar ile temsil edildiği durumda oluşacak mod şekilleri üzerinden bulunur. Burada yalıtım birimlerinin histeretik davranışları, sekant rijitlikleri ile ifade edilen eşdeğer doğrusal yay olarak temsil edilir. Bu durum, yalnızca yalıtım birimlerinin düşük histeretik sönüme sahip olmaları durumunda doğruya yakın sonuçlar vermektedir. Ancak çift doğrulu yalıtım birimlerinin yüksek doğrusalsızlığa sahip olmaları durumunda genellikle görece büyük yüksek-mod ivme tepkileri oluşur. Bu konu ilk kez Clough tarafından yüksek yapıların deprem etkileri altında incelenmiştir [15]. Sismik yalıtımlı yapılar için ise Skinner ve diğerleri tarafından yapılan çalışmalar ile detaylı olarak irdelenmiştir [16].

Yönetmeliklerde verilen doğrusal elastik tasarım spektrumları $\xi = \%5$ sönüme sahip sistemler için hazırlanmaktadır. Sistemin farklı bir sönüme sahip olması

durumunda ise tasarım spektrumunun bir katsayı ile çarpılarak ivme değerlerinin artırılması veya azaltılması sağlanır. Sismik yalıtım birimlerinin histeretik davranışları neticesinde sönümledikleri enerji, eşdeğer sönüm cinsinden ifade edildiğinde %30'lara varmaktadır. Bu nedenle doğrusal tasarım aşamalarında bulunan eşdeğer periyoda karşılık gelen spektral ivmelerin, hesaplanan eşdeğer sönüm değerine bağlı olarak sönüm düzeltme katsayısı ile çarpılarak azaltılması gerekmektedir. Kullanılan yönetmeliklere bağlı olarak sönüm düzeltme katsayıları farklılık göstermektedir. ASCE/SEI 7-10 (2010), ASCE/SEI 7-16 (2016), AASHTO (2012) ve FEMA 450 (2003) yönetmelikleri aynı düzeltme katsayılarını kullanmaktadır [10, 13, 17, 18]. Ayrıca TBDY (2018) yönetmeliğinde belirtilen formül ile EN 1998-1 (2004) yönetmeliği de aynı düzeltme katsayısı formülünü kullanmaktadır [11, 19]. Farklı yönetmeliklerde verilen sönüm düzeltme katsayıları Şekil 1.5'de karşılaştırılmıştır.



Şekil 1.5 : Yönetmeliklerde verilen sönüm düzeltme katsayılarının karşılaştırılması.

1.3 Sismik Yalıtımlı Yapıların Doğrusal Olmayan Çözümleme Yöntemleri

Sismik yalıtımlı yapıların yer ivmesi etkisindeki analizi, yalıtım sistemlerinin doğrusal olmayan histeretik davranışı ve deprem ivmelerinin bir fonksiyon ile ifade edilememesi sebebiyle yalnızca nümerik olarak yapılabilmektedir. Çok serbestlik dereceli yapıların doğrusal olmayan çözümlerinde sıklıkla uygulanan iki yöntem bulunmaktadır. Bunlardan ilki diferansiyel denklemlerin küçük zaman adımlarında doğrudan entegre edildiği Newmark yöntemidir [20]. Bu yöntemde hareket denklemleri her zaman adımı için doğrudan çözülmemektedir. Bir diğer

sayısal integrasyon yöntemi ise Wilson tarafından önerilen hızlı doğrusal olmayan analizdir (*Fast nonlinear analysis*) [21]. Burada sismik yalıtımlı yapılarda olduğu gibi belirli sayıda doğrusal olmayan elemana sahip sistemlerin hareket denklemleri modal koordinatlara çevrilerek çözülmektedir. Tez çalışması kapsamında doğrudan integrasyon yöntemi kullanılmıştır. Yönteme ait detaylar Bölüm 2’de verilmiştir.

Yalıtım birimi malzemelerinin gerilme-şekil değiştirme ilişkilerinin doğrusal olması sebebiyle sismik yalıtımlı yapıların bünye denklemleri de doğrusal olmamaktadır. Küçük zaman adımları içerisinde yer ivmeleri sebebiyle meydana gelen atalet kuvvetlerinin yapıda ve yalıtım birimlerinde oluşan içsel kuvvetler ile dengelenmesi denge denklemlerinin sağlanabilmesi için gereklidir. Bu sebeple uygulanan Newton-Raphson yönteminde her bir zaman adımı içerisinde dış kuvvetler ile içsel kuvvetlerin farkından oluşan dengelenmemiş kuvvet, belirlenen toleranslar altında kalana dek sisteme dış yük olarak etkililir. Sistemin dengeye ulaşması için tekrarlanan iterasyonlar, dengelenmemiş kuvvetlerin olduğu her zaman adımı için tekrarlanmaktadır. Doğrusal olmayan sistemlerin çözümünde kullanılan bir diğer yöntem ise Molnar ve diğerleri tarafından sunulan yalancı kuvvet (*Pseudoforce*) yöntemidir [22]. Bu yöntemde bir zaman adımı içerisinde hesaplanacak içsel kuvvetler bir önceki iterasyon adımından alınarak dengelenmemiş kuvvet hesaplanır. Dengelenmemiş kuvvet belirlenen tolerans değerinin altında kalana kadar iterasyon devam eder. Doğrusal olmayan sistemlerin çözümünde iterasyondan kaçınmak kullanılan bir yöntem ise dengelenmemiş kuvvet düzeltme (*Unbalanced Force Correction*) yöntemidir. Bu yöntemde bir zaman adımı içerisinde oluşan dengelenmemiş kuvvetler hesaplanarak bir sonraki zaman adımında yer ivmeleri sebebiyle oluşan atalet kuvvetleri ile toplanarak sisteme etkililir. Böylece kabul edilebilir bir hata oranları ile zaman adımları içerisinde iterasyon yapılmadan doğrusal olmayan sistem analitik olarak çözülebilir.

Sismik yalıtımlı yapıların sayısal çözümlerinde kullanılmak üzere oluşturulacak kütle, sönüm ve rijitlik matrisleri iki ayrı yöntem kullanılarak oluşturulabilir. Bunlardan ilki yapısal analizlerde sıklıkla kullanılan genel amaçlı sonlu elemanlar yöntemidir. Pratikte sonlu elemanlar yöntemi ve düğüm noktalarında birleşen idealleştirilmiş yapısal elemanlar için uyarlanan doğrudan rijitlik yöntemi, SAP2000, OpenSees (2008) gibi ticari programlar tarafından kullanılmaktadır [23]. Bu yöntemde yalıtım

birimleri davranışlarının belli kabuller çerçevesinde analitik olarak modellenenebilmesi amacıyla izolatör modelleri geliştirilmektedir. Örneğin Kumar ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada, izolatörler, her biri altı serbestlik derecesinden oluşan iki düğüm noktası ile ifade edilmiştir [24]. İzolatör modellerinin etkin davranışlarını kayma deformasyonları oluşturmaktadır. Bu nedenle eksenel, kesme, burulma ve dönme yaylarından oluşan modelde sadece iki doğrultu bulunan kesme yayları doğrudan etkileşimlidir. Fakat düşey ve yatay hareketin etkileşimi, eksenel yüke bağlı kayma rijitliği değişimi ve yatay deformasyonlara bağlı eksenel rijitlik ile dolaylı olarak sağlanmıştır. Yayların ayrıklaştırılması, farklı malzeme modellerinin bir arada kullanılarak, yalıtım biriminde meydana gelen kavitasyon, dayanım azalması, burkulma, $P - \Delta$ ve kurşun çekirdekte ısınma gibi etkilerin dikkate alınmasını mümkün hale getirmiştir.

Sismik izolasyonlu yapıların üç boyutlu dinamik çözümleri için kullanılan bir diğer yöntem ise Nagarajaiah ve diğerleri tarafından geliştirilen hareket denklemleridir [25]. 3D-BASIS-M, bu yöntemi kullanan ticari yapısal analiz programıdır [26]. Bu yöntemde kütle, sönüm ve rijitlik matrisleri, üstyapı ile yalıtım düzlemi birbirlerinden ayrıklaştırılarak oluşturulur. Böylece, yalnızca üstyapıya ait bir sönüm oranı, yalıtım sisteminden bağımsız olarak tariflenebilmektedir. Ayrıca, izolasyon sistemi için ek viskoz sönüm ve doğrusal yay elemanları da tanımlanabilir. Bina kat yer değiştirmeleri yalıtım düzlemine ve yalıtım düzlemi yer değiştirmeleri de zemine göre bağıl olarak ifade edilir. Üstyapı katları ile yalıtım düzlemi tek bir kütle ve birbirlerine dik iki ötelenme ve bir dönme serbestlik dereceleri ile ifade edilir. İzolatörlerin histeretik davranışları için kullanılan Bouc-Wen modeli, iki eksenli yatay harekette etkileşimli olacak biçime uyarlanmıştır [27].

Sismik izolasyonlu yapılar için geliştirilen söz konusu hareket denklemleri, Tsopelas ve diğerleri tarafından bir adım öteye taşınarak, aynı yalıtım düzlemini paylaşan bağımsız çoklu yapıların dinamik çözümlerinin yapılabilmesini sağlamıştır [28]. Tez çalışması kapsamında yapılan parametrik incelemede bu hareket denklemlerinden yararlanılmıştır.

1.4 Sismik Yalıtımlı Yapı Düzenlemesi

Sismik yalıtımlı yapılar tipik olarak yalıtım birimlerinin üst plakalarının mesnetlendiği yalıtım düzlemi adı verilen rijit bir düzlem üzerinde yükselmektedir. Yalıtım birimleri yapı temeli ile yalıtım düzlemi arasında konumlandırılabilceği gibi en üst bodrum kat kolonları ile yalıtım düzlemi arasında da bulunabilir. Dolayısıyla sismik yalıtımlı yapılar alt yapı, yalıtım birimleri, yalıtım düzlemi ve üst yapı olmak üzere dört kısımda değerlendirilir. Sismik yalıtımlı yapıların uygulama alanları çoğunlukla üst yapıları tek yapıdan oluşan sistemlerden oluşmaktadır. Bu sistemlere; köprüler, sıvı tankları, açık deniz petrol platformları, liman vinçleri ve nükleer güç santralleri örnek gösterilebilir. Sismik yalıtım sistemleri ile ilgili çalışmalar da bu kullanım alanları doğrultusunda yapılmakta ve dolayısıyla görece olarak rijit olarak kabul edilebilen bu sistemlerin davranışları idealleştirilerek sismik yalıtım birimleri tasarımları gerçekleştirilmektedir. Buna rağmen birbirlerinden dilatasyonlar ile ayrılan çok yapıli sistemlerde de sismik yalıtım sistemleri uygulanmaktadır. Bu tip yapılar mimari kullanım koşulları sebebiyle bağımsız yalıtım düzlemleri üzerinde bulunamamaktadır ve tüm yapıların birbirleri ile yalıtım düzlemleri seviyesinde bağlandıkları bir sistem düzenlenmektedir (Şekil 1.6). Ortak yalıtım düzlemi üzerinde bulunan bu yapıların deprem etkisi altındaki davranışları geçmişte az sayıda araştırmacı tarafından irdelenmiştir.

1.5 Ortak yalıtım düzleminde bulunan yapılar

Literatürde ortak yalıtım düzleminde bulunan ve birbirlerinden dilatasyonlar sebebi ile bağımsız olan yapılar hakkında çalışmalar mevcuttur. Tsopelas ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada, Yunanistan'da inşa edilen ve ortak yalıtım düzleminde bulunan altı katlı dört hastane yapısı, 3D-BASIS-M programı yardımıyla incelenmiştir [28]. Planda T şeklinde konumlanmış dört adet yapı arasından üçüncü yapı bağımsız yalıtım düzleminde analiz edilerek taban kesme kuvveti katsayısı, en büyük kat ivmeleri, köşe kolondaki en büyük görece kat ötelemeleri ve köşe izolatör en büyük yer değıştirmesi yapının ortak yalıtım düzleminde bulunması durumuna göre karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak üçüncü yapının bağımsız yalıtım düzleminde bulunması durumunda sonuçların

ortak yalıtım düzleminde bulunması durumuna göre yaklaşık %25 daha az bulunduğu belirtilmektedir.

Selek ve Alhan tarafından yapılan çalışmada, ortak yalıtım düzleminde bulunan yapıların parametre değişimlerinin yapı davranışına etkisi üç farklı yer ivmesi etkisinde incelenerek sonuçlar konvansiyonel yapılar ile karşılaştırma yapılmıştır [29]. Burada yapı kat sayısı, yapıların plan üzerindeki konumları, yapı dış merkezliği ve yalıtım sistemi periyodu birer parametre olarak kabul edilmiştir. Buna göre üst yapılar arasındaki etkileşimin, üst yapı dış merkezliğinin, yapı toplam kat sayılarının ve binaların yerleşim planının karmaşılaşması ile arttığı vurgulanmaktadır. Ayrıca ortak yalıtım düzleminde bulunan yapıların artan üst yapı etkileşimine rağmen konvansiyonel yapılardan daha iyi performans gösterdiği de belirtilmiştir.

Sorace ve Terenzi tarafından yapılan çalışmada, birbirinden bağımsız dört adet betonarme çerçeveli yapının analiz metotları, tasarım kriterleri ve imalat detayları açıklanmıştır [30]. Çift sürtünme yüzeyli sarkaç izolatörlerin kullanıldığı konut tipi yapının ön tasarımı, doğrusal metotlar kullanılarak tamamlanmıştır. Bulunan sonuçlara göre izolatör seçimi yapılarak, en büyük deprem altında öngörülen performans düzeyinin sağlandığı, zaman tanım alanında yapılan doğrusal olmayan analizler ile gösterilmiştir.

Ferraioli ve Mandara tarafından yapılan çalışmada izolatörler ile güçlendirilmiş bir hastane yapısı üzerinde yapılan doğrusal olmayan analizler ile yapının eşdeğer doğrusal özellikleri kıyaslanmıştır [31]. İzolatör en büyük yer değiştirmesi, görelî kat ötelenmeleri ve en büyük kat ivmeleri iki yöntem için bulunarak, hata oranları gösterilmiştir.

Ferraioli ve Mandara tarafından yapılan bir başka çalışmada, birbirlerinden dilatasyon ile ayrılmış üç adet bloktan oluşan beş katlı betonarme çerçeve sistemli hastane yapısının, izolatörler ile güçlendirilme prosedürleri açıklanmıştır [32]. Yapılan çalışmada, yalıtım düzleminde kütle ve rijitlik merkezleri arasındaki mesafenin düşürülmesine rağmen dinamik analizlerde önemli burulma etkilerinin görüldüğü belirtilmiştir. Ayrıca yapıların, dikkate alınan en büyük deprem esnasında birbirlerine çarpma etkilerinin de değerlendirildiği çalışmada, en büyük görelî yer değiştirmelerin deprem derzlerine kıyasla çok küçük olduğu tespit edilmiştir.

Farklı yapısal özellikli, birbirlerinden bağımsız sismik yalıtımlı yapıların, ortak yalıtım düzlemlerinde bulunmaları durumunda yapısal davranışlarında meydana gelen değişimler, Güler ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada incelenmiştir [33]. Sürtünmeli sarkaç tipi izolatörlerin kullanıldığı çalışmada, her binanın göreceli kat ötelenmeleri, kat kesme kuvvetleri ve en büyük kat ivmeleri yalıtım düzlemlerinin bağımsız veya ortak olması durumuna göre karşılaştırılmıştır.

Pang tarafından yapılan çalışmada, Podyum katları üzerinde yükselen çok katlı iki yapının yalıtımsız, taban yalıtımlı ve podyum katlarının üzerinde yapıların yalıtıldığı üç durumu, zaman tanım alanında yaptığı doğrusal olmayan analizler ile kıyaslamıştır [34]. Çalışma sonucunda kat ötelenmeleri, kesme kuvvetleri ve kat ivmeleri üç durum için elde edilerek sonuçlar gösterilmiştir.

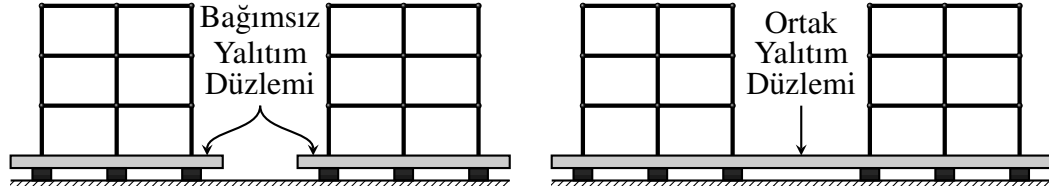
Yukarıda belirtilen çalışmaların tümü değerlendirilen projelere özgü olup, çoklu yapıların bağımsız yalıtım düzleminde bulunmaları durumuna göre kıyaslanan parametrik bir çalışma yapılmamıştır.

1.6 Problemin Tanımı

Sismik yalıtımlı yapıların tasarımı için yönetmelikler tarafından belirlenen doğrusal yöntemler, bağımsız yalıtım düzlemlerinde bulunan yapı davranışları esas alınan çalışmalar sonucunda önerilmiştir. Ortak yalıtım düzleminde bulunan yapıların birbirleri ile olan etkileşiminden kaynaklanan etkiler yönetmeliklerin kapsamı dışındadır.

Sismik yalıtımlı yapı uygulamalarında ise birden fazla bloktan oluşan binalar yapılmakta ve mimari kullanım amaçları doğrultusunda bloklar arası geçişlerin sağlanması istenmektedir. Blokların bağımsız yalıtım düzlemleri üzerinde yükseldikleri durumda birbirleri aralarında göreceli olarak yüksek derz mesafeleri ortaya çıkmakta ve mimari kullanım zorluklarının yanında yapılacak detaylar yüksek maliyet oluşturmaktadır. Bu sebeple binalar, Şekil 1.6'da gösterildiği gibi ortak yalıtım düzlemi üzerinde konumlandırılarak, deprem derz mesafelerinin azaltılması sağlanmaktadır.

Bu çalışmada, ortak yalıtım düzlemine sahip sismik yalıtımlı iki yapı, deprem etkileri altında doğrusal olmayan dinamik analizler ile incelenmiştir. Sismik yalıtım birimleri ve bina yapısal özellikleri parametrik olarak değişen çalışmada, ortak



Şekil 1.6 : Bağımsız ve ortak yalıtım düzlemlerinde bulunan yapılar.

yalıtım düzlemindeki iki binanın, yapısal özelliklerinin değişiminin birbirlerine olan etkileri farklı eşdeğer periyot değerleri ve sönüm oranları için irdelenmiştir. Ayrıca, yapıların ayrı yalıtım düzleminde bulunmaları durumuna göre değişen yapı davranışı gözlemlenmiştir.

1.7 Çalışmanın Kapsamı

Çalışma kapsamında ortak yalıtım düzleminde bulunan sismik yalıtımlı iki bina için kapsamlı parametrik çalışma yapılmış ve ikiden fazla yapıların aynı düzlemde bulunduğu durumlar için ise örnek sistemler çözülmüştür. Yapı davranışları, çoklu yapıların üzerinde bulunduğu bir doğrultu için incelenmiş olup, diğer doğrultudaki etkiler bu tezin kapsamı dışındadır. İncelenen yapıların kat kütleleri ve rijitlikleri tüm analizlerde sabit alınmıştır. Periyot veya açısal frekansların değişimi ise bir ile on arasında değişen üst yapı kat sayıları ile sağlanmıştır. Katlar yalnızca toplu kütleler ile ifade edilerek yapı katlarında düzlem içi rijitlikler sonsuz kabul edilmiştir. Kat rijitlikleri ise tek yönlü doğrusal elastik kesme yayları ile ifade edilen yapılar çok serbestlik dereceli olarak modellenmiştir. Yapıların yalıtım düzlemleri kütlesi sabit olup analizlerde kullanılan yapı sayısı ile çarpılarak yalıtım düzlemi toplam kütlesi hesaplanmaktadır.

Ortak yalıtım düzleminde bulunan yapılar, yalıtım birimlerinin $T_{eff} = 1.5, 2.5$ ve 4.0 sn eşdeğer periyot değerlerine karşılık $\xi_{eff} = 0.1, 0.2$ ve 0.3 eşdeğer sönüm oranları için toplam dokuz durum altında incelenmiştir. Birinci yapının parametrik değişimi için yapılan tüm analizler, İkinci yapının her parametrik değişimi için de tekrarlanmıştır.

Doğrusal olmayan kesme yayları ile modellenen izolatörlerin histeretik modelinde çift-doğrusal eleman kullanılmıştır. Sismik yalıtım birimlerinin her bir durum için değişen yapı kütlelerine karşılık eşdeğer periyot ve sönümün sabit kalmasını sağlamak

amacıyla York ve Ryan tarafından yapılan çalışmada kullanılan yöntem uygulanmıştır [14].

Çalışma kapsamında yapılan dinamik analizlerde 50 yılda aşılma olasılığı %2 olan deprem düzeyine göre seçilen tasarım spektrumu ile eşleştirilmiş ivme kayıtları kullanılmıştır. Sismik yalıtımlı yapıların dinamik analizlerinde Newmark tarafından önerilen nümerik integrasyon yöntemi kullanılmıştır [20]. Doğrusal olmayan bünye denklemlerinin çözümünde ise Newton-Raphson metodu uygulanmıştır.

1.8 Çalışmanın İçeriği

Ortak yalıtım düzleminde bulunan iki yapının davranışlarını incelemek amacıyla sismik yalıtımlı tekli veya çoklu yapıların analizinin parametrik olarak yapılabilirdiği MSBIS programı çalışma kapsamında hazırlanmıştır.

İkinci Bölümde, bağımsız ve ortak yalıtım düzlemlerinde bulunan sismik yalıtımlı yapılara ait hareket denklemleri türetilmiş ve dinamik analizlerde kullanılan sayısal integrasyon ve doğrusal olmayan çözüm yöntemleri ayrıntılı biçimde açıklanmıştır. Ayrıca, üst yapıya ait sönüm modelinin detayları açıklanarak yalıtım birimleri tarafından oluşan histeretik sönümün eşdeğer sönüm oranı ile ifade edilmesine ilişkin kullanılan formüller paylaşılmıştır. Daha sonra sismik yalıtımlı yapıların eşdeğer doğrusal analizinde kullanılan iteratif çözüm metodu detaylı olarak açıklanarak üst yapıya ait taban kesme kuvvetinin belirlenmesi ve yapı katlarına paylaştırılması konusu farklı yönetmelikler üzerinden örneklendirilmiştir.

Üçüncü Bölümde, parametrik çalışmada incelenen üst yapıların sayısı ve yapısal özellikleri paylaşarak analizlerde kullanılan deprem kayıtlarının seçimi ve tasarım spektrumuna göre eşleştirilme yöntemi açıklanmıştır. Daha sonra MSBIS programının sonlu elemanlar yöntemini kullanan yapısal analiz programı ile doğrulaması bağımsız yalıtım düzleminde bulunan tek ve çok serbestlik dereceli sistemler ve ortak yalıtım düzleminde bulunan çok serbestlik dereceli sistemler için yapılmıştır. Ayrıca MSBIS programında kullanılan parametrik yöntemin detayları açıklanarak ortak yalıtım düzleminde bulunan iki yapının kesme kuvveti, ivme ve göreceli kat ötelemelerinin yalıtım birimi parametrelerine ve ikinci yapının değişimine göre olan etkileri ayrıntılı

biçimde sunulmuştur. Bununla birlikte ikiden fazla yapıların ortak yalıtım düzleminde bulunmaları durumu için örnek sistemler analiz edilerek sonuçları paylaşılmıştır.

Dördüncü Bölümde ise çalışma kapsamında elde edilen veriler değerlendirilmiştir.

2. TEORİK ALTYAPI

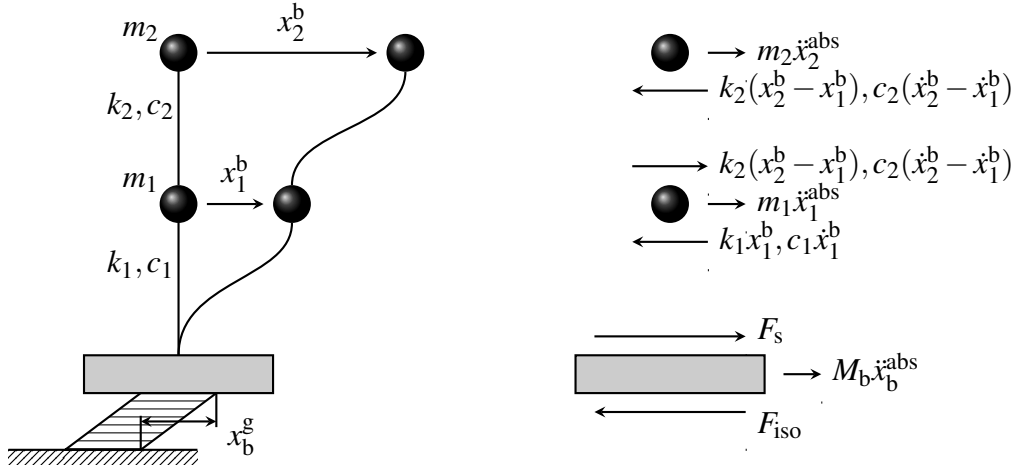
2.1 Giriş

Bu bölümde, ortak yalıtım düzleminde bulunan sismik yalıtımlı tekli ve çoklu yapılara ait hareket denklemleri, çalışmada kullanılacak hali ile yeniden türetilmiş ve ardından hareket denklemlerinin çalışma kapsamında kullanılan doğrusal olmayan çözüm yöntemine ait detaylar verilmiştir. Bununla birlikte sismik yalıtımlı yapıların analizinde kullanılan sönüm modellerine ait detaylar paylaşılmıştır. Ayrıca sismik yalıtımlı yapıların eşdeğer doğrusal analizine ilişkin tasarım metodolojileri ilgili yöntem ve yönetmelikler dahilinde açıklanmıştır.

2.2 Sismik Yalıtımlı Tek Yapılı Sistemlere Ait Hareket Denklemleri

Nagarajaiah ve diğerleri tarafından sunulan sismik yalıtımlı tek yapılara ait hareket denklemlerinde, her bir kat 3 serbestlik derecesi ile ifade edilmektedir [25]. Bu çalışma kapsamında, tek doğrultuda yatay ötelenme serbestlik dereceleri dikkate alınacaktır. Bu sebeple hareket denklemleri, çalışma kapsamında kullanılacak sınırlar çerçevesinde detaylı olarak açıklanmıştır. Denklemler, kütleleri kat hizalarında toplanmış olan ve yalnızca yatay kesme yaylarının yapı rijitliğini temsil ettiği örnek sismik yalıtımlı sistem üzerinden türetilmiştir.

Şekil 2.1’ de yapının temsili şekil değiştirmiş hali ile dinamik yükleme altında katlara ve yalıtım düzlemine etkiyen kuvvetler sunulmuştur. Burada, x^b katların yalıtım düzlemine göre bağıl yer değiştirmelerini, x_b^g yalıtım düzleminin zemine göre bağıl yer değiştirmesini, m kat kütlelerini, m_b yalıtım düzlemi kütlelerini, k kat rijitliklerini, c ilgili kata ait sönüm değerini, F_s yapının taban kesme kuvvetini, F_{iso} izolatör seviyesinde oluşan kesme kuvvetini ve noktalar ise zamana bağlı türevi belirtmektedir. Terimlerde alt indis şeklinde bulunan numaralar, ilgili büyüklüğün hangi kata ait olduğunu göstermektedir. Buna göre, yapının ilk katına ait hareket denklemi 2.1’deki



Şekil 2.1 : Sismik yalıtımlı tek yapının şekil değiştirmiş hali ve serbest cisim diyagramı.

gibi ifade edilebilir.

$$-k_2 [x_2^b - x_1^b] + k_1 x_1^b - c_2 [\dot{x}_2^b - \dot{x}_1^b] + c_1 \dot{x}_1^b = -m_1 \ddot{x}_1^{\text{abs}} \quad (2.1)$$

Dinamik denge, D'Alembert prensibine göre yazılmıştır. Bu prensibe göre, sisteme etkiyen kuvvetlerin yanı sıra, fiktif atalet kuvvetlerinin ivme yönüne ters olarak eklenmesi halinde sistem her zaman anı için denge durumunda bulunmaktadır. Dolayısıyla eşitliğin sağ tarafında yer alan $\ddot{x}_1^{\text{abs}}$ terimi, aşağıdaki denklemde belirtildiği gibi yalıtım düzleminde oluşan ve $\ddot{x}_b^{\text{abs}}$ ile ifade edilen ivmeler ile, dinamik dengenin sağlanabilmesi için denkleme eklenen fiktif $\ddot{x}_1^b$ ivmesinin toplamını ifade etmektedir.

$$\ddot{x}_1^{\text{abs}} = \ddot{x}_1^b + \ddot{x}_b^{\text{abs}} \quad (2.2)$$

Benzer şekilde yapının ikinci katına ait hareket denklemi ve $\ddot{x}_2^{\text{abs}}$ teriminin açılımı aşağıda sunulmuştur.

$$k_2 [x_2^b - x_1^b] + c_2 [\dot{x}_2^b - \dot{x}_1^b] = -m_2 \ddot{x}_2^{\text{abs}} \quad (2.3)$$

$$\ddot{x}_2^{\text{abs}} = \ddot{x}_2^b + \ddot{x}_b^{\text{abs}} \quad (2.4)$$

Yukarıda verilen denklemler düzenlenerek matris formunda yazılırsa aşağıda sunulan denklem elde edilir.

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1^b \\ \ddot{x}_2^b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1^b \\ \dot{x}_2^b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1^b \\ x_2^b \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \ddot{x}_b^{\text{abs}} \quad (2.5)$$

Aşağıdaki denklemde açıklandığı üzere $\ddot{x}_b^{abs}$ terimi, $\ddot{x}_b^g$ ile ifade edilen yalıtım düzleminin zemine göre bağıl ivmesi ile $\ddot{x}_g^{abs}$ ifadesine karşılık gelen yer ivmesinin toplamını belirtmektedir.

$$\ddot{x}_b^{abs} = \ddot{x}_b^g + \ddot{x}_g^{abs} \quad (2.6)$$

Yalıtım düzlemine göre bağıl olarak ifade edilmiş olan yapının hareket denklemi kapalı formda aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{x}}_s^b + \mathbf{C}_s \dot{\mathbf{x}}_s^b + \mathbf{K}_s \mathbf{x}_s^b = -\mathbf{M}_s \mathbf{R} \ddot{x}_b^g - \mathbf{M}_s \mathbf{R} \ddot{x}_g^{abs} \quad (2.7)$$

Burada, $\mathbf{M}_s$ kütle, $\mathbf{C}_s$ sönüm, $\mathbf{K}_s$ rijitlik matrisini, $\mathbf{x}_s$ katların yalıtım düzlemine göre bağıl yer değiştirme vektörünü, $\ddot{x}_b^g$ yalıtım düzleminin zemine göre bağıl ivmesini, $\ddot{x}_g^{abs}$ yer ivmesini, $\mathbf{R}$ deprem etki vektörünü ve noktalar ise zamana bağlı türevleri ifade etmektedir. Elde edilen üst yapı bağıl hareket denkleminde deprem kuvvetlerini oluşturacak ivmeler, yalnızca yalıtım düzleminin mutlak ivmesine eşittir. Dolayısıyla üst yapıya etkiyen deprem kuvvetlerinde yer ivmelerinin doğrudan etkisi bulunmamaktadır.

Serbest cisim diyagramı Şekil 2.1’de verilen yalıtım düzlemi hareket denklemi aşağıda sunulmuştur.

$$-F_s + F_{iso} = -M_b \ddot{x}_b^{abs} \quad (2.8)$$

Eşitlikte bulunan F_s terimi, yapı kesme kuvvetini, F_{iso} , sismik izolatör kesme kuvvetini, M_b yalıtım düzlemi kütleini ifade etmektedir. Burada F_s terimi, yapının tabanında oluşan kesme kuvvetinin yalıtım düzleminde oluşturduğu tepki kuvvetidir. Buna göre yapıda oluşan içsel kesme kuvveti aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$F_s = -\mathbf{R}^T \mathbf{M}_s (\ddot{\mathbf{x}}_s^b + \mathbf{R} \ddot{x}_b^{abs}) \quad (2.9)$$

Denklem 2.6 yerine konarak düzenlenirse, kesme kuvveti aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$F_s = -(\mathbf{R}^T \mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{x}}_s^b + \mathbf{R}^T \mathbf{M}_s \mathbf{R} \ddot{x}_b^g + \mathbf{R}^T \mathbf{M}_s \mathbf{R} \ddot{x}_g^{abs}) \quad (2.10)$$

Denklem 2.8’de belirtilen F_{iso} terimi, sismik izolatörlerin doğrusal olmayan yay kuvvetleri ile izolasyon sisteminde bulunma ihtimali olan doğrusal yay kuvvetleri ve ilave viskoz sönüm kuvvetlerini içermektedir. Buna göre F_{iso} aşağıdaki eşitlikle ifade edilebilir.

$$F_{iso} = F_{iso}^{NL} + K_b x_b^g + C_b \dot{x}_b^g \quad (2.11)$$

Burada, K_b izolasyon sisteminin sahip olması olası doğrusal yayları, C_b ise ilave viskoz sönüm değerini ve F_{iso}^{NL} ise sismik izolatörlerin doğrusal olmayan yay kuvvetlerini temsil etmektedir. Denklem 2.10 ve 2.11, denklem 2.8’de yerine konulursa, yalıtım düzlemine ait hareket denklemi aşağıda sunulduğu şekilde elde edilir.

$$\mathbf{R}^T \mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{x}}_s^b + \mathbf{R}^T \mathbf{M}_s \mathbf{R} \ddot{\mathbf{x}}_b^g + \mathbf{R}^T \mathbf{M}_s \mathbf{R} \ddot{\mathbf{x}}_g^{abs} + F_{iso}^{NL} + K_b x_b^g + C_b \dot{x}_b^g = -M_b \ddot{x}_b^g - M_b \ddot{x}_g^{abs} \quad (2.12)$$

Böylece bina ve yalıtım düzlemi bağlı hareket denklemleri ayrıklaştırılarak elde edilmiş olur. Denklem 2.7 ve 2.12’nin düzenlenerek matris formunda yazılması ile aşağıda sunulan tüm yapıya ait hareket denklemi elde edilir.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \mathbf{M}_s & \mathbf{M}_s \mathbf{R} \\ \mathbf{R}^T \mathbf{M}_s & \mathbf{R}^T \mathbf{M}_s \mathbf{R} + M_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{x}}_s^b \\ \ddot{x}_b^g \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_s & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & C_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{x}}_s^b \\ \dot{x}_b^g \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_s & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & K_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{x}_s^b \\ x_b^g \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ 1 \end{Bmatrix} F_{iso}^{NL} = \\ - \begin{bmatrix} \mathbf{M}_s & \mathbf{M}_s \mathbf{R} \\ \mathbf{R}^T \mathbf{M}_s & \mathbf{R}^T \mathbf{M}_s \mathbf{R} + M_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ 1 \end{Bmatrix} \ddot{x}_g^{abs} \end{aligned} \quad (2.13)$$

Eşitliğin kapalı halde yazılması ile sismik yalıtımlı tek yapılara ait hareket denklemi aşağıda belirtildiği gibi tanımlanabilir.

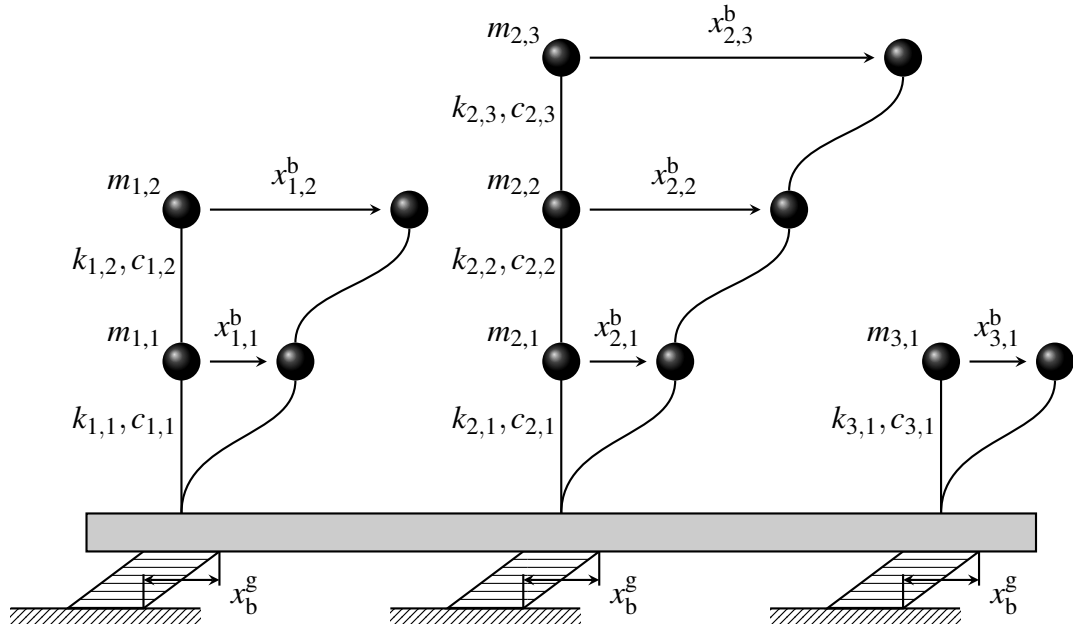
$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K} \mathbf{x} + \mathbf{S}_1 F_{iso}^{NL} = -\mathbf{M} \mathbf{S}_1 \ddot{x}_g^{abs} \quad (2.14)$$

Burada, $\mathbf{M}$, $\mathbf{C}$ ve $\mathbf{K}$ tüm yapıya ait sırasıyla kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini, $\mathbf{x}$ yapı yer değiştirme vektörünü ve $\mathbf{S}_1$ ise etki vektörünü ifade etmektedir. Denklemden belirtilen terimlerin açık hali aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned} \mathbf{M} &= \begin{bmatrix} \mathbf{M}_s & \mathbf{M}_s \mathbf{R} \\ \mathbf{R}^T \mathbf{M}_s & \mathbf{R}^T \mathbf{M}_s \mathbf{R} + M_b \end{bmatrix} & \mathbf{M}_s &= \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \\ \mathbf{C} &= \begin{bmatrix} \mathbf{C}_s & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & C_b \end{bmatrix} & \mathbf{C}_s &= \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \\ \mathbf{K} &= \begin{bmatrix} \mathbf{K}_s & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & K_b \end{bmatrix} & \mathbf{K}_s &= \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \\ \ddot{\mathbf{x}} &= \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{x}}_s^b \\ \ddot{x}_b^g \end{Bmatrix} & \ddot{\mathbf{x}}_s^b &= \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1^b \\ \ddot{x}_2^b \end{Bmatrix} & \dot{\mathbf{x}} &= \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{x}}_s^b \\ \dot{x}_b^g \end{Bmatrix} & \dot{\mathbf{x}}_s^b &= \begin{Bmatrix} \dot{x}_1^b \\ \dot{x}_2^b \end{Bmatrix} & \mathbf{x} &= \begin{Bmatrix} \mathbf{x}_s^b \\ x_b^g \end{Bmatrix} & \mathbf{x}_s^b &= \begin{Bmatrix} x_1^b \\ x_2^b \end{Bmatrix} \\ \mathbf{S}_1 &= \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ 1 \end{Bmatrix} & \mathbf{R} &= \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \end{aligned}$$

2.3 Sismik Yalıtımlı Çok Yapılı Sistemlere Ait Hareket Denklemleri

Sismik yalıtımlı çoklu yapılara ait hareket denklemleri Tsopelas ve diğerleri tarafından açıklanmıştır [28]. Yapılan çalışmada, düzlem içi rijitlikleri sonsuz yapı katlarını temsil eden toplu kütlelerin iki yatay ötelenme ve bir dönme olmak üzere toplam üç adet serbestlik derecesi bulunmaktadır. Kütle merkezlerinde konumlanan bu serbestlik dereceleri, yalıtım düzlemi kütle merkezinden geçen düşey referans aksa göre eksantrik olarak tanımlanabilmektedir. Tez çalışması kapsamında ortak yalıtım düzleminde bulunan çoklu yapıların parametrik değişkenler altında yapı davranışları, yalnızca tek doğrultuda yatay ötelenme serbestlik dereceleri dikkate alınarak incelenmiştir. Bu sebeple hareket denklemleri, Şekil 2.2’de sunulan örnek yapı üzerinden türetilacaktır.



Şekil 2.2 : Sismik yalıtımlı çoklu yapıların şekil değiştirmiş hali.

Burada, m kat kütlelerini, c kat sönümünü, k rijitlik değerini ve x ise yer değiştirmeleri belirtmektedir. Üst indiste büyüklüğün görece olarak yazıldığı konum belirtilmiştir. Yapı kat yer değiştirmelerinde alt indislerde verilen ilk rakam yapı numarasını, ikinci rakam ise büyüklüğün hangi kata ait olduğunu işaret etmektedir. Yalıtım düzlemi yer değiştirmesi veya izolator deplasmanları ise x_b^g ile verilmiştir.

Üst yapıların yalıtım düzlemine göre bağıl olarak ifade edildiği hareket denklemi 2.5’de verilmiştir. Bu doğrultuda Şekil 2.2’de iki katlı ilk yapı için hareket denklemi

aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} m_{1,1} & 0 \\ 0 & m_{1,2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_{1,1}^b \\ \ddot{x}_{1,2}^b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{1,1} + c_{1,2} & -c_{1,2} \\ -c_{1,2} & c_{1,2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_{1,1}^b \\ \dot{x}_{1,2}^b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{1,1} + k_{1,2} & -k_{1,2} \\ -k_{1,2} & k_{1,2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_{1,1}^b \\ x_{1,2}^b \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_{1,1} & 0 \\ 0 & m_{1,2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} (\ddot{x}_b^g + \ddot{x}_g^{\text{abs}}) \quad (2.15)$$

Birinci yapı için hareket denkleminin kapalı hali aşağıda sunulmuştur.

$$\mathbf{M}_{s,1} \ddot{\mathbf{x}}_{s,1}^b + \mathbf{C}_{s,1} \dot{\mathbf{x}}_{s,1}^b + \mathbf{K}_{s,1} \mathbf{x}_{s,1}^b = -\mathbf{M}_{s,1} \mathbf{R}_1 (\ddot{x}_b^g + \ddot{x}_g^{\text{abs}}) \quad (2.16)$$

Bölüm 2.2’de açıklanan terimlerden farklı olarak, alt indislerde bulunan rakamlar, matris veya vektörlerin hangi yapıya ait olduklarını belirtmektedir. Buna göre ikinci yapının hareket denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} m_{2,1} & 0 & 0 \\ 0 & m_{2,2} & 0 \\ 0 & 0 & m_{2,3} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_{2,1}^b \\ \ddot{x}_{2,2}^b \\ \ddot{x}_{2,3}^b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{2,1} + c_{2,2} & -c_{2,2} & 0 \\ -c_{2,2} & c_{2,2} + c_{2,3} & -c_{2,3} \\ 0 & -c_{2,3} & c_{2,3} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_{2,1}^b \\ \dot{x}_{2,2}^b \\ \dot{x}_{2,3}^b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{2,1} + k_{2,2} & -k_{2,2} & 0 \\ -k_{2,2} & k_{2,2} + k_{2,3} & -k_{2,3} \\ 0 & -k_{2,3} & k_{2,3} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_{2,1}^b \\ x_{2,2}^b \\ x_{2,3}^b \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_{2,1} & 0 & 0 \\ 0 & m_{2,2} & 0 \\ 0 & 0 & m_{2,3} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix} (\ddot{x}_b^g + \ddot{x}_g^{\text{abs}}) \quad (2.17)$$

Denklemin kapalı formu aşağıda yer almaktadır.

$$\mathbf{M}_{s,2} \ddot{\mathbf{x}}_{s,2}^b + \mathbf{C}_{s,2} \dot{\mathbf{x}}_{s,2}^b + \mathbf{K}_{s,2} \mathbf{x}_{s,2}^b = -\mathbf{M}_{s,2} \mathbf{R}_2 (\ddot{x}_b^g + \ddot{x}_g^{\text{abs}}) \quad (2.18)$$

Üçüncü yapıya ait hareket denklemi de aşağıda sunulmuştur.

$$[m_{3,1}] \{\ddot{x}_{3,1}^b\} + [c_{3,1}] \{\dot{x}_{3,1}^b\} + [k_{3,1}] \{x_{3,1}^b\} = -[m_{3,1}] \{1\} (\ddot{x}_b^g + \ddot{x}_g^{\text{abs}}) \quad (2.19)$$

Birinci ve ikinci yapıya benzer olarak hareket denkleminin kapalı formu aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$M_{s,3} \ddot{x}_{s,3}^b + C_{s,3} \dot{x}_{s,3}^b + K_{s,3} x_{s,3}^b = -M_{s,3} R_3 (\ddot{x}_b^g + \ddot{x}_g^{\text{abs}}) \quad (2.20)$$

Kat hizalarında birbirlerinden bağımsız ve ortak yalıtım düzleminde bulunan üç yapıya ait bağıl hareket denklemleri tek bir denklem ile ifade edilmek istenirse matris formunda aşağıda sunulduğu şekilde yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{s,1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_{s,2} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & M_{s,3} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{x}}_{s,1}^b \\ \ddot{\mathbf{x}}_{s,2}^b \\ \ddot{x}_{s,3}^b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{s,1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_{s,2} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & C_{s,3} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{x}}_{s,1}^b \\ \dot{\mathbf{x}}_{s,2}^b \\ \dot{x}_{s,3}^b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{s,1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_{s,2} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & K_{s,3} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{x}_{s,1}^b \\ \mathbf{x}_{s,2}^b \\ x_{s,3}^b \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{s,1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_{s,2} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & M_{s,3} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{R}_1 \\ \mathbf{R}_2 \\ R_3 \end{Bmatrix} (\ddot{x}_b^g + \ddot{x}_g^{\text{abs}}) \quad (2.21)$$

Verilen hareket denkleminin kapalı formda yazılışı ise aşağıdaki gibidir.

$$\mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{x}}_s^b + \mathbf{C}_s \dot{\mathbf{x}}_s^b + \mathbf{K}_s \mathbf{x}_s^b = -\mathbf{M}_s \mathbf{R}(\dot{\mathbf{x}}_b^g + \dot{\mathbf{x}}_g^{abs}) \quad (2.22)$$

Böylece üst yapılara ait göreceli hareket denklemleri birbirinden farklı kat adetlerine sahip üç yapı için elde edilmiştir. Bu doğrultuda birbirlerinden farklı yapısal özelliklerde ve kat adetlerinde n yapı tanımlanabilir. Hareket denklemlerinin ayrıklaştırılmasının bir sonucu olarak Şekil 2.3’de serbest cisim diyagramı verilen yalıtım düzleminin hareket denklemi belirtilen kuvvetlere göre yazılmalıdır.

Üst yapılara ait taban kesme kuvvetleri sırasıyla aşağıdaki eşitliklerde sunulmuştur.

$$F_{s,1} = -(\mathbf{R}_1^T \mathbf{M}_{s,1} \ddot{\mathbf{x}}_{s,1}^b + \mathbf{R}_1^T \mathbf{M}_{s,1} \mathbf{R}_1 \dot{\mathbf{x}}_b^g + \mathbf{R}_1^T \mathbf{M}_{s,1} \mathbf{R}_1 \dot{\mathbf{x}}_g^{abs}) \quad (2.23)$$

$$F_{s,2} = -(\mathbf{R}_2^T \mathbf{M}_{s,2} \ddot{\mathbf{x}}_{s,2}^b + \mathbf{R}_2^T \mathbf{M}_{s,2} \mathbf{R}_2 \dot{\mathbf{x}}_b^g + \mathbf{R}_2^T \mathbf{M}_{s,2} \mathbf{R}_2 \dot{\mathbf{x}}_g^{abs}) \quad (2.24)$$

$$F_{s,3} = -(\mathbf{R}_3^T \mathbf{M}_{s,3} \ddot{\mathbf{x}}_{s,3}^b + \mathbf{R}_3^T \mathbf{M}_{s,3} \mathbf{R}_3 \dot{\mathbf{x}}_b^g + \mathbf{R}_3^T \mathbf{M}_{s,3} \mathbf{R}_3 \dot{\mathbf{x}}_g^{abs}) \quad (2.25)$$

Yapı adedine bağlı olarak elde edilen tüm denklemler, toplam üst yapı taban kesme kuvvetini elde etmek amacıyla bir denklem ile ifade edilmek istenirse aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$F_s = -(\mathbf{R}^T \mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{x}}_s^b + \mathbf{R}^T \mathbf{M}_s \mathbf{R} \dot{\mathbf{x}}_b^g + \mathbf{R}^T \mathbf{M}_s \mathbf{R} \dot{\mathbf{x}}_g^{abs}) \quad (2.26)$$

Yalıtım biriminde meydana gelen kayma deformasyonları neticesinde ortaya çıkan kuvvetler ile yalıtım biriminin sahip olması olası doğrusal yay kuvvetleri ve ilave viskoz sönüm kuvvetleri toplamı aşağıda belirtilen F_{iso} değişkeni altında ifade edilir.

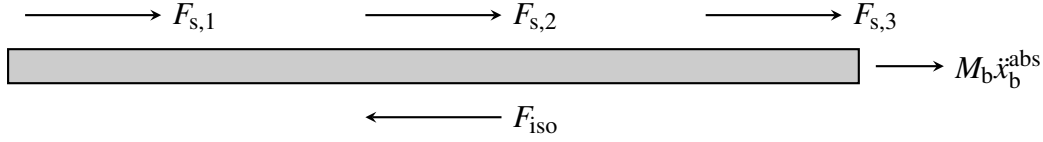
$$F_{iso} = F_{iso}^{NL} + K_b \dot{\mathbf{x}}_b^g + C_b \dot{\mathbf{x}}_b^g \quad (2.27)$$

Denklem 2.26 ve 2.27 göz önünde bulundurularak Şekil 2.3’de serbest cisim diyagramı verilen yalıtım düzlemi hareket denklemi yalnız biçimde aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$-F_s + F_{iso} = -M_b \ddot{\mathbf{x}}_b^{abs} \quad (2.28)$$

Denklem 2.26 ve 2.27 denklem 2.28’da yerine konursa hareket denklemi açık biçimde aşağıda verilen biçimi alır.

$$\mathbf{R}^T \mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{x}}_s^b + \mathbf{R}^T \mathbf{M}_s \mathbf{R} \dot{\mathbf{x}}_b^g + \mathbf{R}^T \mathbf{M}_s \mathbf{R} \dot{\mathbf{x}}_g^{abs} + F_{iso}^{NL} + K_b \dot{\mathbf{x}}_b^g + C_b \dot{\mathbf{x}}_b^g = -M_b \ddot{\mathbf{x}}_b^g - M_b \ddot{\mathbf{x}}_g^{abs} \quad (2.29)$$



Şekil 2.3 : Yalıtım düzleminin serbest cisim diyagramı.

Ortak yalıtım düzleminde bulunan çoklu yapılara ait hareket denklemi, sonuç olarak denklem 2.22 ve 2.29'un matris formunda düzenlenerek yazılması halinde aşağıda verildiği gibi elde edilir.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_s & \mathbf{M}_s \mathbf{R} \\ \mathbf{R}^T \mathbf{M}_s & \mathbf{R}^T \mathbf{M}_s \mathbf{R} + M_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{x}}_s^b \\ \ddot{x}_b^g \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_s & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & C_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{x}}_s^b \\ \dot{x}_b^g \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_s & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & K_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{x}_s^b \\ x_b^g \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ 1 \end{Bmatrix} F_{iso}^{NL} = - \begin{bmatrix} \mathbf{M}_s & \mathbf{M}_s \mathbf{R} \\ \mathbf{R}^T \mathbf{M}_s & \mathbf{R}^T \mathbf{M}_s \mathbf{R} + M_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ 1 \end{Bmatrix} \ddot{x}_g^{abs} \quad (2.30)$$

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K} \mathbf{x} + \mathbf{S}_1 F_{iso}^{NL} = -\mathbf{M} \mathbf{S}_1 \ddot{x}_g^{abs} \quad (2.31)$$

Burada, $\mathbf{M}$, $\mathbf{C}$ ve $\mathbf{K}$ tüm yapıya ait sırasıyla kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini, $\mathbf{x}$ yapı yer değiştirme vektörünü ve $\mathbf{S}_1$ ise etki vektörünü ifade etmektedir. Denklemden belirtilen terimlerin açık hali aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned} \mathbf{M} &= \begin{bmatrix} \mathbf{M}_s & \mathbf{M}_s \mathbf{R} \\ \mathbf{R}^T \mathbf{M}_s & \mathbf{R}^T \mathbf{M}_s \mathbf{R} + M_b \end{bmatrix} & \mathbf{M}_s &= \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{s,1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_{s,2} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & M_{s,3} \end{bmatrix} \\ \mathbf{C} &= \begin{bmatrix} \mathbf{C}_s & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & C_b \end{bmatrix} & \mathbf{C}_s &= \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{s,1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_{s,2} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & C_{s,3} \end{bmatrix} \\ \mathbf{K} &= \begin{bmatrix} \mathbf{K}_s & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & K_b \end{bmatrix} & \mathbf{K}_s &= \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{s,1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_{s,2} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & K_{s,3} \end{bmatrix} \\ \ddot{\mathbf{x}} &= \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{x}}_s^b \\ \ddot{x}_b^g \end{Bmatrix} & \ddot{\mathbf{x}}_s^b &= \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{x}}_{s,1}^b \\ \ddot{\mathbf{x}}_{s,2}^b \\ \ddot{x}_{s,3}^b \end{Bmatrix} & \dot{\mathbf{x}} &= \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{x}}_s^b \\ \dot{x}_b^g \end{Bmatrix} & \dot{\mathbf{x}}_s^b &= \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{x}}_{s,1}^b \\ \dot{\mathbf{x}}_{s,2}^b \\ \dot{x}_{s,3}^b \end{Bmatrix} & \mathbf{x} &= \begin{Bmatrix} \mathbf{x}_s^b \\ x_b^g \end{Bmatrix} \\ & & \mathbf{x}_s^b &= \begin{Bmatrix} x_{s,1}^b \\ x_{s,2}^b \\ x_{s,3}^b \end{Bmatrix} \\ \mathbf{S}_1 &= \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ 1 \end{Bmatrix} & \mathbf{R} &= \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \end{aligned}$$

2.4 Hareket Denklemlerinin Doğrusal Olmayan Çözüm Yöntemi

Tez çalışması kapsamında hareket denklemlerinin nümerik çözümünde Newmark tarafından sunulan yöntem kullanılmıştır [20]. Her bir zaman adımı içerisinde dinamik denge, Newton-Raphson yöntemi ile iterasyon yapılarak sağlanmıştır. Doğrusal olmayan sistemlere ait genel hareket denklemi,

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{F}_s(t) = \mathbf{P}(t) \quad (2.32)$$

formunda verilir. Burada, $\mathbf{u}$ yer değiştirme vektörünü, $\mathbf{M}$ kütle matrisini, $\mathbf{C}$ sönüm matrisini, $\mathbf{F}_s$ yapı tarafından oluşturulan yer değiştirmeye bağlı kuvvet fonksiyonunu, $\mathbf{P}$ ise deprem kuvvetini ve noktalar ise zamana bağlı türevleri ifade etmektedir. Hareket denkleminin, herhangi bir t ve $t + \Delta t$ zaman aralığında yazılması durumunda denklem,

$$\mathbf{M}\Delta\ddot{\mathbf{u}}_i + \mathbf{C}\Delta\dot{\mathbf{u}}_i + \Delta\mathbf{F}_{s,i} = \Delta\mathbf{P}_i \quad (2.33)$$

artımsal formunu almaktadır. Burada i alt indisi, Δt aralıklarla belirlenen t zaman adımlarını ifade etmektedir. Newmark yönteminin kullandığı denklemler denklem 2.34 ve 2.35’de verilmiştir. Tez çalışmasında, $\beta = 1/4$ ve $\gamma = 1/2$ değerlerine karşı gelen sabit ortalama ivme durumu kullanılmıştır.

$$\dot{\mathbf{u}}_{i+1} = \dot{\mathbf{u}}_i + [(1 - \gamma)\Delta t]\ddot{\mathbf{u}}_i + (\gamma\Delta t)\ddot{\mathbf{u}}_{i+1} \quad (2.34)$$

$$\mathbf{u}_{i+1} = \mathbf{u}_i + (\Delta t)\dot{\mathbf{u}}_i + [(0.5 - \beta)(\Delta t)^2]\ddot{\mathbf{u}}_i + [\beta(\Delta t)^2]\ddot{\mathbf{u}}_{i+1} \quad (2.35)$$

Bu denklemler artımsal formda yazılarak hız ve ivme denklemleri elde edilir.

$$\Delta\dot{\mathbf{u}}_i = \frac{\gamma}{\beta\Delta t}\Delta\mathbf{u}_i - \frac{\gamma}{\beta}\dot{\mathbf{u}}_i + \Delta t(1 - \frac{\gamma}{2\beta})\ddot{\mathbf{u}}_i \quad (2.36)$$

$$\Delta\ddot{\mathbf{u}}_i = \frac{1}{\beta\Delta t^2}\Delta\mathbf{u}_i - \frac{1}{\beta\Delta t}\dot{\mathbf{u}}_i - \frac{1}{2\beta}\ddot{\mathbf{u}}_i \quad (2.37)$$

Denklem 2.36 ve 2.37, denklem 2.33’ün yerine konulursa hareket denkleminin cebirsel formu aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\mathbf{A}\Delta\mathbf{u}_i + \Delta\mathbf{F}_{s,i} = \Delta\hat{\mathbf{P}}_i \quad (2.38)$$

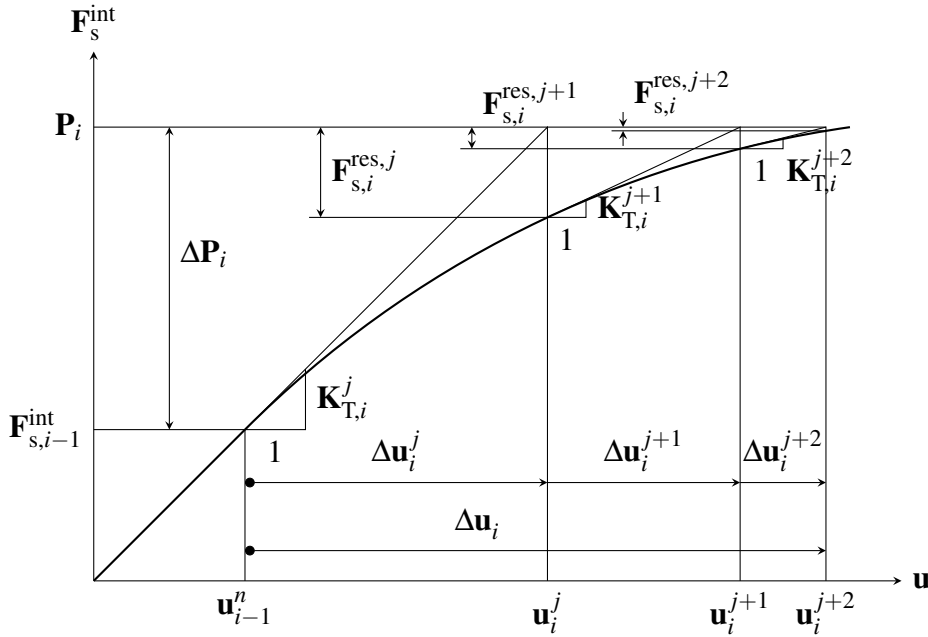
Burada $\mathbf{A}$ ve $\Delta\hat{\mathbf{P}}_i$ terimleri aşağıda belirtilmiştir.

$$\mathbf{A} = \frac{1}{\beta\Delta t^2}\mathbf{M} + \frac{\gamma}{\beta\Delta t}\mathbf{C} \quad (2.39)$$

$$\Delta\hat{\mathbf{P}}_i = \Delta\mathbf{P}_i + \left(\frac{1}{\beta\Delta t}\mathbf{M} + \frac{\gamma}{\beta}\mathbf{C}\right)\dot{\mathbf{u}}_i + \left[\frac{1}{2\beta}\mathbf{M} + \Delta t\left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1\right)\mathbf{C}\right]\ddot{\mathbf{u}}_i \quad (2.40)$$

Dolayısıyla, her zaman aralığı için denklem 2.38 ile verilen hareket denkleminin ilk iki terimi $\Delta\mathbf{u}$ 'ya bağlıdır. Yapıya etkiyen kuvvetler altında, $\Delta\mathbf{F}_{s,i}$ fonksiyonunun doğrusalsızlığı sebebi ile yer değiştirme vektörü bilinmemektedir. Bu nedenle, $\Delta\mathbf{u}$ teriminin doğru olarak bulunabilmesi ve yapının dinamik dengesinin sağlanabilmesi amacıyla aynı zaman aralığı içinde iterasyon yapılmaktadır.

İterasyonun ilk adımında $\Delta\mathbf{u}_i^j$ yaklaşık olarak hesaplanır. Bu sebeple i zaman adımı için bilinen gerçek bünye denkleminde teğet fiktif rijitlik matrisi $\mathbf{K}_{T,i}^j$ oluşturulur. Şekil 2.4'de doğrusal olmayan bünye denklemi üzerinde gerçekleştirilen Newton-Raphson iterasyonları gösterilmiştir.



Şekil 2.4 : Newton-Raphson yöntemi.

Burada j üst indisi Newton-Raphson adımlarını ifade etmektedir. Buna göre fiktif teğetsel rijitlik matrisi kullanılarak aşağıdaki eşitlik yazılır.

$$\Delta\mathbf{F}_{s,i}^{\text{fictive},j} = \mathbf{K}_{T,i}^j\Delta\mathbf{u}_i^j \quad (2.41)$$

Denklem 2.38’de bulunan $\Delta \mathbf{F}_{s,i}$ terimi yerine denklem 2.41 konularak düzenlenirse aşağıda verilen eşitlik elde edilir ve $\Delta \mathbf{u}_i^j$ yaklaşık olarak hesaplanır.

$$\Delta \mathbf{u}_i^j = \Delta \hat{\mathbf{P}}_i (\mathbf{A} + \mathbf{K}_{T,i}^j)^{-1} \quad (2.42)$$

Newton-Raphson iterasyonunun j adımı için yaklaşık olarak hesaplanan yer değiştirmeler altında yapının oluşturacağı doğrusal ve doğrusal olmayan kuvvetlerin toplamı $F_{s,i}^{j,int}$ terimi ile ifade edilir. Böylece j iterasyonuna ait dengelenmemiş kuvvet aşağıda verilen denklem ile bulunur.

$$\Delta \mathbf{F}_{s,i}^{res,j} = \Delta \mathbf{F}_{s,i}^{fictive,j} - \mathbf{F}_{s,i}^{int,j} \quad (2.43)$$

Dengelenmemiş kuvvet, i zaman adımı içinde yapıya dış kuvvet olarak aktarılır. Böylece Newton-Raphson iterasyonunun $j + 1$ adımı için çözülmesi gereken denklem aşağıda verilmiştir.

$$\mathbf{A} \Delta \mathbf{u}_i^{j+1} + \Delta \mathbf{F}_{s,i}^{j+1} = \Delta \mathbf{F}_{s,i}^{res,j+1} \quad (2.44)$$

Denklem 2.41’te belirtildiği gibi $j + 1$ iterasyonu için de denklem 2.45 yazılır.

$$\Delta \mathbf{F}_{s,i}^{fictive,j+1} = \mathbf{K}_{T,i}^{j+1} \Delta \mathbf{u}_i^{j+1} \quad (2.45)$$

Böylece dengelenmemiş kuvvetin oluşturacağı yer değiştirme aşağıdaki formül ile bulunur.

$$\Delta \mathbf{u}_i^{j+1} = \Delta \mathbf{F}_{s,i}^{res,j+1} (\mathbf{A} + \mathbf{K}_{T,i}^{j+1})^{-1} \quad (2.46)$$

$j + 1$ iterasyon adımına ait dengelenmemiş kuvvet aşağıdaki denklem ile bulunur.

$$\Delta \mathbf{F}_{s,i}^{res,j+1} = \Delta \mathbf{F}_{s,i}^{fictive,j+1} - \mathbf{F}_{s,i}^{int,j+1} \quad (2.47)$$

Burada $F_{s,i}^{j+1,int}$ terimi $\Delta \mathbf{u}_i^{j+1}$ yer değiştirmesine karşılık gelen yapının oluşturduğu içsel kuvvetlerin toplamını ifade etmektedir. Newton-Raphson iterasyonları $\Delta \mathbf{u}_i^j$ veya $\Delta \mathbf{F}_{s,i}^{res,j}$ terimleri belirlenen hata sınırları içinde kalana kadar devam ettirilir. İterasyonlar sonucunda i zaman adımına ait yer değiştirme ve kuvvet terimleri aşağıdaki formüller ile bulunur.

$$\Delta \mathbf{u}_i = \sum_{j=1}^n \Delta \mathbf{u}_i^j \quad (2.48)$$

$$\Delta \mathbf{F}_{s,i}^{int} = \sum_{j=1}^n \mathbf{F}_{s,i}^{int,j} \quad (2.49)$$

Yukarıda bahsedilen algoritmaların detayları, Erkus tarafından hazırlanan konferans makalesinde bulunabilir [35].

2.5 Yapısal Sönüm Modeli

Bu bölümde, çalışma kapsamında incelenen yapılarda kullanılan sönüm modelleri açıklanacaktır.

2.5.1 Üst yapı sönüm modeli

Yalıtım düzlemine göre bağıl olarak elde edilen üst yapı hareket denklemlerinde Rayleigh sönüm matrisi kullanılmıştır. Sönüm matrisinin genel hali denklem 2.50 ile gösterilmiştir.

$$\mathbf{c} = a_0 \mathbf{m} + a_1 \mathbf{k} \quad (2.50)$$

Burada c sönüm, m , kütle, k , rijitlik matrisini ve a_0 ile a_1 parametreleri ise Rayleigh sönüm matrisinin elde edilmesi için gerekli kütle ve rijitlik matrisi çarpanlarını ifade etmektedir. Yapının seçilen iki açısallık frekans değerine karşılık gelen sönüm oranları ile belirlenen bu katsayılar aşağıdaki denklem yardımıyla bulunmaktadır.

$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1/\omega_i & \omega_i \\ 1/\omega_j & \omega_j \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \xi_i \\ \xi_j \end{Bmatrix} \quad (2.51)$$

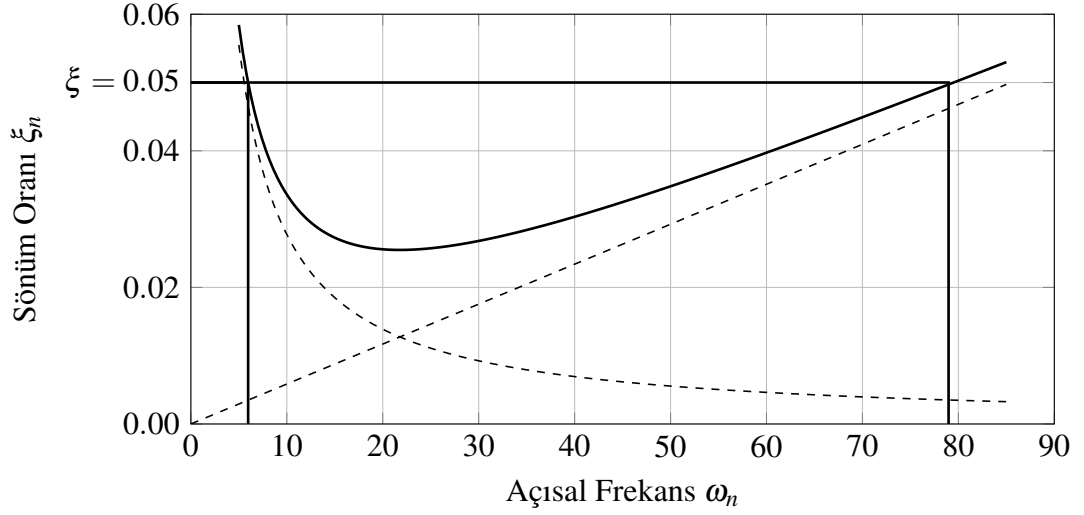
Burada ω_i ve ω_j tabanı ankastre olan üst yapının sırasıyla birinci ve sonuncu moduna ait açısallık frekansı, ξ_i ve ξ_j belirtilen açısallık frekanslara karşı gelen sönüm oranlarını ifade etmektedir. Burada her iki sönüm oranının eşit seçilmesi durumunda denklem aşağıdaki biçimde yazılabilir.

$$a_0 = \xi \frac{2\omega_i\omega_j}{\omega_i + \omega_j} \quad a_1 = \xi \frac{2}{\omega_i + \omega_j} \quad (2.52)$$

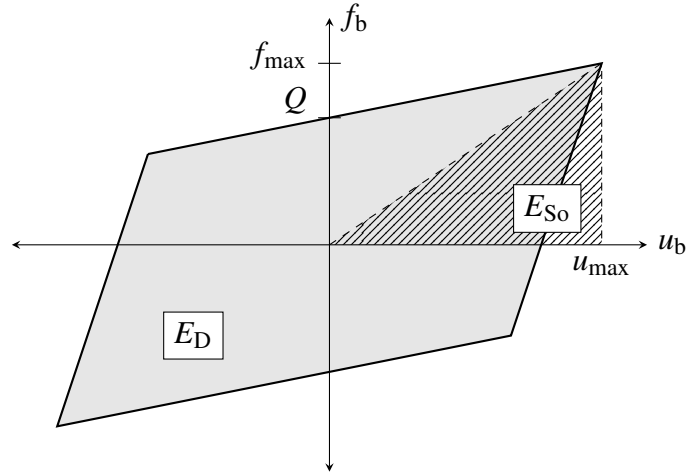
Buna göre, incelenen yapılarda açısallık frekans çok serbestlik dereceli yapının ilk ve son modlarına ait periyotlardan elde edilmiştir. Her iki açısallık frekansa karşılık sönüm oranı %5 seçilmiştir. Şekil 2.5’de çalışmada kullanılan 2 katlı yapıya ait Rayleigh sönüm grafiği gösterilmiştir. Tez kapsamında incelenen diğer yapıların açısallık frekansları Çizelge 3.1’de verilmiştir.

2.5.2 Histeretik sönümün eşdeğer sönüme çevrilmesi

Yalıtım birimlerinin sönümlediği enerji miktarı, doğrusal olmayan kesme yaylarının Şekil 2.6 ile gösterilen kuvvet-yer değiştirme grafiğinin taradığı alandan hesaplanmaktadır.



Şekil 2.5 : Rayleigh sönümü ve modal sönüm oranlarının açısal frekanslara bağlı değişimi.



Şekil 2.6 : Kuvvet-yer değiştirme grafiğinde bir çevrimde sönümlenen enerji miktarı ve doğrusal şekil değiştirme enerjisi.

Sönümlenen enerji, eşdeğer viskoz sönüm oranı cinsinden aşağıda verilen formülle hesaplanmıştır.

$$\xi_{\text{eff}} = \frac{1}{4\pi} \frac{E_D}{E_{S_0}} \quad (2.53)$$

Burada, E_D , kuvvet-yer değiştirme grafiğinin bir çevriminde taradığı alanı, E_{S_0} ise eşdeğer rijitlik ile ifade edilen şekil değiştirme enerjisini tarif etmektedir. E_D ile tanımlanan histeretik eğri içinde kalan alan aşağıdaki verilen formül ile hesaplanmıştır.

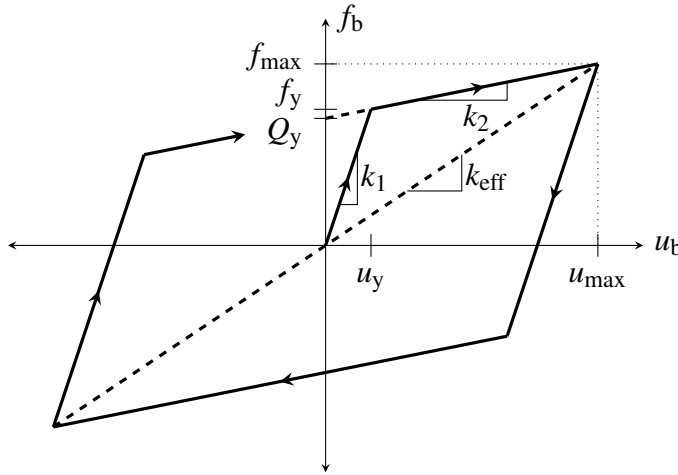
$$E_D = 4Q(u_{\text{max}} - u_y) \quad (2.54)$$

Doğrusal şekil değiştirme enerjisi E_{S_0} ise aşağıdaki formül ile bulunmaktadır.

$$E_{\text{So}} = \frac{k_{\text{eff}} u_{\text{max}}^2}{2} \quad (2.55)$$

2.6 Sismik Yalıtımlı Yapıların Eşdeğer Doğrusal Analiz Yöntemi

Sismik yalıtımlı yapıların eşdeğer periyot ve sönüm değerlerinin bulunmasında kullanılan iteratif hesap adımları aşağıda sıralanmıştır. Yalıtım birimlerinin histeretik eğrilerini meydana getiren parametreler Şekil 2.7 ile gösterilmiştir.



Şekil 2.7 : Yalıtım birimlerinin histeretik davranışı.

1. Yalıtım düzlemi ve üst yapı kütlesi hesaplanır.
2. Kolonlarda oluşan eksenel kuvvetlere bağlı olarak izolatör boyutlandırılması yapılır.
3. Seçilen izolatöre ait birincil (k_1) ve ikincil rijitlik (k_2), akma kuvveti (f_y), akma yer değiştirmesi (u_y) belirlenir.
4. Tasarımın yapılacağı deprem düzeyine uygun tasarım spektrumu tanımlanır.
5. Belirlenen toplam yapı kütlesi (M) ve birincil rijitliğe (k_1) bağlı olarak yalıtım periyodu belirlenir.

$$T_{\text{iso}} = 2\pi\sqrt{\frac{M}{k_1}} \quad (2.56)$$

6. İterasyonun ilk adımı için efektif periyot ve efektif sönüm kabulleri yapılır. Örnek olarak efektif periyot yalıtım periyodunun üç katı, efektif sönüm ise %20 kabul

edilebilir (Bu değerler tipik izolatörlü yapılar için uygun olup, yapıdan yapıya göre farklılık gösterebilir).

$$T_{\text{eff}}^i = 3T_{\text{iso}} \quad \xi_{\text{eff}}^i = 0.2 \quad (2.57)$$

7. Kabul edilen eşdeğer periyoda karşılık gelen eşdeğer rijitlik değeri hesaplanır.

$$k_{\text{eff}}^i = (T_{\text{eff}}^i)^2 / 4\pi^2 \times M \quad (2.58)$$

8. Kabul edilen eşdeğer sönüm oranı için sönüm düzeltme katsayısı hesaplanarak tasarım spektrumu ordinatları bu katsayı ile çarpılır. Örnek olarak Eurocode 8 sönüm düzeltme katsayısı denklem 2.59 şeklinde verilmiştir [19].

$$\eta^i = \sqrt{10 / (5 + \xi_{\text{eff}}^i)} \quad (2.59)$$

9. Eşdeğer periyot ve sönüme karşılık gelen spektral ivme ile toplam yapı kütlesi çarpılarak kesme kuvveti bulunur.

$$F_s^i = M \times S_{\text{ea}}(T_{\text{eff}}^i, \xi_{\text{eff}}^i) \quad (2.60)$$

10. Kesme kuvvetinin eşdeğer rijitliğe bölünmesi ile en büyük yer değiştirme değeri hesaplanır.

$$u_{\text{max}}^{i+1} = F_s^i / k_{\text{eff}}^i \quad (2.61)$$

11. En büyük yer değiştirme değerine bağlı olarak eşdeğer rijitlik değeri güncellenir.

$$k_{\text{eff}}^{i+1} = k_2 + (u_y / u_{\text{max}}^{i+1}) \times (k_1 - k_2) \quad (2.62)$$

12. Değişen eşdeğer rijitlik değerine karşılık, eşdeğer periyot ve sönüm değeri güncellenir.

$$T_{\text{eff}}^{i+1} = 2\pi \sqrt{\frac{M}{k_{\text{eff}}^{i+1}}} \quad \xi_{\text{eff}}^{i+1} = \frac{4Q(u_{\text{max}}^{i+1} - u_y)}{2\pi k_{\text{eff}}^{i+1} (u_{\text{max}}^{i+1})^2} \quad (2.63)$$

13. Eşdeğer sönüm değerine bağlı olarak yeni sönüm düzeltme katsayısı hesaplanarak tasarım spektrumu ordinatları güncellenir.

$$\eta^{i+1} = \sqrt{10 / (5 + \xi_{\text{eff}}^{i+1})} \quad (2.64)$$

14. En büyük yer değıştirme değeri bir önceki adımda bulunan değeri göre farkının belirlenen toleransların altında kalıp kalmadığı kontrol edilir.

$$u_{\max}^{i+1} - u_{\max}^i < 10^{-6} \quad (2.65)$$

Yalıtım birimi yer değıştirme değeri ardışık iki adım arasındaki farkı, toleranslardan daha büyük ise 9. ve 14. adımlar tekrarlanır. Sonuç olarak yalıtım birimlerinin tasarımın yapıldığı deprem düzeyine karşılık en büyük yer değıştirme, eşdeğer rijitlik, periyot ve sönüm değeri belirlenmiş olur. Kullanılan yönetmeliğe bağlı olarak yapı taban kesme kuvveti ve kat kesme kuvvetleri belirlenir. EN 1998-1 yönetmeliğine göre kesme kuvvetleri denklem 2.66 ile belirlenir [19].

$$f_j = m_j S_{ae}(T_{\text{eff}}, \xi_{\text{eff}}) \quad (2.66)$$

ASCE/SEI 7-10 (2010), ASCE/SEI 7-16 (2016) ve TBDY (2018) yönetmeliklerinde üst yapı taban kesme kuvvetleri sırasıyla denklem 2.67, 2.68 ve 2.69 ile belirlenir [10, 11, 13].

$$V_s = \frac{k_{D\max} D_D}{R_1} \quad (2.67)$$

$$V_{st} = V_b \left(\frac{W_s}{W} \right)^{(1-a\zeta)} \quad (2.68)$$

$$V_M = \frac{S_{ae}^{(DD-1)}(T_M) W \eta_M}{R} \quad (2.69)$$

Burada V_{st} bina taban kesme kuvvetini, V_b yalıtım düzleminde meydana gelen kesme kuvvetini, W_s üst yapı ağırlığını, W yalıtım düzlemi de dahil olmak üzere izolatörler üzerinde bulunan tüm yapı ağırlığını, ζ eşdeğer viskoz sönüm oranını ve a ise istatistiksel parametreyi ifade etmektedir.

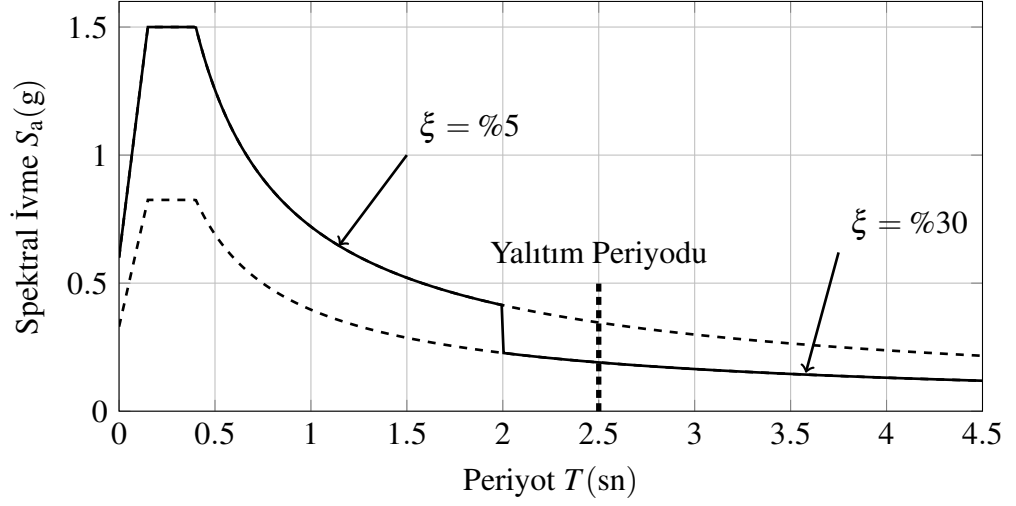
Taban kesme kuvvetinin üst yapı katlarına dağıtılması ise ASCE/SEI 7-10 (2010), ASCE/SEI 41-13 (2014) yönetmelikleri için sırasıyla denklem 2.70 ve 2.71 ile yapılır [10, 12].

$$F_x = \frac{V_s w_x h_x}{\sum_{i=1}^n w_i h_i} \quad (2.70)$$

$$F_x = \frac{V_{st} w_x h_x^{k_{bi}}}{\sum_{i=1}^n w_i h_i^{k_{bi}}} \quad k_{bi} = 14 \beta_D T_S \leq 4 \quad (2.71)$$

Burada w ilgili kat kütesini, h ilgili kat yüksekliğini, k_{bi} atalet kuvveti dağıtım katsayısını, β_D eşdeğer sönüm oranını, T_S ise üst yapı periyodunu ifade etmektedir.

Şekil 2.8’de eşdeğer yalıtım periyodu 2.5 sn ve eşdeğer sönümü %30 olan sisteme ait kompozit spektrum görülmektedir.



Şekil 2.8 : Mod birleştirme yönteminde kullanılan kompozit spektrum.

3. SİSMİK YALITIMLI İKİ YAPILI SİSTEMLERİN PARAMETRİK İNCELENMESİ

3.1 Giriş

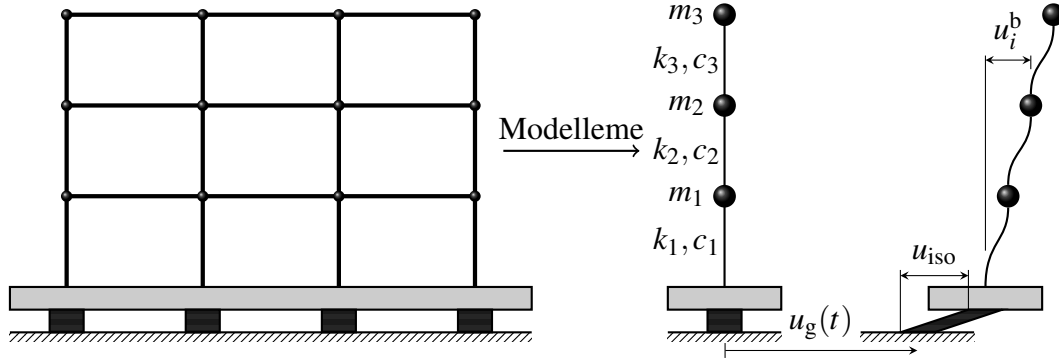
Tez çalışması kapsamında sismik yalıtımlı yapıların doğrusal olmayan hareket denklemlerinin yer ivmeleri etkisinde daha önce belirtilen kapsam ve yöntemler dahilinde çözülebildiği MSBIS programı hazırlanmıştır. Bu bölümde, oluşturulan algoritmanın doğrulaması yapılarak, yapısal özellikleri açıklanmış ve ortak yalıtım düzleminde bulunan ikili yapıların, parametrik incelenmesine dair prosedürler gösterilecektir. Daha sonra hazırlanan çalışmaya ait sonuçlar paylaşılmıştır. Son olarak ikiden fazla yapının ortak yalıtım düzleminde bulunması durumu için hazırlanan örnek sistemler incelenecektir.

3.2 İncelenen Yapıların Özellikleri

Tez çalışması kapsamında incelenen ortak yalıtım düzleminde bulunan sismik yalıtımlı iki yapının değerlendirilmesi, bu bölümde açıklanan yapı parametreleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapılar yalnızca yatay doğrusal kesme yaylarına sahip çok serbestlik dereceli sistemlerden oluşmaktadır. Yapı elemanları, doğrusal elastik olarak modellenmiştir. Dolayısıyla, üst yapı taşıyıcılarında deprem yükleri altında oluşan kuvvet-yer değiştirme ilişkisinin doğrusal elastik olduğu kabul edilmiştir. Şekil 3.1’de belirtildiği gibi yalıtım düzlemi ve yapı kat döşemeleri düzlem içinde rijit kabul edilerek tek bir kütle ile ifade edilmiştir.

Yapının kat rijitlikleri, tüm kolonların yatay rijitliklerinin denklem 3.1’de verilen formüle göre belirlenerek toplanması ile elde edilmiştir. Her bir kat için yatay rijitlik değeri, toplam 16 adet 60x60 cm boyutlarında betonarme kolonların yatay rijitlikleri toplamına eşit olarak alınmıştır. Tüm yapı ve katlar için kat yüksekliği $h=4m$ olarak belirlenmiştir. Betonarme elastisite modülü $E_c=32000$ MPa olarak kabul edilmiştir.

$$\sum_{i=1}^n k_i = \frac{12E_c I}{h^3} \quad (3.1)$$



Şekil 3.1 : 3 nolu yapıya ait analitik model ve yapının şekil değiştirmiş hali.

Burada, k her bir kolona ait yatay rijitliği, E_c betonarme elastisite modulünü, I atalet momentini, h kat yüksekliğini ve n bir katta bulunan kolon adedini ifade etmektedir. Sismik yalıtım sistemi ise tüm izolatörlerin yapısal özelliklerinin toplamı ile ifade edilen doğrusal olmayan yatay kesme yayı ile tanımlanmıştır. Ayrıca sismik yalıtımlı yapının sahip olduğu sönüm, izolatörlerin doğrusal olmayan kesme yaylarında sönümlendiği enerji ve üst yapının sahip olduğu Rayleigh sönümü olmak üzere ayrıştırılmıştır. Yapısal sönüm modellerine ait detaylar Bölüm 2.5’de detaylı olarak açıklanmıştır.

Çizelge 3.1 : Çalışma kapsamında incelenen sistemlerin tabanı ankastre olması durumu için hesaplanan yapısal özellikleri.

Yapı #	Kat Adedi	T_1	ω_1	ω_n
1	1	0.1573	39.94	-
2	2	0.2546	24.68	64.62
3	3	0.3535	17.77	71.97
4	4	0.4530	13.87	75.06
5	5	0.5527	11.37	76.64
6	6	0.6526	9.63	77.56
7	7	0.7525	8.35	78.13
8	8	0.8525	7.37	78.52
9	9	0.9525	6.60	78.79
10	10	1.0526	5.97	78.98

Tez çalışması kapsamında ortak yalıtım düzleminde bulunan yapıların, dinamik özelliklerinin taban kesme kuvvetlerine olan etkisini incelemek üzere on adet yapı seçilmiştir. Kat sayıları birden ona kadar değişen yapıların kat rijitlikleri $k_i = 0.0108m^4$, kat kütleleri $m_i = 650t$ ve üst yapıya ait sönüm oranları $\xi = 0.05$ olmak üzere tümünde aynıdır. Kat adedine bağlı olarak değişen yapı doğal periyotları ile birinci ve sonuncu açılal frekans değerleri Çizelge 3.1’de sunulmuştur. Ayrıca, yalıtım

düzlemi kütlesi her bir yapı için $m_b = 981$ t olarak alınmıştır. Yalıtım birimlerine ait dinamik özellikler parametrik olarak belirlenmiş olup Bölüm 3.6.1’de detaylı olarak açıklanmıştır.

3.3 Deprem Kayıtlarının Seçilmesi

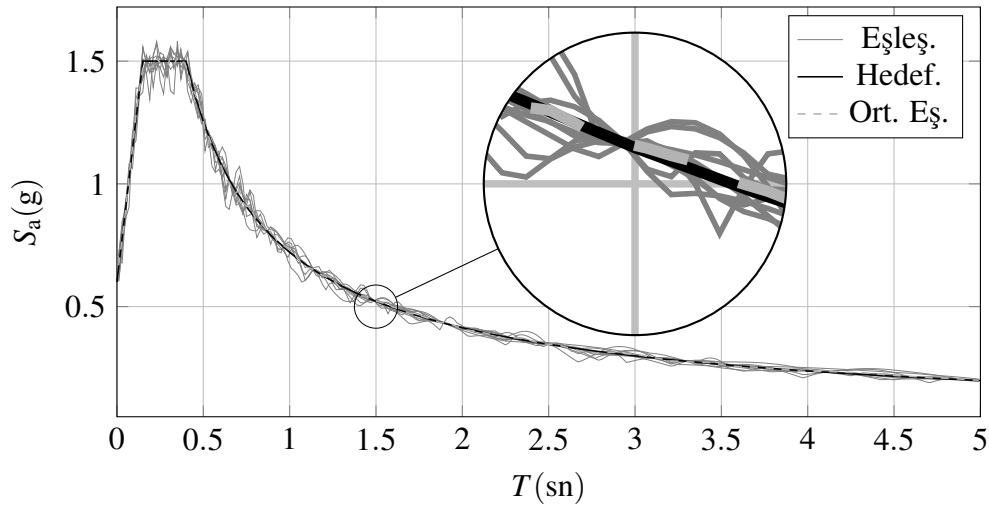
Sismik yalıtımlı yapıların çalışma kapsamında yapılan nümerik analizlerinde Çizelge 3.2’de verilen ve Fahjan tarafından DBYBHY (2007) yönetmeliğinde yer alan Z2 zemin sınıfı için önerilen deprem kayıtları kullanılmıştır [36,37]. Çizelgedeki ilk sütun PEER veri bankasındaki kayıt numarasını belirtmektedir [38]. Ayrıca seçilen kayıtlara ait fay kırığına en yakın mesafe, kayıt süresi ve faylanma mekanizmaları da verilmiştir. Kayıtların seçilmesi ile ilgili daha ayrıntılı bilgi Fahjan tarafından yapılan çalışmada bulunabilir [36].

Çizelge 3.2 : Zaman tanım analizlerinde kullanılan deprem kayıtları.

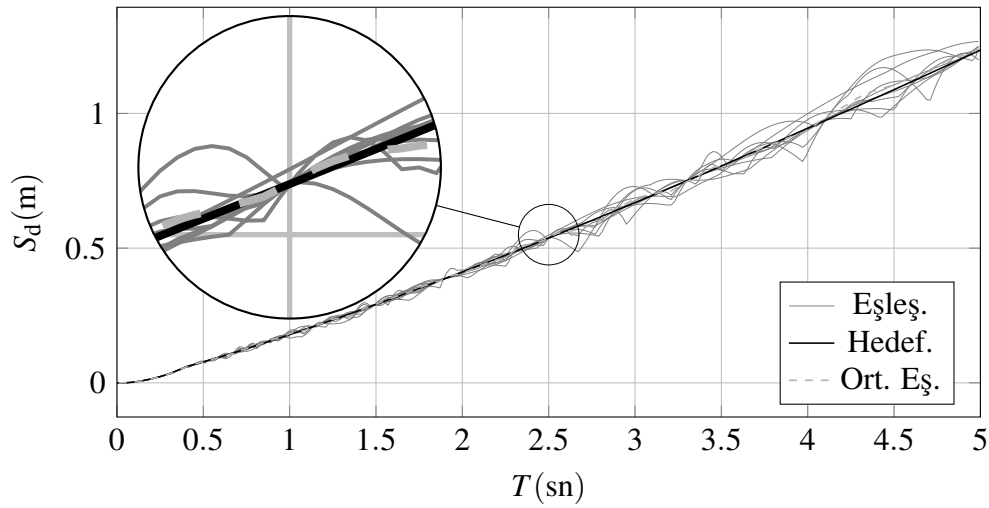
Kayıt No	Deprem	Faya mesafe [km]	Kayıt süresi [s]	Faylanma mek.
P0017	Imperial Valley	18.2	39.0	SS
P0012	Imperial Valley	18.2	39.0	SS
P0730	Superstitt Hills(B)	13.30	40.0	SS
P0898	Northridge	47.4	35.0	RN
P0856	Landers	69.2	50.0	SS
P0967	Northridge	32.7	40.0	RN
P0003	Imperial Valley	1.0	39.3	SS
P0020	Imperial Valley	8.5	37.8	SS
P0856	Landers	88.5	50.0	SS
P0051	Imperial Valley	23.8	39.5	SS

Kayıtların tasarım spektrumuna uygun hale getirilmesi aşamasında Atik ve Abrahamson tarafından önerilen durağan olmayan spektral eşleştirme metodu kullanılmıştır [39].

Tasarım spektrumu DBYBHY 2007 yönetmeliğine uygun olarak 1. derece deprem bölgesi ve Z2 zemin sınıfı özelliklerine karşılık gelen spektrum kullanılmıştır. 50 yılda aşılma olasılığı %2 olan en büyük deprem spektrumunu elde edebilmek amacıyla yapı önem katsayısı $I = 1.5$ alınmıştır. Elde edilen bu spektruma göre eşleştirilmiş deprem kayıtlarına ait elastik spektral ivme ve yatay yer değiştirme spektrumları sırasıyla Şekil 3.2 ve 3.3 ile verilmiştir.



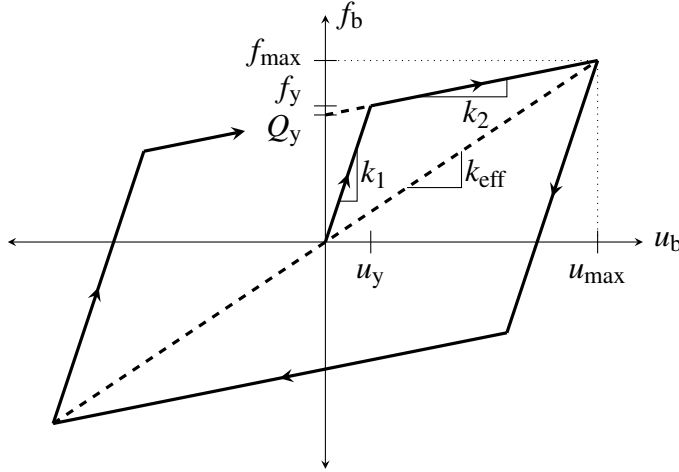
Şekil 3.2 : Eşleştirilmiş deprem kayıtlarının ivme spektrumları.



Şekil 3.3 : Eşleştirilmiş deprem kayıtlarının yer değiştirme spektrumları.

3.4 Sismik Yalıtımlı Tek Yapıların Analizi ve Doğrulanması

Bu başlık altında, sismik yalıtımlı yapıların hareket denklemlerinin çözülmesi amacıyla hazırlanan algoritma tek yapı bir sistem üzerinden sonlu elemanlar yöntemini kullanan yapısal analiz programı SAP2000 ile doğrulanmıştır. Hazırlanan sonlu elemanlar modelinde kayma şekil değiştirmelerinin etkisi göz ardı edilmiştir. Algoritmanın doğrulanması, malzeme doğrusalsızlığı, üst yapının çok serbestlik dereceli modellenmesi ve viskoz sönüm gibi yapısal özelliklerin, doğrusal olmayan analiz sonuçlarına etkisinin kolay irdelenebilmesini sağlamak amacıyla üç başlık altında incelenecektir. Yalıtım birimlerinin doğrusal olmayan yaylarında kullanılan parametrelere bağlı olarak oluşturulan iskelet eğrisi Şekil 3.4’de görülmektedir.



Parametre	Büyüklik
f_y	4000 kN
u_y	0.02 m
k_1	200000
k_2	20000

Şekil 3.4 : MSBIS programının doğrulanması amacıyla kullanılan doğrusal olmayan kesme yayına ait parametreler.

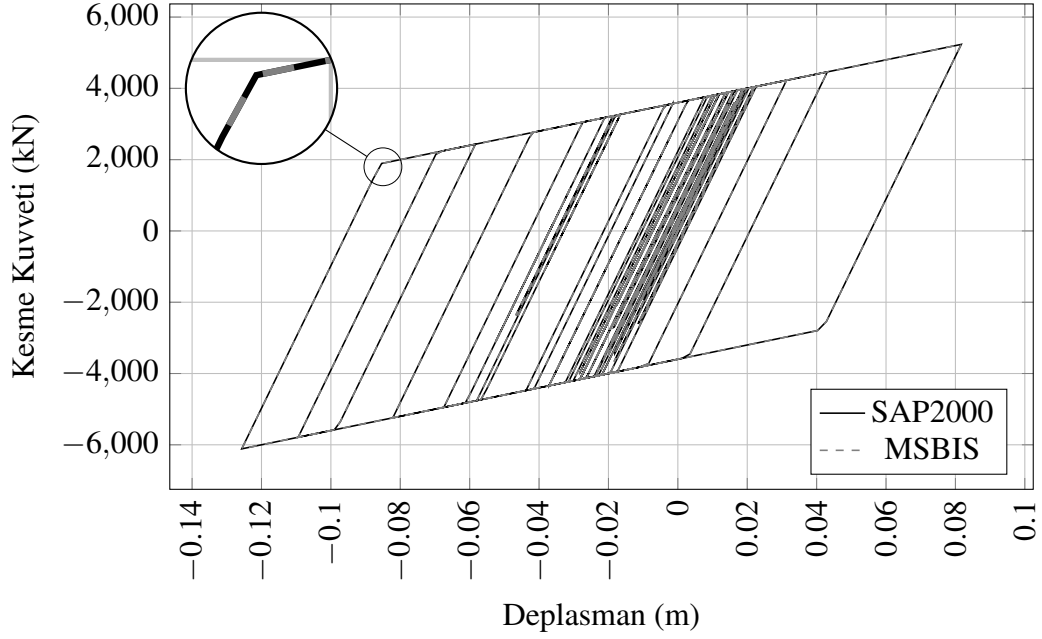
3.4.1 Tek serbestlik dereceli sönümsüz sistem

İlk olarak, hazırlanan algoritma ile yalıtım birimlerinin sahip olduğu malzeme doğrusalsızlığı durumu için doğru sonuçların elde edildiğini göstermek amacıyla üst yapının tek bir kütle olarak ifade edildiği tek serbestlik dereceli bir yapı, yalnızca histerik sönüm etkisinde analiz edilmiştir. Dolayısıyla yalıtım birimlerinde viskoz sönüm tanımlanmamıştır. Bu sebeple, Çizelge 3.1’de belirtilen 1 nolu yapının yalıtım düzlemi ve kat kütlesi kullanılarak oluşturulan tek serbestlik dereceli yapı, Çizelge 3.2’de belirtilen P0017 kayıt nolu deprem etkisi altında nümerik olarak çözülmüştür.

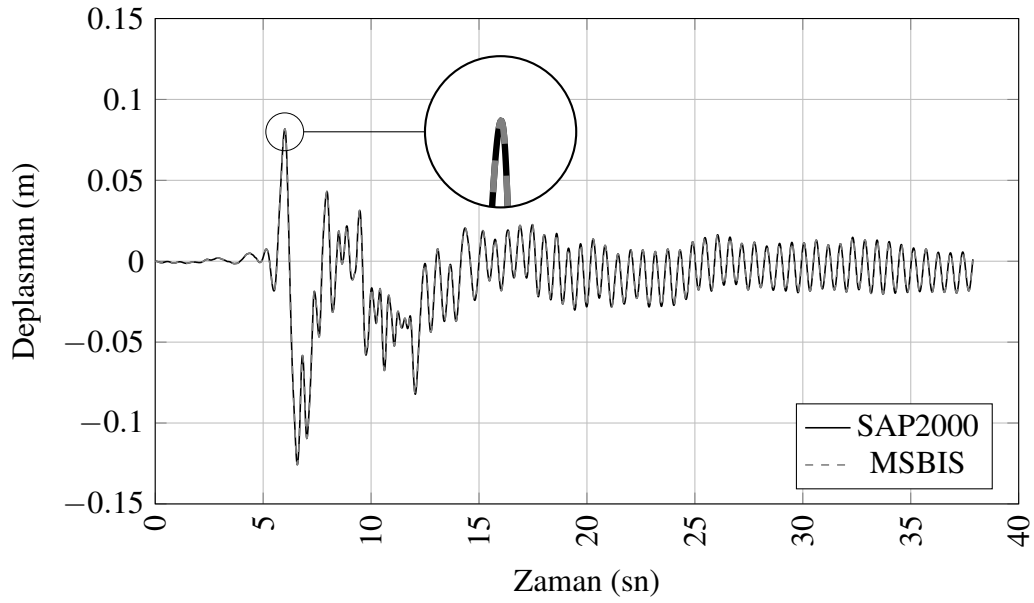
Tek serbestlik dereceli yapıya ait kesme kuvveti-yer değiştirme grafiği, iki analiz programı için de elde edilmiş olup Şekil 3.5’de verilen grafikte karşılaştırılmıştır.

Yer değiştirme-zaman grafiği karşılaştırması ise Şekil 3.6’de sunulmuştur.

Şekil 3.5 ve 3.6’de gösterilen grafiklerin göreceli farklarının, yaklaşık sıfır olduğu görülmektedir. Buna göre tek serbestlik dereceli ve sönümsüz olarak kabul edilen doğrusal olmayan kesme yaylarına sahip yapının çözümü doğrulanmıştır.



Şekil 3.5 : Tek serbestlik dereceli sönümsüz sistemin yalıtım birimlerine ait kesme kuvveti-yer değiştirme grafiğinin karşılaştırması.

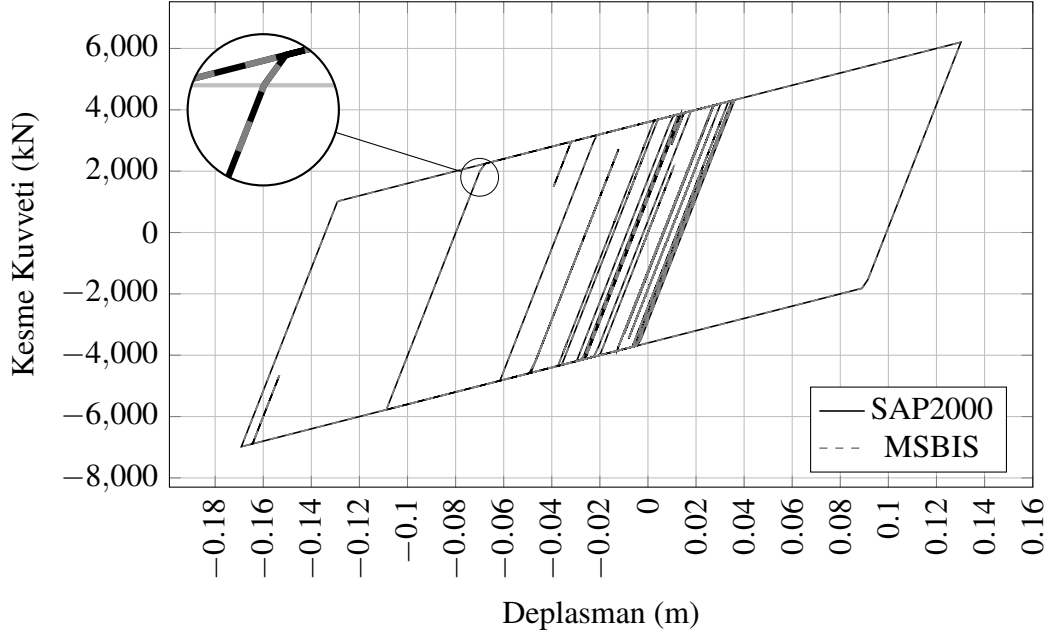


Şekil 3.6 : Tek serbestlik dereceli sönümsüz sistemin yer değiştirme-zaman grafiğinin karşılaştırması.

3.4.2 Çok serbestlik dereceli sönümsüz sistem

Bu bölümde, sismik yalıtımlı çok serbestlik dereceli tek yapıya ait sonuçlar SAP2000 programı ile kıyaslanmıştır. Yalıtım birimlerinde veya üst yapıda viskoz sönümün olmadığı kabul edilmiştir. Sistemde yalnızca izolatörlerin sahip olduğu

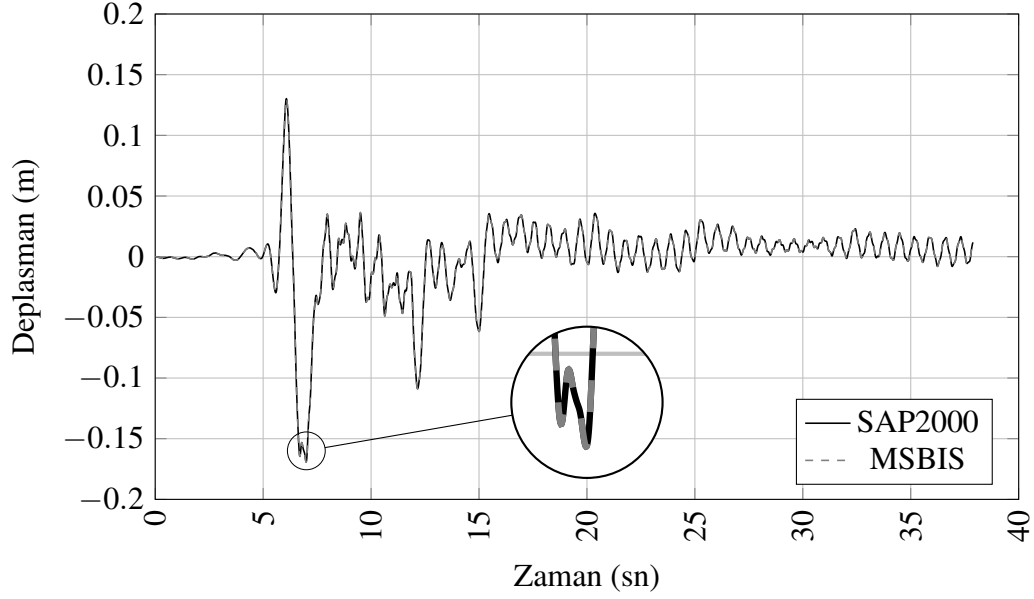
histerik sönüm bulunmaktadır. Burada amaç, hazırlanan algoritmanın çok serbestlik dereceli yapıların çözümünde viko sönüm modeli kullanılmadan doğru sonuçların üretildiğinin gösterilmesidir. Bu sebeple, Çizelge 3.1’de belirtilen 2 nolu yapı kullanılarak oluşturulan çok serbestlik dereceli yapı, Çizelge 3.2’de belirtilen P0017 kayıt nolu deprem etkisi altında nümerik olarak çözülmüştür. Yalıtım birimine ait kesme kuvveti- yer değıştirme sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 3.7’de verilmiştir.



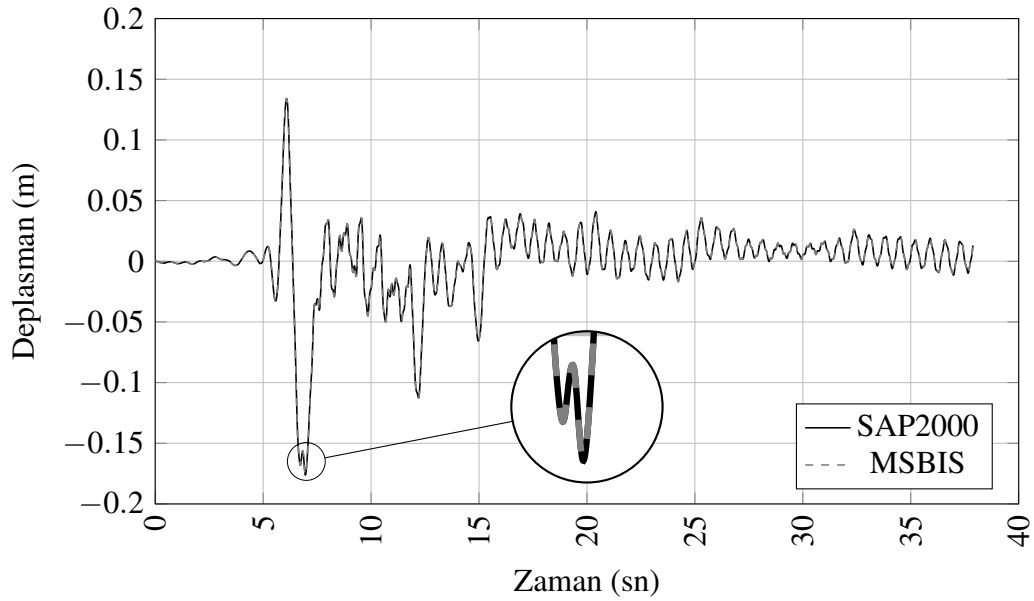
Şekil 3.7 : Çok serbestlik dereceli sönümsüz sistemin yalıtım birimlerine ait kesme kuvveti- yer değıştirme grafiğinin karşılaştırması.

Çok serbestlik dereceli yapının yalıtım düzlemi ve ikinci katına ait yer değıştirme-zaman grafiğ karşılaştırmaları sırasıyla Şekil 3.8, ve Şekil 3.9’de sunulmuştur.

Buna göre çok serbestlik dereceli ve yalnızca histerik sönüme sahip sismik yalıtımlı yapıdan elde edilen sonuçlar, karşılaştırılan sonlu elemanlar programı ile yeterli yakınlıktadır.



Şekil 3.8 : Çok serbestlik dereceli sönümsüz sistemin yalıtım düzlemi yer değiştirme-zaman grafiğinin karşılaştırması.

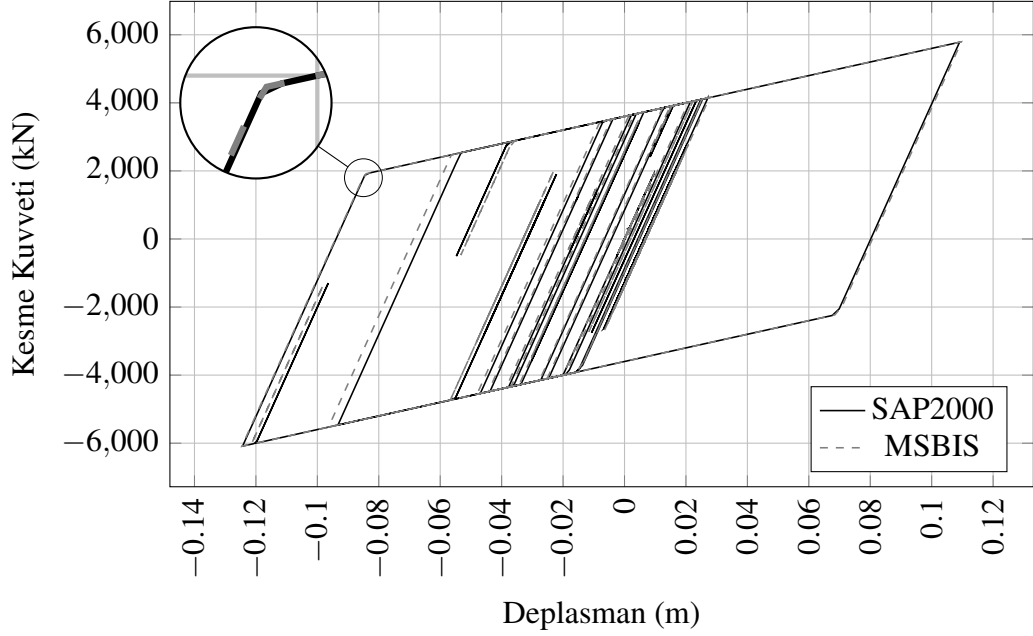


Şekil 3.9 : Çok serbestlik dereceli sönümsüz sistemin 2. kat toplam yer değiştirme-zaman grafiğinin karşılaştırması.

3.4.3 Çok serbestlik dereceli sönümlü sistem

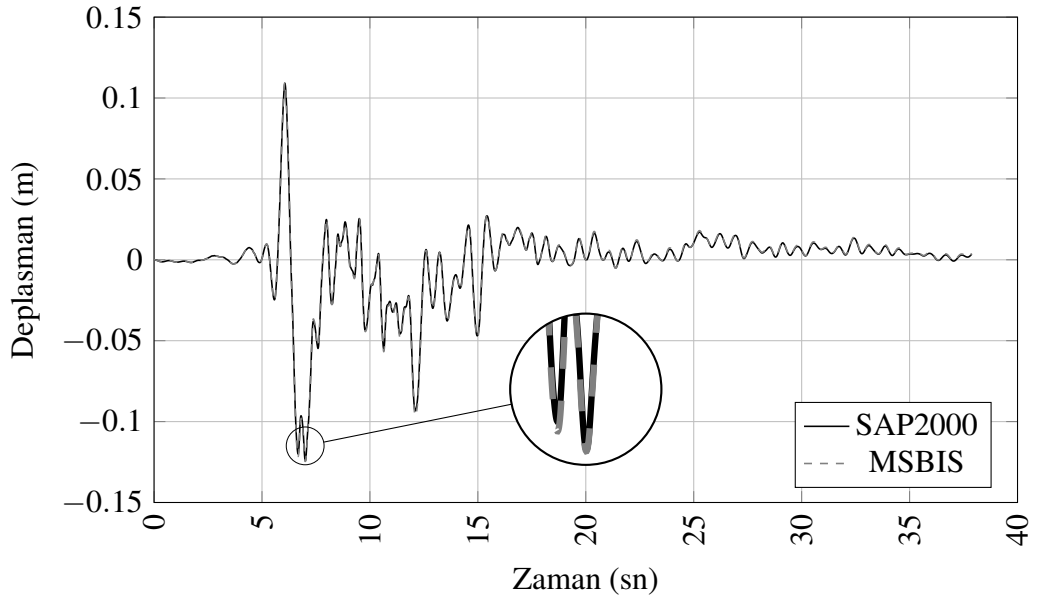
Bu bölümde, çok serbestlik dereceli sönümlü sisteme ait sonuçlar kıyaslanmıştır. Üst yapı sönüm matrisi, $\xi = 0.05$ değeri için Rayleigh sönümü kullanılarak hazırlanmıştır. Sonlu elemanlar programında uygulanan $\xi = 0.05$ sönüm tüm sistemin rijitlik ve kütle matrislerinden oluşturulmaktadır. Dolayısıyla yalıtım birimleri için de ilave viskoz

sönüm uygulanmış olur. Bu nedenle yalıtım birimlerinde mevcut histerik sönüme ilave olarak $\xi = 0.05$ viskoz sönüm tanımlaması yapılmıştır. Şekil 3.10’de yalıtım birimine ait izolatör kesme kuvveti-yer değiştirme grafiği karşılaştırması sunulmuştur.

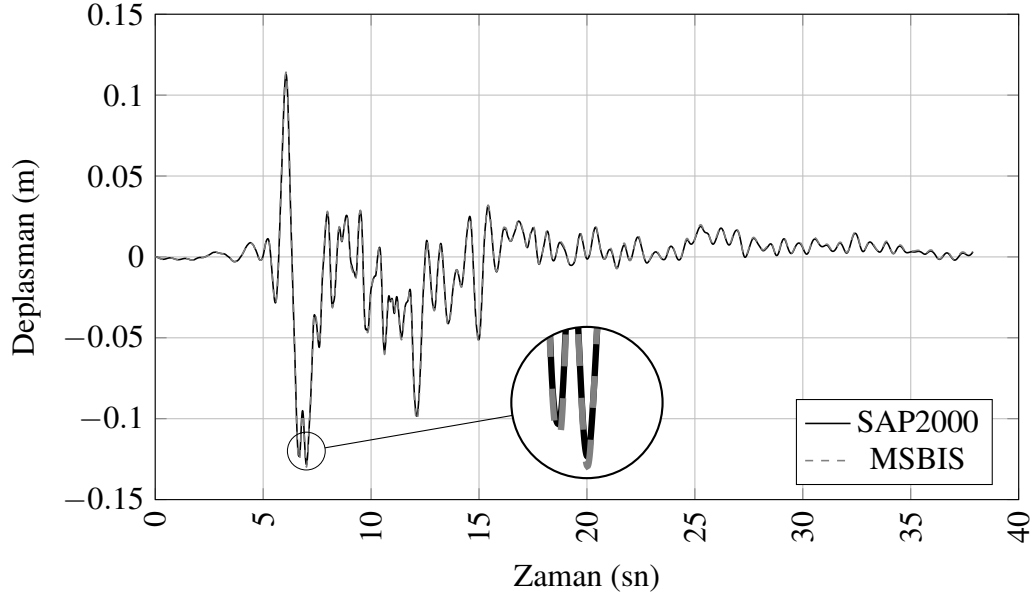


Şekil 3.10 : Çok serbestlik dereceli sönümlü sistemin yalıtım birimlerine ait kesme kuvveti-yer değiştirme grafiğinin karşılaştırması.

Çok serbestlik dereceli yapının yalıtım düzlemi ve ikinci katına ait yer değiştirme-zaman grafiği karşılaştırmaları sırasıyla Şekil 3.11, 3.12’de sunulmuştur.



Şekil 3.11 : Çok serbestlik dereceli sönümlü sistemin yalıtım düzlemine ait yer değiştirme-zaman grafiğinin karşılaştırması.



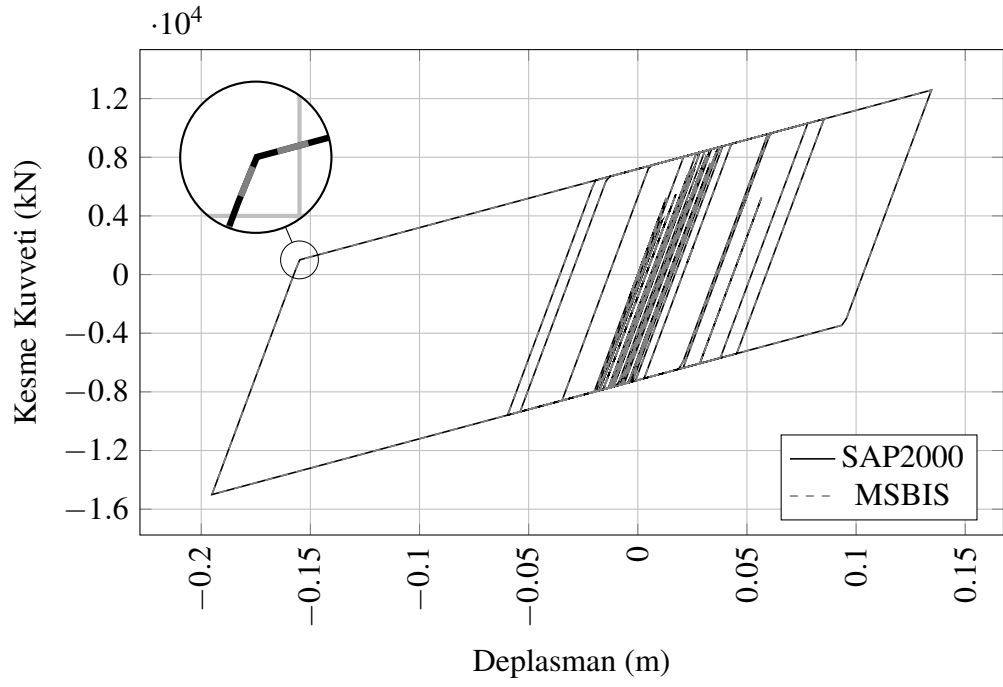
Şekil 3.12 : Çok serbestlik dereceli sönümlü sistemin 2. kat toplam yer değiştirme-zaman grafiğinin karşılaştırması.

Sonuçlarda elde edilen göreceli farklar çalışmada kullanılan yöntem ile sonlu elemanlar yönteminin kullandığı sönüm matrisinin oluşturulma biçimindeki farklılıktan meydana gelmektedir. Buna rağmen sonuçlar kabul edilebilir sınırlar içinde kalmaktadır.

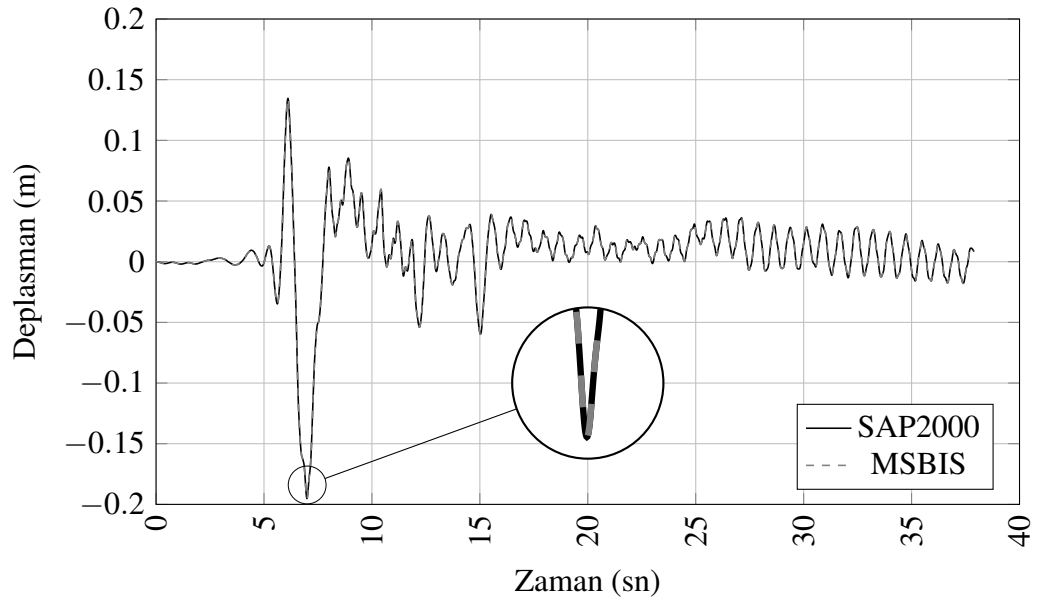
3.5 Ortak Yalıtım Düzleminde Bulunan İkili Yapıların Analizi ve Doğrulanması

Sismik yalıtımlı yapıların analizi için hazırlanan MSBIS aynı yalıtım düzleminde bulunan birden fazla yapının analizlerini gerçekleştirebilmektedir. Çoklu yapılar için programın verdiği sonuçların doğruluğu bu başlık altında irdelenecektir. Sonlu elemanlar programı ile karşılaştırılmak üzere ortak yalıtım düzleminde bulunan yapılar Çizelge 3.2’de belirtilen P0017 kayıt nolu deprem etkisi altında nümerik olarak çözülmüştür. Sistem, Çizelge 3.1’de belirtilen 2 ve 3 nolu yapılar kullanılarak çok serbestlik dereceli olarak oluşturulmuştur. Yalnızca histerik sönümün bulunduğu sistemde yapı sayısı ile doğru orantılı olarak Şekil 3.4’de belirtilen yalıtım birimlerine ait akma kuvveti F_y , ve rijitlikler iki katına çıkarılmıştır. Dolayısıyla akma yer değiştirmesi u_y sabit kalmıştır. Sistemdeki izolatörlerin tümünü temsil eden kesme yayına ait yer değiştirme-kesme kuvveti grafiği Şekil 3.13’de verilmiştir.

Ortak yalıtım düzlemi, her iki yapının en üst katlarına ait yer değiştirme-zaman grafiği karşılaştırmaları sırasıyla Şekil 3.14, Şekil 3.15 ve Şekil 3.16’de sunulmuştur.



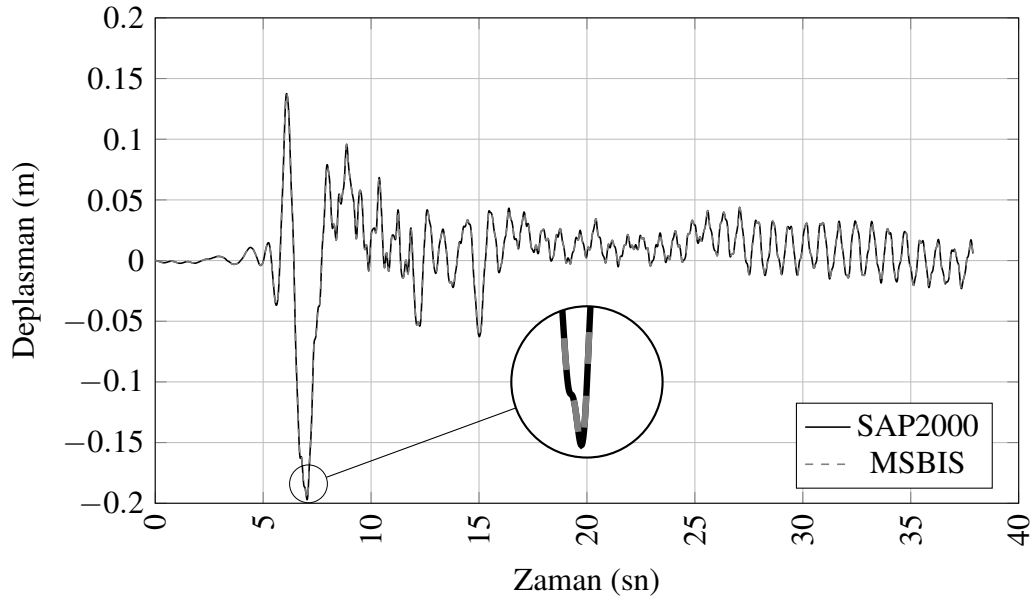
Şekil 3.13 : Sismik yalıtımlı çoklu yapı sistemi yalıtım birimlerine ait kesme kuvveti-yer değiştirme grafiğinin karşılaştırması.



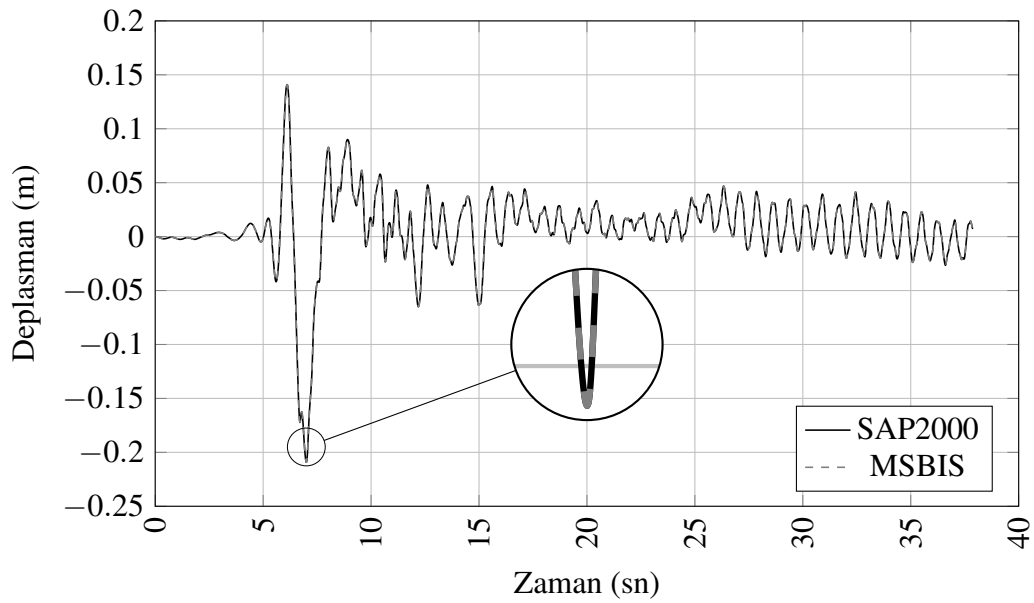
Şekil 3.14 : Sismik yalıtımlı çoklu yapı sistemi yalıtım düzlemine ait yer değiştirme-zaman grafiğinin karşılaştırması.

Yapıların taban kesme-zaman grafiklerinin sonlu elemanlar modeli ile karşılaştırılmış hali ise birinci ve ikinci yapı için sırasıyla Şekil 3.17 ve Şekil 3.18’de gösterilmiştir.

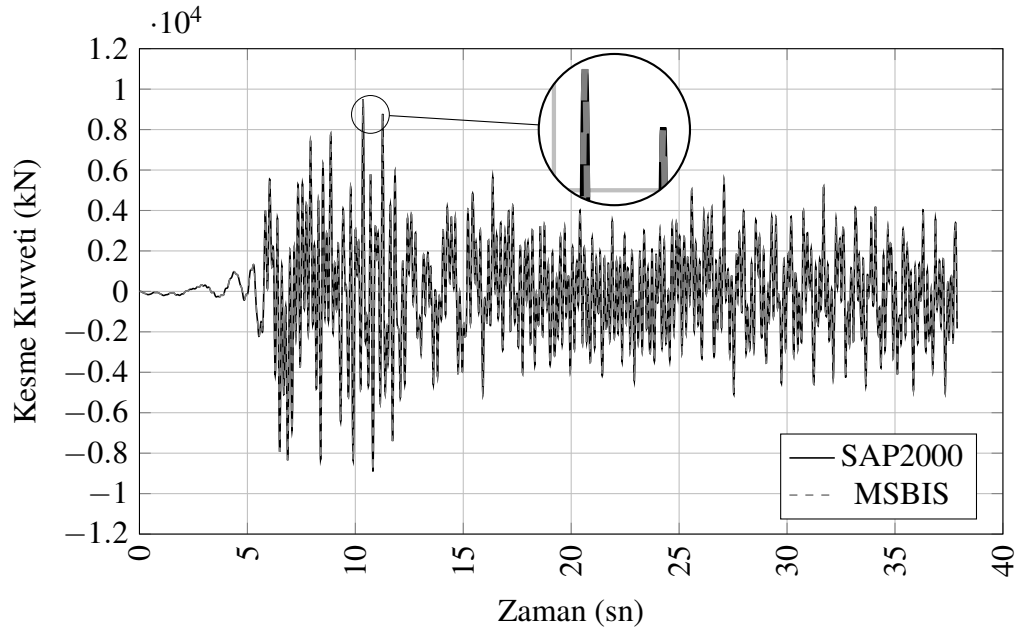
Sunulan grafiklere göre sonlu elemanlar programı ile MSBIS yalnızca histerik sönüm altında aynı sonuçları vermektedir.



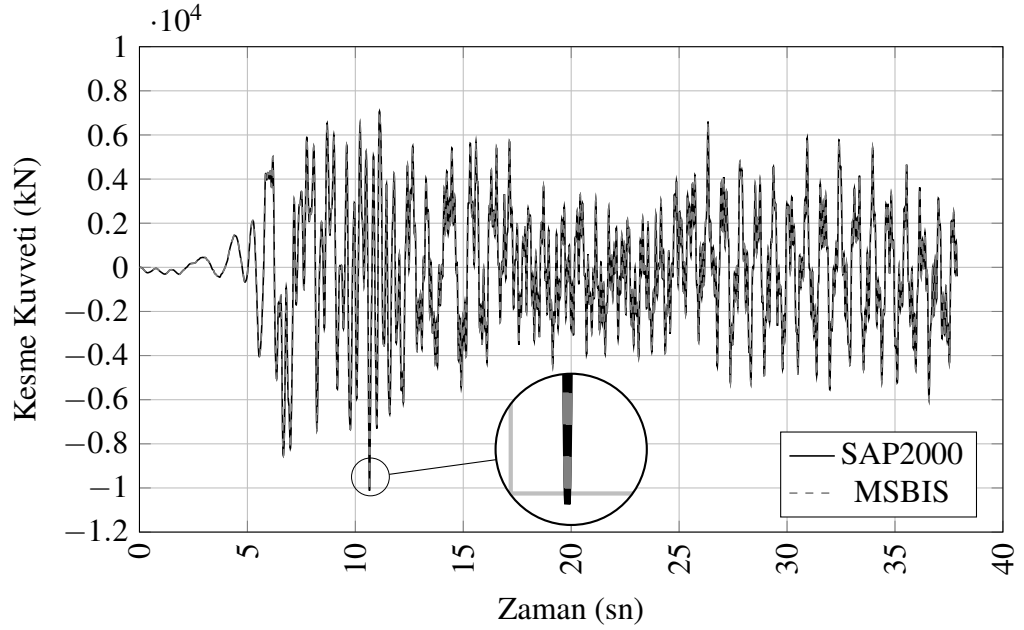
Şekil 3.15 : Sismik yalıtımlı çoklu yapıli sistemin birinci yapısına ait toplam tepe yer değıştirme-zaman grafiğinin karşılaştırması.



Şekil 3.16 : Sismik yalıtımlı çoklu yapıli sistemin ikinci yapısına ait toplam tepe yer değıştirme-zaman grafiğinin karşılaştırması.



Şekil 3.17 : Sismik yalıtımlı çoklu yapılı sistemin birinci yapısına ait taban kesme kuvveti-zaman grafiğinin karşılaştırması.



Şekil 3.18 : Sismik yalıtımlı çoklu yapılı sistemin ikinci yapısına ait taban kesme kuvveti-zaman grafiğinin karşılaştırması.

3.6 Ortak Yalıtım Düzleminde Bulunan İkili Yapıların İncelenmesi

Şekil 1.6’de örneklendirilen ortak yalıtım düzleminde bulunan yapıların parametrik incelenmesi MSBIS programı ile yapılmıştır. Algoritmanın kullandığı matematiksel altyapı Bölüm 2’de detaylı olarak açıklanmıştır. Buna göre yapılan analizlerde, yapısal özellikleri Bölüm 3.2’de tanımlanan ve Çizelge 3.1’de belirtilen yapılar kullanılmıştır. Algoritmanın analiz prosedürlerine ait detaylar açıklanarak elde edilen sonuçlar bu başlık altında irdelenecektir.

3.6.1 Analiz prosedürü

Ortak yalıtım düzleminde bulunan aynı veya farklı yapısal özellikteki iki yapının irdelenmesi amacıyla Çizelge 3.1’de belirtilen on adet yapı, aralarından seçilecek herhangi iki yapının tüm yan yana bulunma olasılıkları için, Çizelge 3.3’de belirtilen durumlar altında analiz edilmiştir. Dolayısıyla, birinci yapı sabit kalmak üzere ikinci yapının değişen yapısal özellikleri için yapılmış on analiz, birinci yapının da Çizelge 3.1’de belirtilen farklı yapısal özellikleri için tekrarlanmıştır.

Çizelge 3.3 : Çalışma kapsamında yapılan analizlerde kullanılan etkin periyot değeri, etkin sönüm katsayısı ve yapı numaraları.

Durum #	T_{eff}	ξ_{eff}	1. Yapı #	2. Yapı #	Analiz Adedi
1	1.5	0.1	1~10	1~10	100
2	1.5	0.2	1~10	1~10	100
3	1.5	0.3	1~10	1~10	100
4	2.5	0.1	1~10	1~10	100
5	2.5	0.2	1~10	1~10	100
6	2.5	0.3	1~10	1~10	100
7	4.0	0.1	1~10	1~10	100
8	4.0	0.2	1~10	1~10	100
9	4.0	0.3	1~10	1~10	100

Böylece toplamda T_{eff} ve ξ_{eff} ’in her bir değeri için yüz adet analiz yapılmıştır. Yapıların farklı varyasyonlarla bir araya geldiği durumlarda yalıtım birimlerinin eşdeğer periyot ve sönüm değerlerinin sabit kalması amacıyla York ve Ryan tarafından yapılan çalışmada kullanılan yöntem ile yalıtım birimlerinin doğrusal olmayan davranışını belirleyen parametreler kalibre edilmiştir [14]. Programa ait akış şeması Şekil 3.19’de sunulmuştur.

Eşdeğer periyot T_{eff} ve eşdeğer açısal frekans ω_{eff} aşağıda verilen formül ile hesaplanmaktadır.

$$T_{\text{eff}} = 2\pi\sqrt{\frac{M}{k_{\text{eff}}}} \quad \omega_{\text{eff}} = \frac{2\pi}{T_{\text{eff}}} \quad (3.2)$$

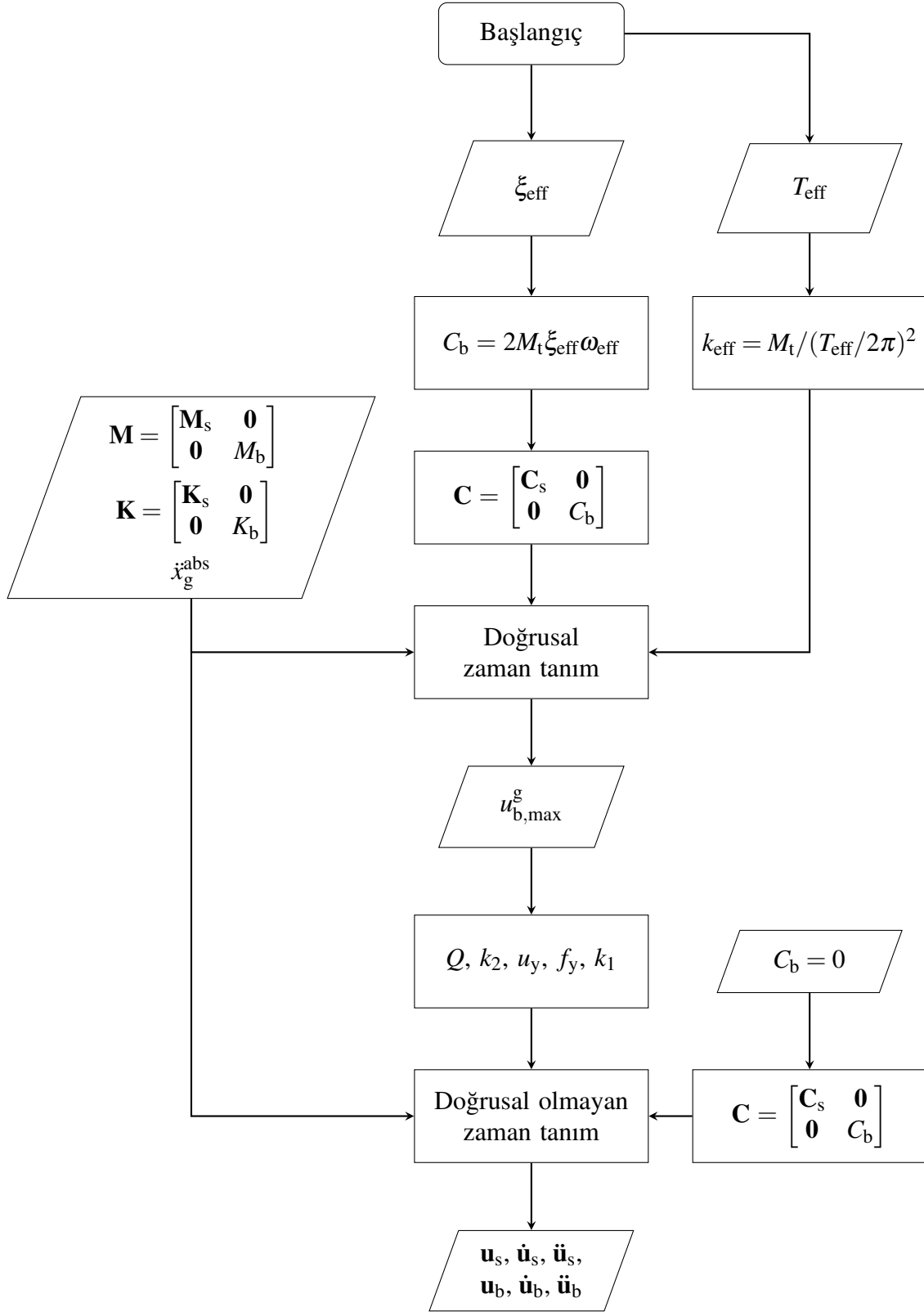
Burada M yalıtım birimlerinin üzerinde kalan toplam yapı kütesini ve k_{eff} , u_{max} yer değiştirmesine bağlı olarak belirlenen yalıtım birimlerinin sekant rijitliğini temsil etmektedir. Dolayısıyla, doğrusal olmayan analiz sonucunda belirli bir eşdeğer periyoda sahip olması istenen yapının, yalıtım birimlerine ait en büyük deplasmanları belirlenmelidir. Bu nedenle rijitliği eşdeğer doğrusal olarak ifade edilebilen sismik yalıtımlı yapıların hareket denklemleri, Çizelge 3.2’de verilen yer ivmeleri etkisinde ve belirli bir eşdeğer sönüm katsayısı kullanılarak doğrusal olarak çözülmüştür. Her bir ivme kaydı için elde edilen sonuçların en büyüğü belirlenerek ortalamaları hesaplanmıştır. Elde edilen en büyük izolatör yer değiştirmesine bağlı olarak yalıtım birimlerinin doğrusal olmayan parametreleri Q ve k_2 aşağıda verilen formüller ile hesaplanmaktadır.

$$Q = \frac{\pi \xi_{\text{eff}} k_{\text{eff}} u_{\text{max}}^2}{2(u_{\text{max}} - u_y)} \quad (3.3)$$

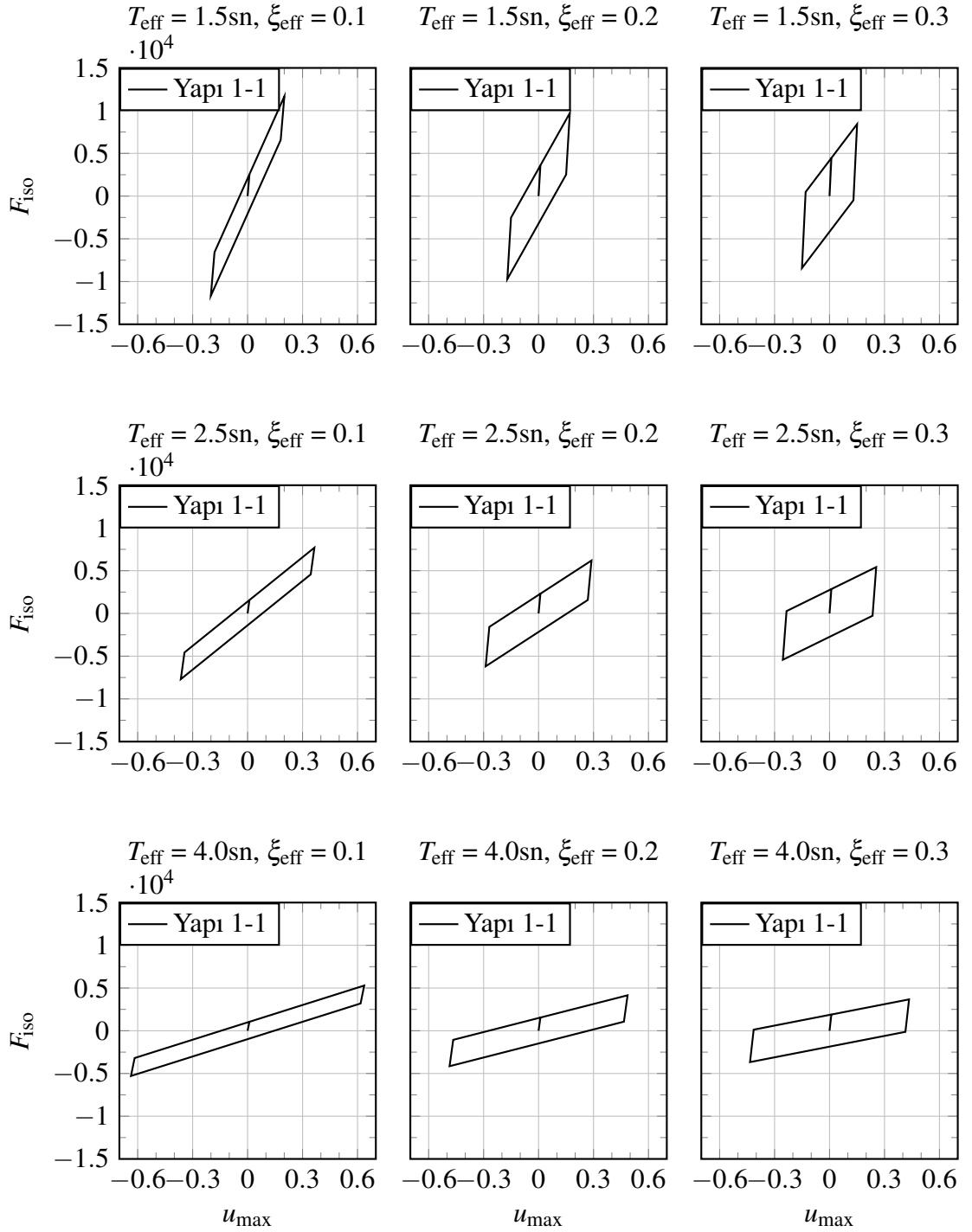
$$k_2 = \frac{k_{\text{eff}} u_{\text{max}} - Q}{u_{\text{max}}} \quad (3.4)$$

Yalıtım birimlerinin doğrusal olmayan kuvvet-yer değiştirme grafiğinin iskelet eğrisini çizebilmek için gerekli olan kurşun çekirdekli izolatörler için akma yer değiştirmesi u_y , Ryan ve Chopra tarafından yapılan çalışmaya uygun olarak 1 cm alınmıştır [40]. Yalıtım birimlerine ait doğrusal olmayan yay parametreleri belirlenen sismik yalıtımlı ikili yapıların hareket denklemleri, Çizelge 3.2’de belirtilen yer ivmeleri etkisinde doğrusal olmayan nümerik analiz ile çözülmüştür. Sisteme ait büyüklükler elde edilen sonuçların en büyüğünün ortalaması alınarak belirlenmiştir. Ancak görelî kat öteleme ve iki yapının taban kesme kuvvetlerinin toplamı, ivme kaydının her Δt zaman aralığı için hesaplanarak belirlenen en büyük değerlerin ortalaması alınarak hesaplanmıştır.

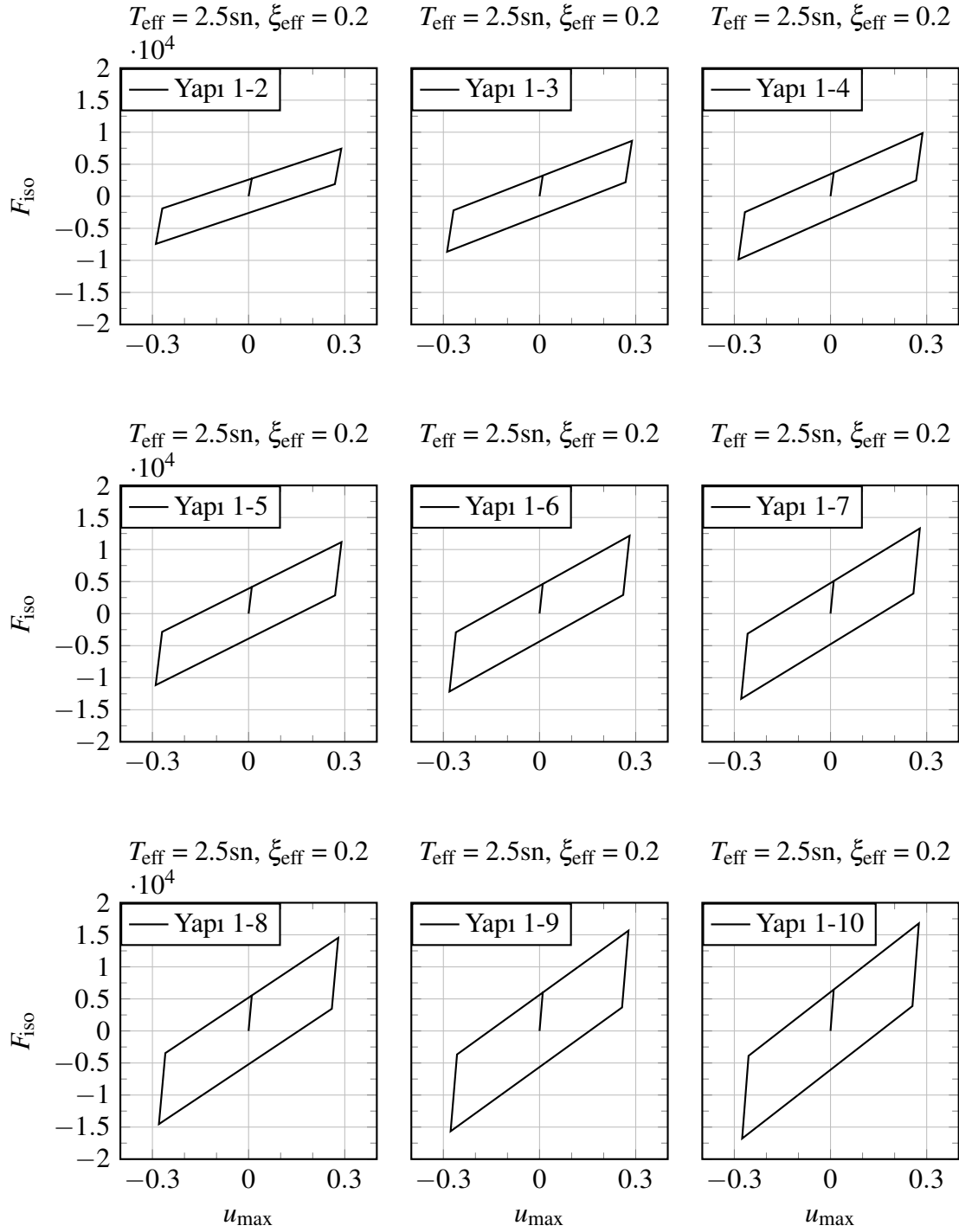
Çizelge 3.1’de belirtilen bir nolu yapıların ortak yalıtım düzleminde birlikte bulunmaları durumlarında, yukarıda belirtilen prosedür ile hesaplanan yalıtım birimlerinin kuvvet-yer değiştirme histeretik eğrileri Şekil 3.20’de sunulmuştur. Aynı eşdeğer periyot ve sönüm değerlerine karşılık yalnızca ikinci yapının değişimine bağlı olarak elde edilen yalıtım birimi parametreleri ise Şekil 3.21’de gösterilmiştir.



Şekil 3.19 : MSBIS programı akış şeması.



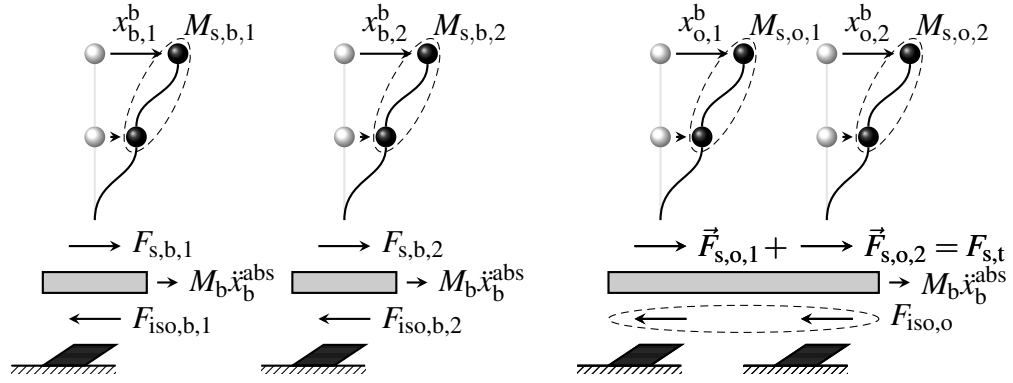
Şekil 3.20 : 1 nolu yapıların ortak yalıtım düzleminde bulunması durumlarında kullanılan kuvvet-yer değiştirme iskelet eğrileri.



Şekil 3.21 : 1 nolu yapıya karşılık değişen ikinci yapılar için kullanılan kuvvet-yer değiştirme iskelet eğrileri.

3.6.2 Kesme kuvveti katsayılarının irdelenmesi

Ortak yalıtım düzleminde bulunan iki yapıli sistemin kesme kuvvetlerindeki değişim bu başlık altında irdelenecektir. Şekil 3.22’de sismik yalıtımlı tek ve ikili yapıların yalıtım düzlemlerine ait serbest cisim diyagramları gösterilmiştir.



Şekil 3.22 : Sismik yalıtımlı tek ve çok yapıli sistemlerin yalıtım düzlemi serbest cisim diyagramı.

Bağımsız yalıtım düzleminde bulunan yapılara ait büyüklükler "b" alt indisi ile, ortak yalıtım düzleminde bulunan yapılara ait büyüklükler ise "o" alt indisi ile ifade edilmiştir. Bu indisleri takip eden "1" ve "2" numaraları ise ortak yalıtım düzleminde bulunan sırasıyla birinci ve ikinci yapıyı temsil etmektedir. Ayrıca x yer değiştirme vektöründe kullanılan "b" üst indisi deplasmanların yalıtım düzlemine göre bağlı olarak ifade edildiğini göstermektedir. Bununla birlikte M_b , yalıtım düzlemi kütlelerini, M_s , üst yapı kütlelerini F_s , taban kesme kuvvetini, F_{iso} , yalıtım birimlerinde oluşan kesme kuvvetini ve $\ddot{x}_b^{abs}$ ise yalıtım düzlemine ait mutlak ivmeyi temsil etmektedir.

Şekil 3.22’de görülen kesme kuvvetleri ilgili kütlelere bölünerek kesme kuvveti katsayıları bulunmuştur.

$$C_{s,o,1} = \frac{F_{s,o,1}}{W_{s,o,1}} \quad C_{s,b,1} = \frac{F_{s,b,1}}{W_{s,b,1}} \quad C_{s,t} = \frac{F_{s,t}}{W_{s,o,1} + W_{s,o,2}} \quad C_{iso,o} = \frac{F_{iso,o}}{W} \quad (3.5)$$

Burada $F_{s,o,1}$ ve $F_{s,o,2}$ ortak yalıtım düzleminde bulunan sırasıyla birinci ve ikinci yapının taban kesme kuvvetini, $W_{s,o,1}$ ve $W_{s,o,2}$, sırasıyla birinci ve ikinci yapının üst yapı ağırlıklarını, W yalıtım birimleri üzerindeki toplam ağırlığı, $F_{s,t}$ üst yapıların toplam kesme kuvvetini, $F_{iso,o}$ ise ortak yalıtımlı sistemin izolasyon seviyesindeki

kesme kuvvetini ve g yer çekim ivmesini ifade etmektedir. Toplam kesme kuvveti $F_{s,t}$, her deprem analizi için birinci ve ikinci yapının taban kesme kuvvetlerinin ivme kaydının her zaman adımında vektörel olarak toplanarak hesaplanan en büyük değerlerinin ortalaması alınarak bulunmuştur.

$C_{s,o,1}$ ve $C_{o,2}$ katsayıları, sırasıyla birinci ve ikinci yapının taban kesme kuvvetlerinin yapı ağırlığına oranını ifade etmektedir. $C_{s,t}$ katsayısı, yapıların deprem etkisinde taban kesme kuvvetlerinin vektörel olarak toplanarak elde edilen sonuçların iki yapının toplam ağırlığına oranını göstermektedir. Son olarak $C_{iso,o}$ katsayısı ise sismik izolasyon seviyesinde oluşan kesme kuvvetinin yalıtım düzlemi dahil toplam yapı ağırlığına oranını belirtmektedir.

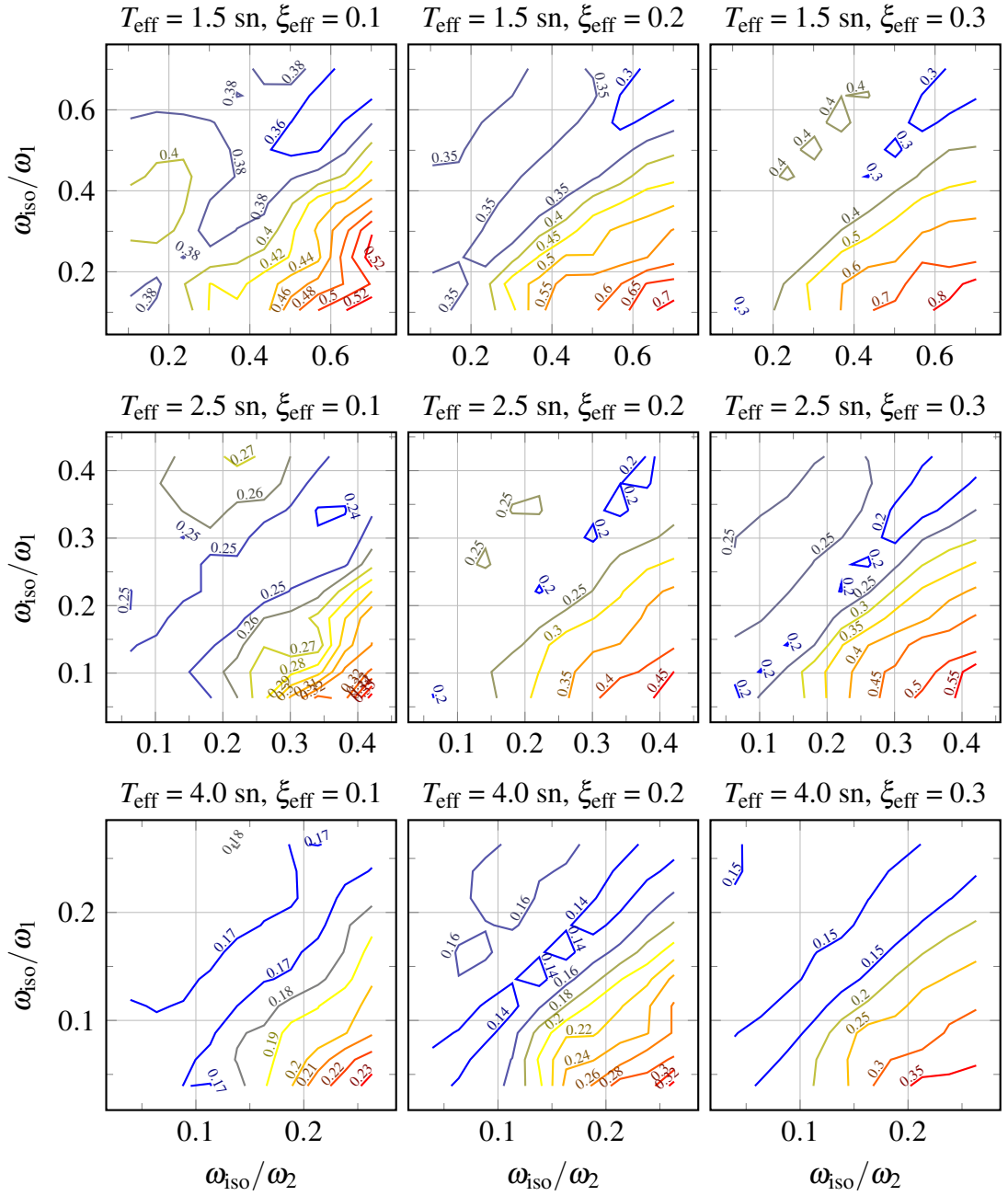
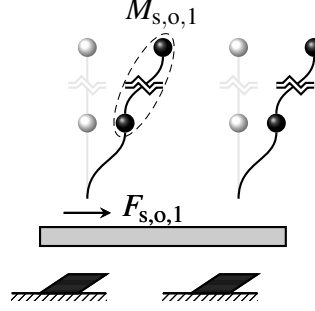
Kesme kuvveti katsayılarının denklem 3.5’de verilen $C_{s,t}$ katsayısına göre değişiminin belirlenmesi amacıyla kullanılan bağıl hata formülleri aşağıda sunulmuştur.

$$C_{s,o,1,err} = \frac{C_{s,o,1} - C_{s,t}}{C_{s,t}} \quad C_{s,t,err} = \frac{(C_{s,o,1} + C_{o,2}) - 2C_{s,t}}{2C_{s,t}} \quad C_{iso,o,err} = \frac{C_{iso,o} - C_{s,t}}{C_{s,t}} \quad (3.6)$$

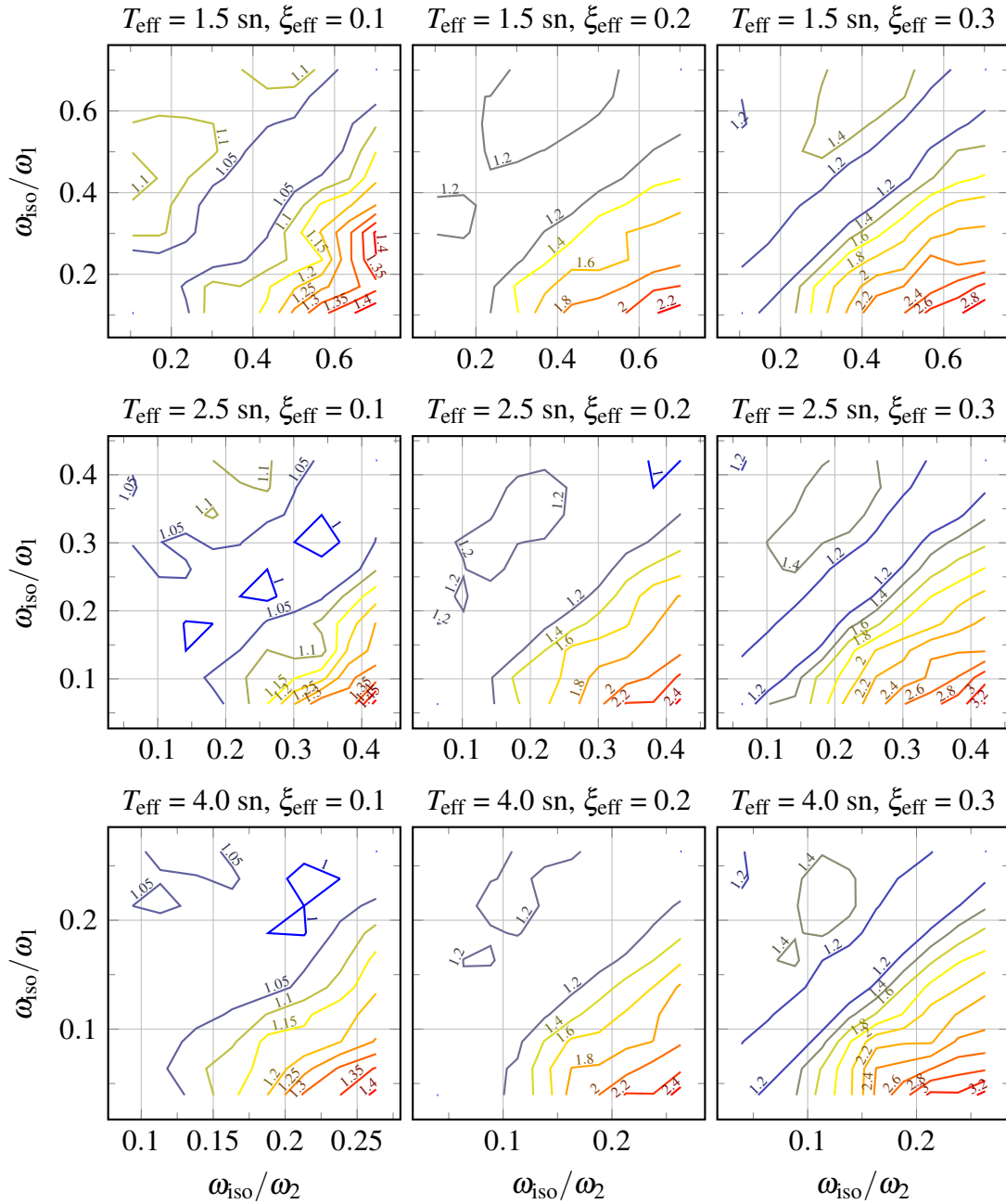
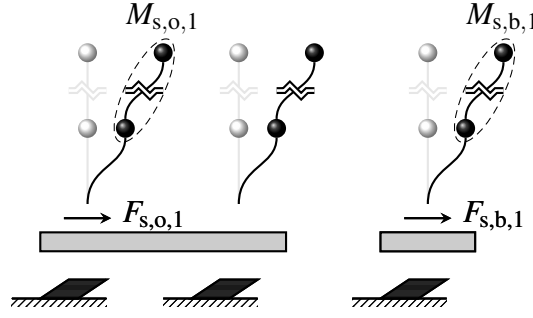
Öncelikle ortak yalıtım düzleminde bulunan yapılardan birinci yapının tabanında meydana gelen en büyük taban kesme kuvvetinin, ikinci yapının farklı yapısal özellikleri ile değişimi irdelenecektir. Bu sebeple Çizelge 3.3’de gösterilen farklı eşdeğer periyot (T_{eff}) ve eşdeğer sönüm (ξ_{eff}) durumları için elde edilen birinci yapıya ait kesme kuvveti katsayısı ($C_{s,o,1}$) değerleri, Şekil 3.23’de sunulmuştur. Burada düşey ve yatay eksenler sırasıyla yalıtım birimi açısal frekansının (ω_{iso}), birinci ve ikinci yapının Çizelge 3.1’de belirtilen açısal frekansına oranıdır.

Şekil 3.23’de sunulan grafiklerde aynı açısal frekans değerlerinin oluşturduğu diyagonalin altında kalan bölgede, ikinci yapının açısal frekansları, kesme kuvveti katsayılarının verildiği birinci yapının açısal frekanslarından fazladır. Bu bölgede bulunan konturlarda, birinci yapının sabit açısal frekansına karşılık gelen yatay eksene paralel bir çizgide ikinci yapının artan açısal frekanslarına karşılık gelen değerler okunduğunda $C_{s,o,1}$ değerlerinin de arttığı görülmektedir. Grafiklerde okunan en yüksek değerler ise birinci yapının en düşük, ikinci yapının ise en yüksek açısal frekansa sahip olduğu noktadadır. Ayrıca, birinci yapının en düşük açısal frekans değerine karşılık okunan en büyük ve en küçük $C_{s,o,1}$ değerleri oranı, eşdeğer

$$C_{s,o,1} = \frac{F_{s,o,1}}{W_{s,o,1}} = \frac{F_{s,o,1}}{M_{s,o,1} \times g}$$

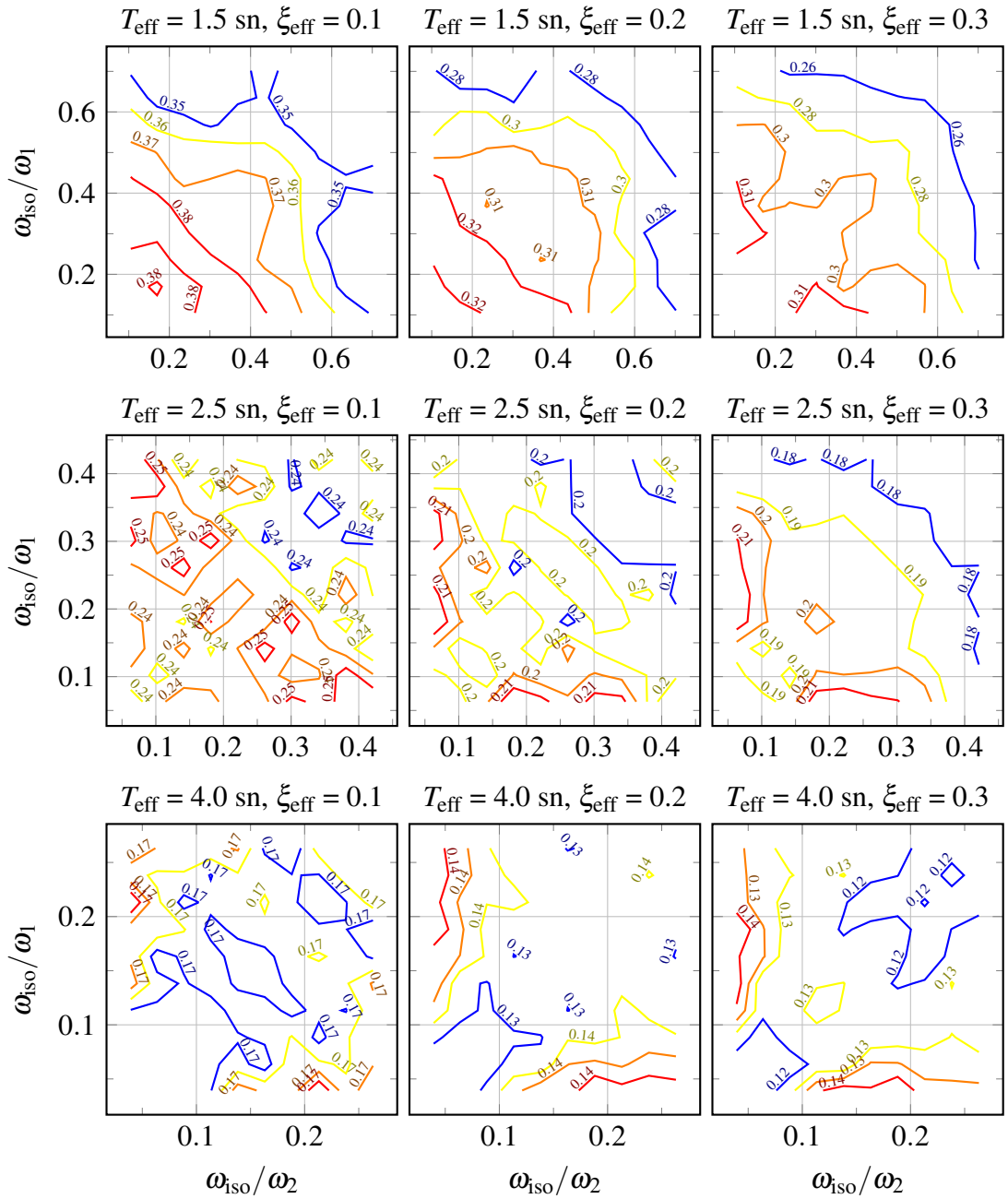
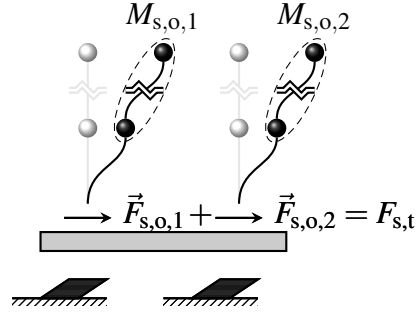


$$C_{s,o,1}/C_{b,1} = \frac{F_{s,o,1}/W_{s,o,1}}{F_{s,b,1}/W_{s,b,1}} = \frac{F_{s,o,1}/(M_{s,o,1} \times g)}{F_{s,b,1}/(M_{s,b,1} \times g)}$$



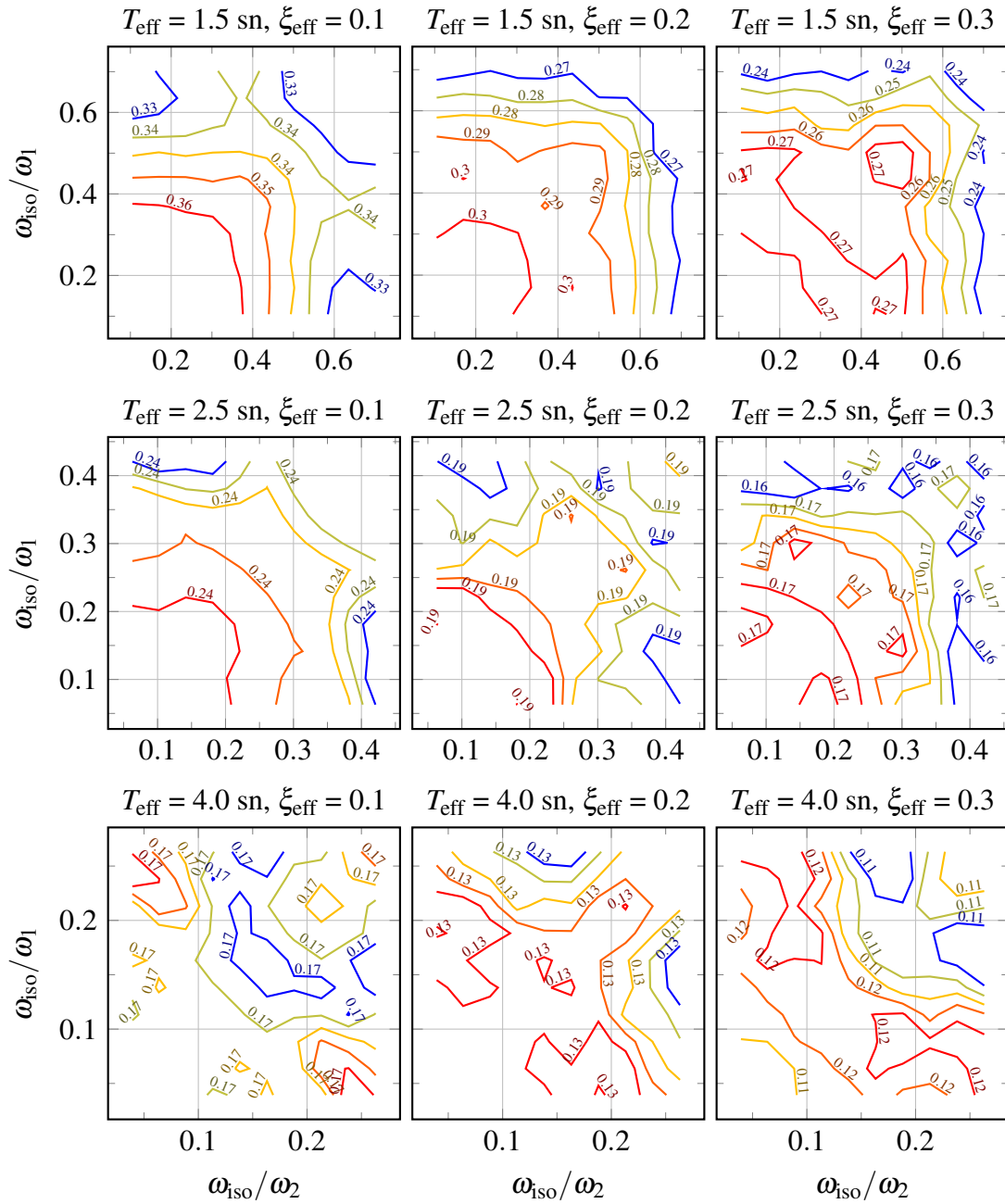
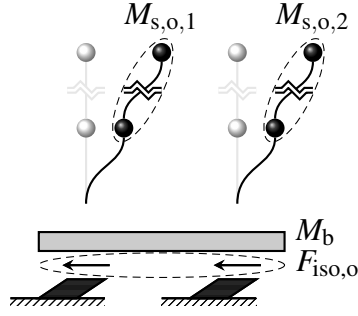
Şekil 3.24 : Ortak yalıtım düzleminde bulunan birinci yapının taban kesme kuvveti katsayısının bağımsız yalıtım düzleminde bulunan yapının taban kesme kuvveti katsayısına oranının yapıların açısal frekanslarına göre değişimi.

$$C_{s,t} = \frac{F_{s,t}}{W_{s,o,1} + W_{s,o,2}} = \frac{F_{s,t}}{M_{s,o,1} \times g + M_{s,o,2} \times g}$$



Şekil 3.25 : Ortak yalıtım düzleminde bulunan iki yapının toplam taban kesme kuvveti katsayısının yapıların açılal frekanslarına göre değişimi.

$$C_{\text{iso},0} = \frac{F_{\text{iso},0}}{W} = \frac{F_{\text{iso},0}}{M \times g} = \frac{F_{\text{iso},0}}{(M_{s,0,1} + M_{s,0,2} + M_b) \times g}$$



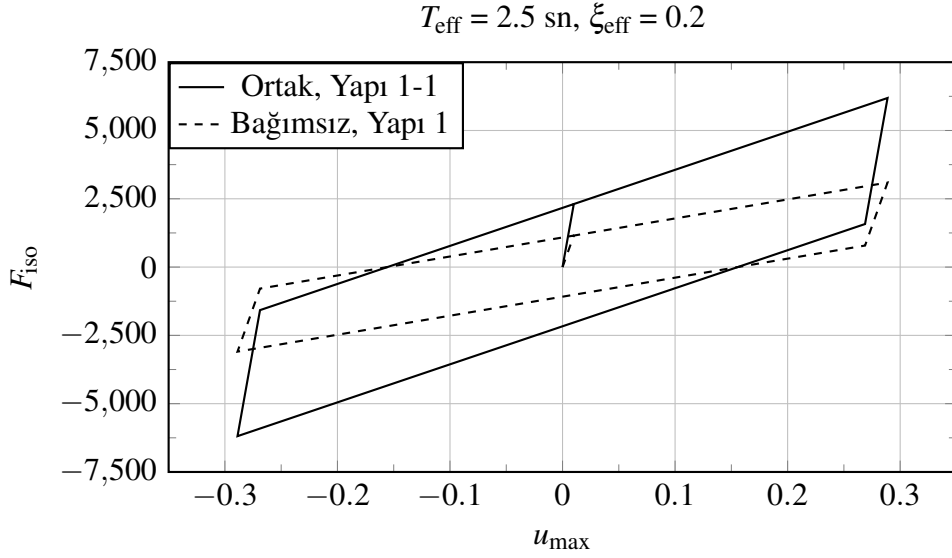
Şekil 3.26 : Ortak yalıtım düzleminde bulunan iki yapının izolator kesme kuvveti katsayısının yapıların açılmal frekanslarına göre değişimi.

periyodun aynı olduğu durumlar içinde artan eşdeğer sönüm değerleri için de artmaktadır.

Ortak yalıtım düzleminde bulunan birinci yapının kesme kuvveti katsayıları, aynı yapısal özellikler ile bağımsız yalıtım düzleminde bulunması durumunda elde edilen kesme kuvveti katsayılarına göre normalize edilerek bulunan sonuçlar Şekil 3.24’de verilmiştir. Aynı yapısal özelliklerdeki iki yapının ortak yalıtım düzleminde bulunduğu durumlar için yalıtım düzlemine ait serbest cisim diyagramı Şekil 3.22’de gösterilmiştir. Burada yalıtım birimleri üzerinde kalan kütle, üst yapıların aynı düzlemde bulunmaları durumunda iki katına çıkmaktadır. Böylece 3.2’de verilen eşdeğer periyot denklemine göre hesaplanan eşdeğer rijitlik de iki kat bulunur. Bu nedenle sabit eşdeğer sönüm değeri için yapılan doğrusal analizler sonucunda bulunan yalıtım düzlemi yer değiştirmeleri ortak yalıtım düzlemi ve bağımsız yalıtım düzlemleri için eşit bulunmaktadır. Dolayısıyla denklem 3.3 ve 3.4’ye göre hesaplanan parametrelerin eşdeğer rijitlik ile doğrusal orantılı olması sebebi ile yalıtım birimlerine ait parametreler de iki katı olarak hesaplanır. Bunun sonucunda ortak yalıtım düzleminde bulunan üst yapı ve yalıtım düzlemi atalet kuvvetlerinin ve yalıtım birimlerinin oluşturduğu kuvvetlerin aynı oranda artması üst yapılarda hesaplanan büyüklüklerin ortak ve bağımsız yalıtım düzleminde bulunmaları durumu için aynı sonuçları vermektedir. Bu nedenle birim kontur her zaman açısız frekansların eşit olduğu diyagonalden geçmektedir. Bir nolu yapının bağımsız ve ortak yalıtım düzlemlerinde bulunmaları durumunda hesaplanan parametrelerle oluşturulan histeretik Şekil 3.27’de sunulmuştur.

Şekil 3.25’de toplam taban kesme kuvveti katsayısının yapılarının açısız frekanslarına bağlı olarak değişimi gösterilmiştir. Grafikler, tüm durumlar için yapıların aynı açısız frekans değerlerine karşılık gelen diyagonale göre simetriklerdir. Toplam taban kesme kuvvetleri iki yapının taban kesme kuvvetlerinin vektörel olarak toplanması ile edilmiştir. Dolayısıyla bu grafiklerde iki yapının farklı sıralanışları aynı sonuçları vermektedir. Ayrıca okunan değerler arasındaki oran $C_{s,o,1}$ grafiklerine kıyasla daha düşüktür.

Yalıtım birimi kesme kuvveti katsayısının yapıların açısız frekanslarına göre değişimi ise Şekil 3.26’de verilmiştir. Burada da $C_{s,t}$ grafiklerine benzer şekilde aynı açısız frekans değerlerine göre simetri mevcuttur. Çizelge 3.3’de gösterilen her bir durum



Şekil 3.27 : 1 nolu yapının ortak ve bağımsız yalıtım düzleminde bulunması durumu için hesaplanan histeretik eğrileri.

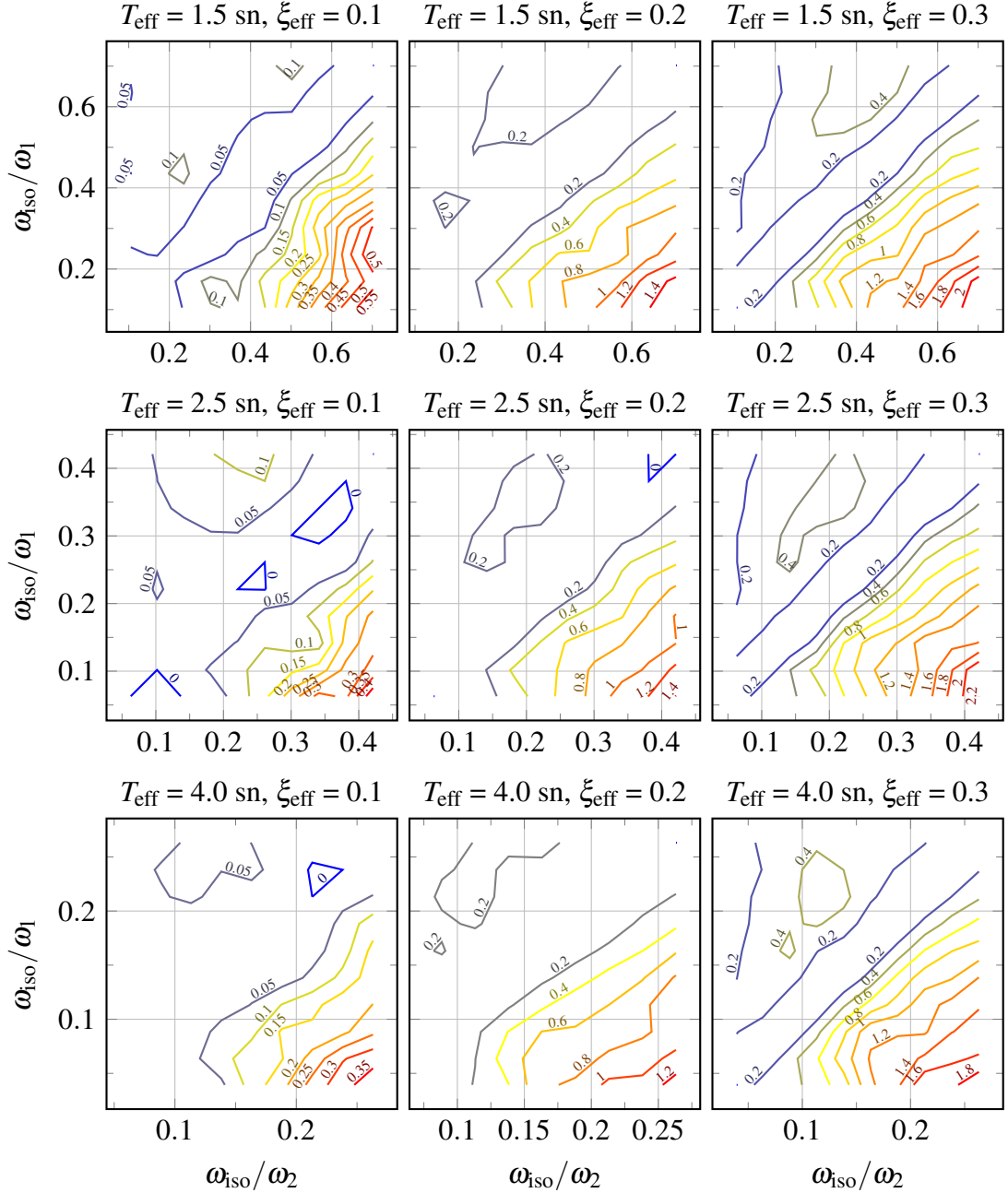
için yapılan analizlerde yalıtım birimlerinin eşdeğer rijitlikleri ve en büyük yer değiştirme değeri sabit kalmaktadır. Dolayısıyla sabit T_{eff} ve ξ_{eff} değerleri için yapılan analizlerde yalıtım birimlerine ait kesme kuvveti sabit olmaktadır.

Şekil 3.28’de denklem 3.6’de verilen birinci yapıya ait taban kesme kuvveti katsayısının toplam taban kesme kuvveti katsayısına göre bağıl hatası gösterilmiştir. Burada bağıl hatanın sıfıra eşit olduğu noktalar, iki yapının aynı açısıl frekans değerlerine karşılık gelen diyagonal üzerinde bulunmaktadır. Ayrıca tüm durumlar için gösterilen grafiklerde yapıların farklı açısıl frekanslara sahip olması durumu için bağıl hata değerlerinin pozitif olması, yapıların ortak yalıtım düzleminde bulunmaları sebebiyle taban kesme kuvvetlerinde her zaman artış olduğunu göstermektedir.

Ortak yalıtım düzleminde bulunan iki yapının taban kesme kuvveti katsayıları toplamının toplam taban kesme kuvveti katsayısına göre bağıl hatası Şekil 3.29’de sunulmuştur. $C_{s,o,1, \text{err}}$ grafiklerine benzer olarak diyagonal üzerinde bağıl hatanın sıfır olduğu noktalar ve bu diyagonale göre simetri bulunmaktadır. İki yapının aynı yapısal özelliklerde olması durumunda $C_{s,t, \text{err}}$ bağıl hatasının sıfıra eşit olması, yapıların ortak yalıtım düzleminde bulunmaları sebebiyle taban kesme kuvvetlerinde amplifikasyon olmaması ile açıklanmaktadır.

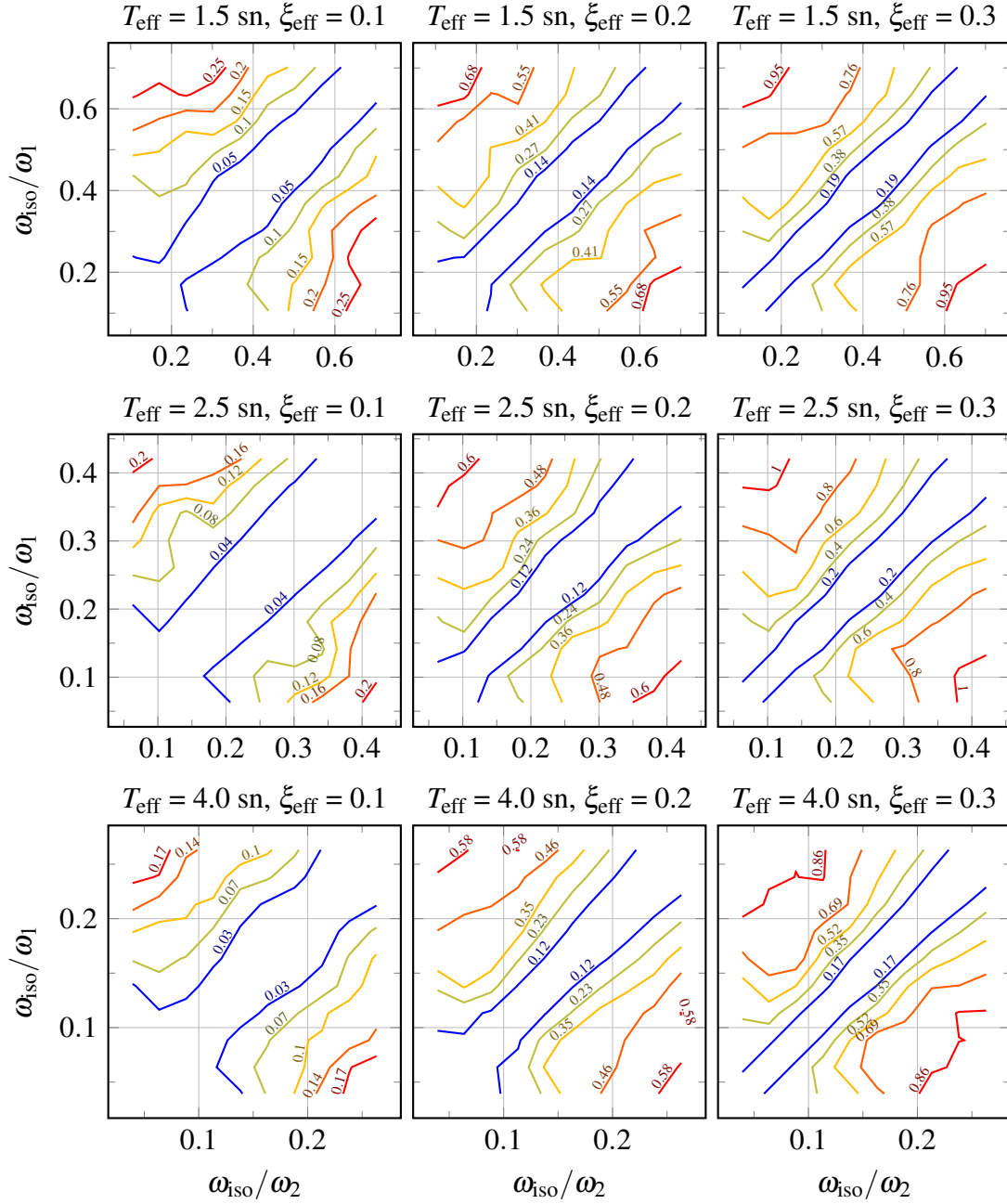
Şekil 3.30’de izolatör kesme kuvveti katsayısının toplam taban kesme kuvveti katsayısına göre bağıl hatası gösterilmiştir.

$$C_{s,o,1,err} = \frac{C_{s,o,1} - C_{s,t}}{C_{s,t}}$$



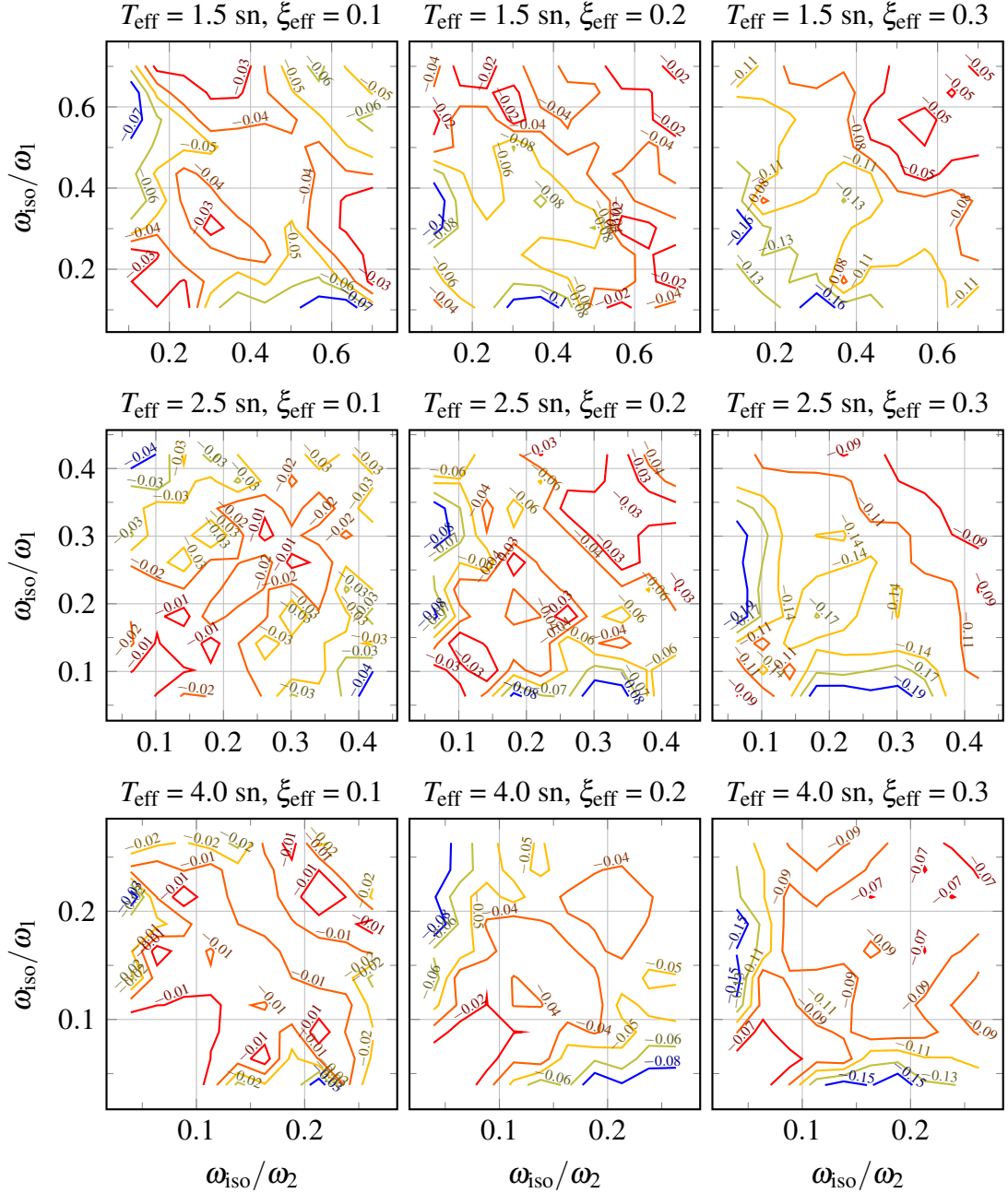
Şekil 3.28 : Ortak yalıtım düzleminde bulunan iki yapıdan birincinin taban kesme kuvveti katsayısının toplam taban kesme kuvveti katsayısına göre bağıl hatasının yapıların açılal frekanslarına göre değişimi.

$$C_{s,t,err} = \frac{(C_{s,o,1} + C_{o,2}) - 2C_{s,t}}{2C_{s,t}}$$



Şekil 3.29 : Ortak yalıtım düzleminde bulunan iki yapının taban kesme kuvveti katsayıları toplamının toplam taban kesme kuvveti katsayısına göre bağlı hatasının yapıların açılmal frekanslarına göre değişimi.

$$C_{\text{iso},0,\text{err}} = \frac{C_{\text{iso},0} - C_{s,t}}{C_{s,t}}$$



Şekil 3.30 : Ortak yalıtım düzleminde bulunan iki yapının izolatör kesme kuvveti katsayısının toplam taban kesme kuvveti katsayısına göre bağlı hatasının yapıların açılmal frekanslarına göre değişimi.

3.6.3 Kat kesme kuvvetlerinin irdelenmesi

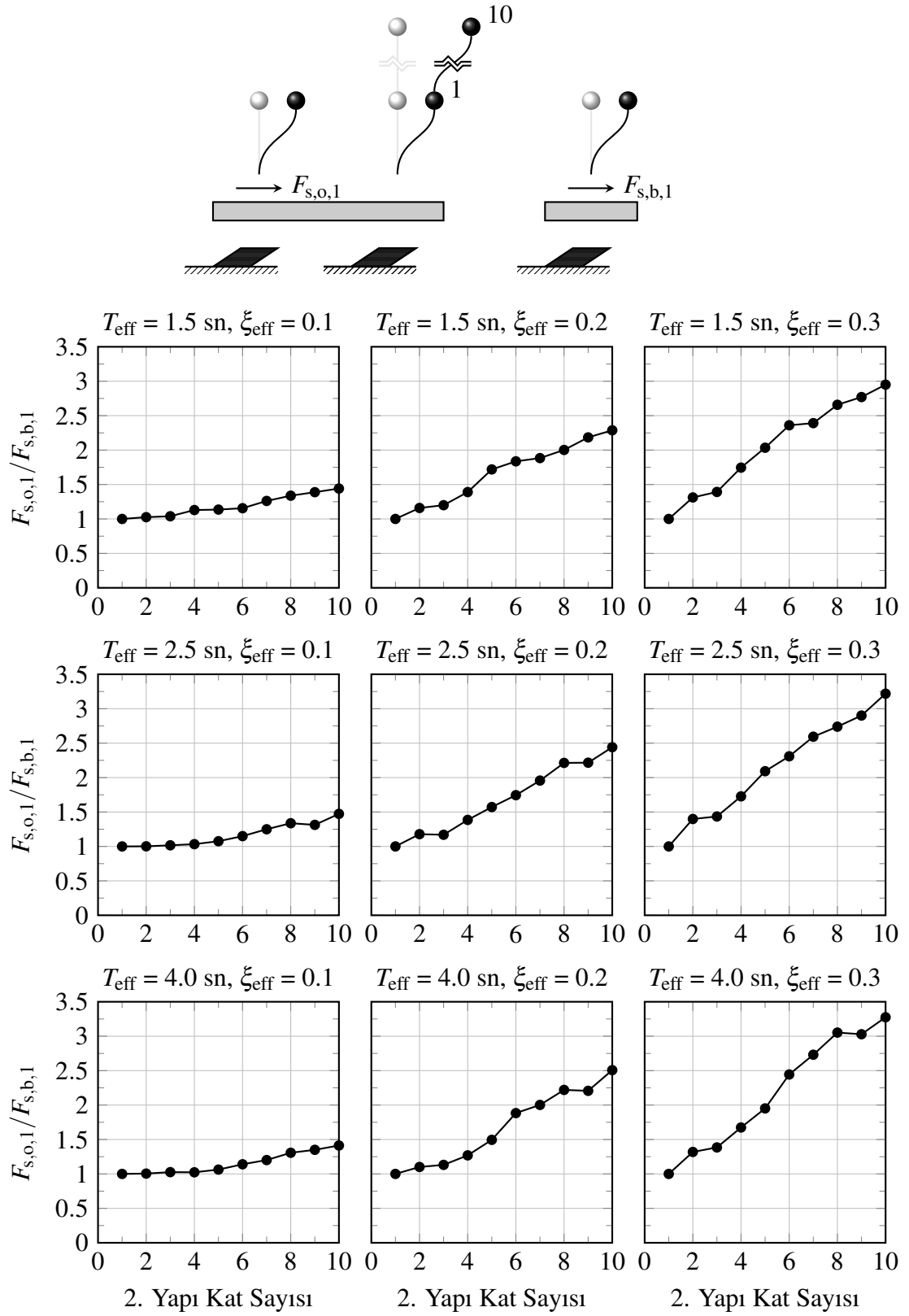
Kat kesme kuvvetleri, ortak yalıtım düzleminde bulunan ikili yapılardan birinci yapı için, ikinci yapının kat adetleri ve buna bağlı olarak açısal frekanslarının Çizelge 3.1’de belirtilen sınırlar dahilinde parametrik değiştiği durumlarda incelenmiştir. Burada birinci yapı, bir numaralı yapı olup analizlerde tüm yapısal özellikleri sabit kalmaktadır. Buna karşılık yapısal özellikleri parametrik değişen ikinci yapı için çözülecek on adet analiz modeli Çizelge 3.3’de belirtilen durumlar için tekrarlanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 3.31’de sunulmuştur.

Ortak yalıtım düzleminde bulunan iki yapının aynı yapısal özelliklerde olması durumunda, analiz sonucunda bulunan her bir üst yapıya ait büyüklükler, üst yapıların aynı özellikler ile bağımsız yalıtım düzleminde bulunmaları durumu için yapılan analiz sonuçlarından elde edilen büyüklüklere eşit olmaktadır. Bu nedenle birinci yapının farklı yapılarla birlikte olduğu durumlarda elde edilen kesme kuvvetleri, birinci yapının bağımsız yalıtım düzleminde olması durumunda hesaplanan kesme kuvvetine göre normalize edilmiştir.

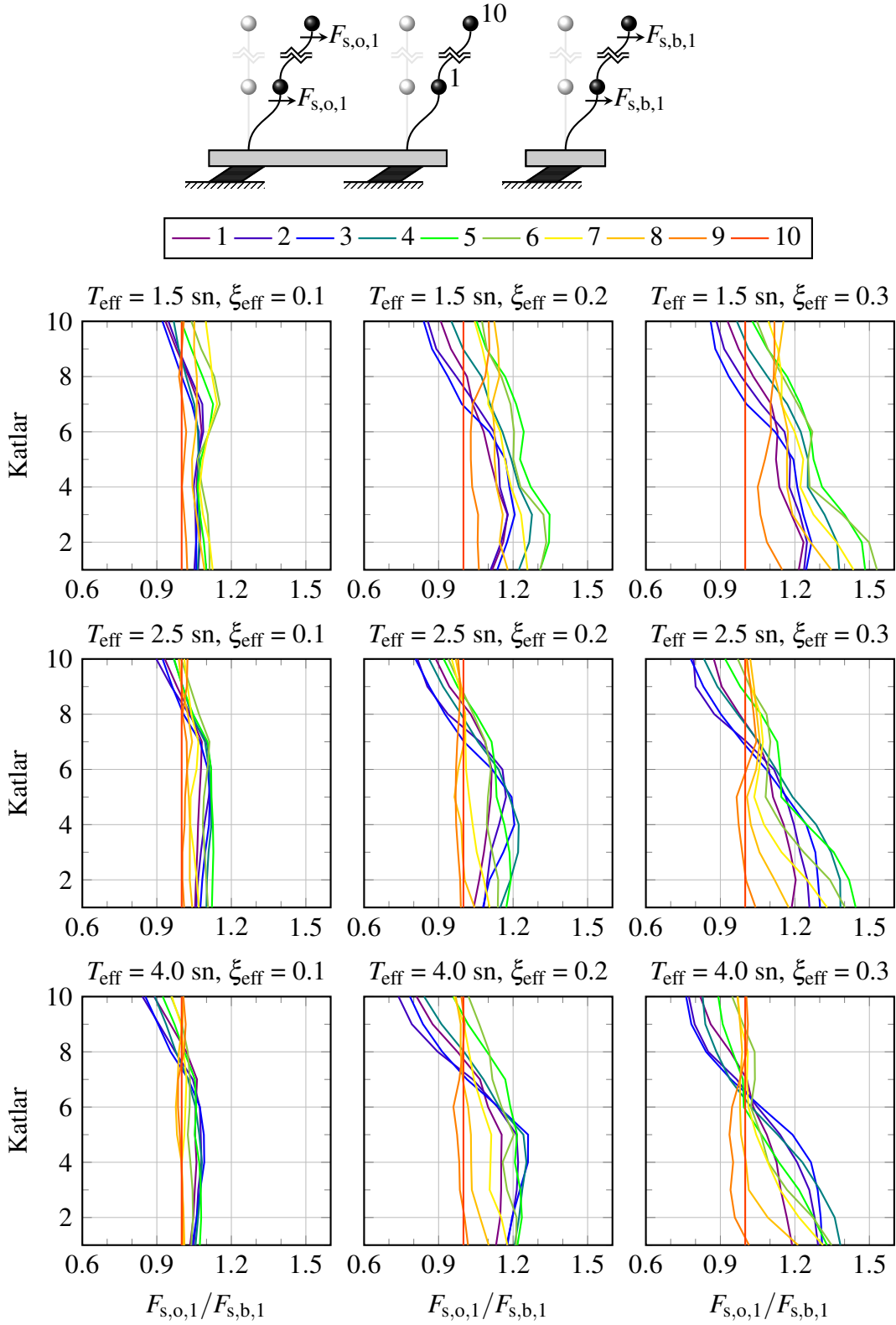
Şekil 3.32’de on nolu birinci yapının kat kesme kuvvetleri, ikinci yapının değişen yapı parametreleri için, birinci yapının bağımsız yalıtım düzleminde bulunması durumunda oluşan kat kesme kuvvetlerine göre normalize edilmiş hali gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 3.33’de on nolu birinci yapı için okunan kat kesme kuvveti ilgili katın üzerinde bulunan yapı kütlelerine bölünerek hesaplanan katsayılar gösterilmiştir.

Şekil 3.31’den görülebileceği gibi birinci yapıda oluşan kesme kuvvetleri ikinci yapının artan yapı numaraları için artmaktadır. Ayrıca aynı eşdeğer periyot değerlerine karşılık, artan eşdeğer sönüm oranları için oluşan en büyük kesme kuvvetleri de önemli oranda artmaktadır. Bu durum literatürde yalıtım birimlerinin yüksek eşdeğer sönüm oranı sebebiyle oluşan büyük histeretik doğrusalsızlığın üst yapıların yüksek mod etkilerini artırması olarak geçmektedir. Buna rağmen aynı eşdeğer sönüm oranına karşılık farklı eşdeğer periyot değerleri için kesme kuvvetleri değişimleri benzer olmaktadır.

Şekil 3.32’de verilen sonuçlarda birinci yapının on katlı olması durumunda değişen ikinci yapı özelliklerine göre çoğunlukla üst kat kesme kuvvetlerinin bağımsız

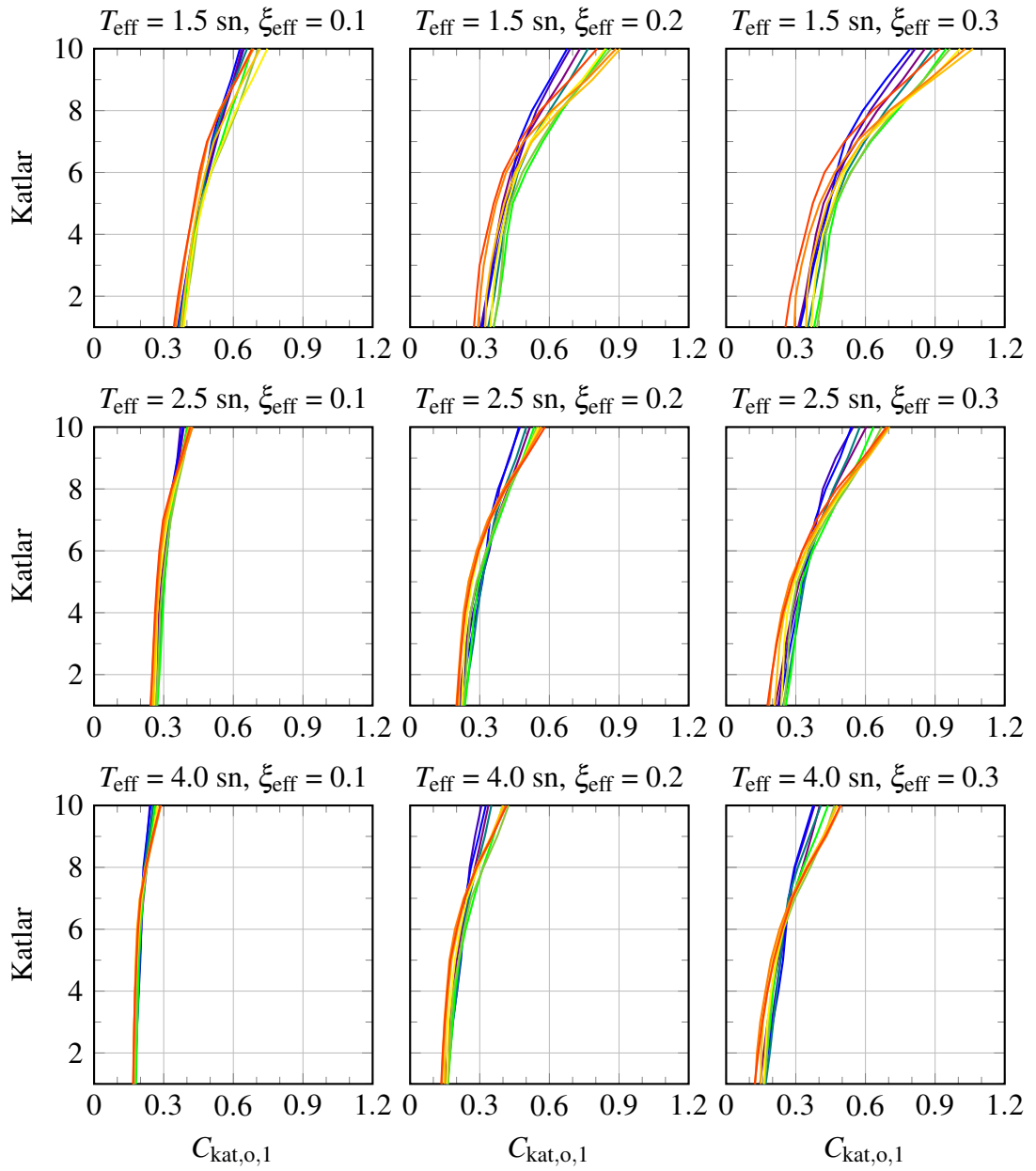
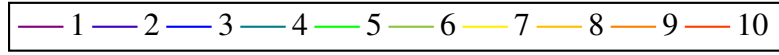
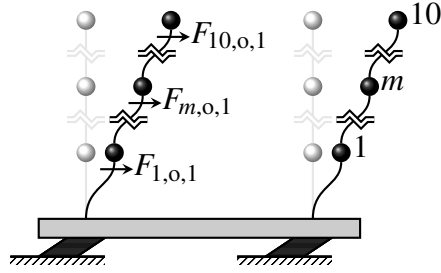


Şekil 3.31 : Bir katlı birinci yapı normalize kesme kuvvetlerinin ikinci yapının kat sayısına göre değişimi.



Şekil 3.32 : On katlı birinci yapı normalize kat kesme kuvvetlerinin ikinci yapının kat sayısına göre değişimi.

$$C_{\text{kat,o,1}} = \sum_{i=m}^{10} F_{i,\text{o,1}} / \sum_{i=m}^{10} W_{i,\text{o,1}}$$



Şekil 3.33 : On katlı birinci yapı kat kesme kuvveti katsayılarının ikinci yapının kat sayısına göre değişimi.

yalıtım düzleminde bulunması durumuna göre azaldığı, alt katlarda ise arttığı görülmektedir. Ayrıca ikinci yapının değişimlerinden kaynaklanan kat kesme kuvvetlerindeki değişim hassasiyetinin yalıtım birimi sönüm oranlarının artması ile büyüdüğü tespit edilmektedir.

Şekil 3.33' görülen sonuçlarda ise sismik yalıtımlı yapı taban kesme kuvvetlerinin üst katlara dağılımının düşük eşdeğer sönüm ve yüksek periyot için dikdörtgen formunda olmasına rağmen artan eşdeğer sönüm ve azalan periyot değerlerine karşılık ters üçgen formuna döndüğü görülmektedir.

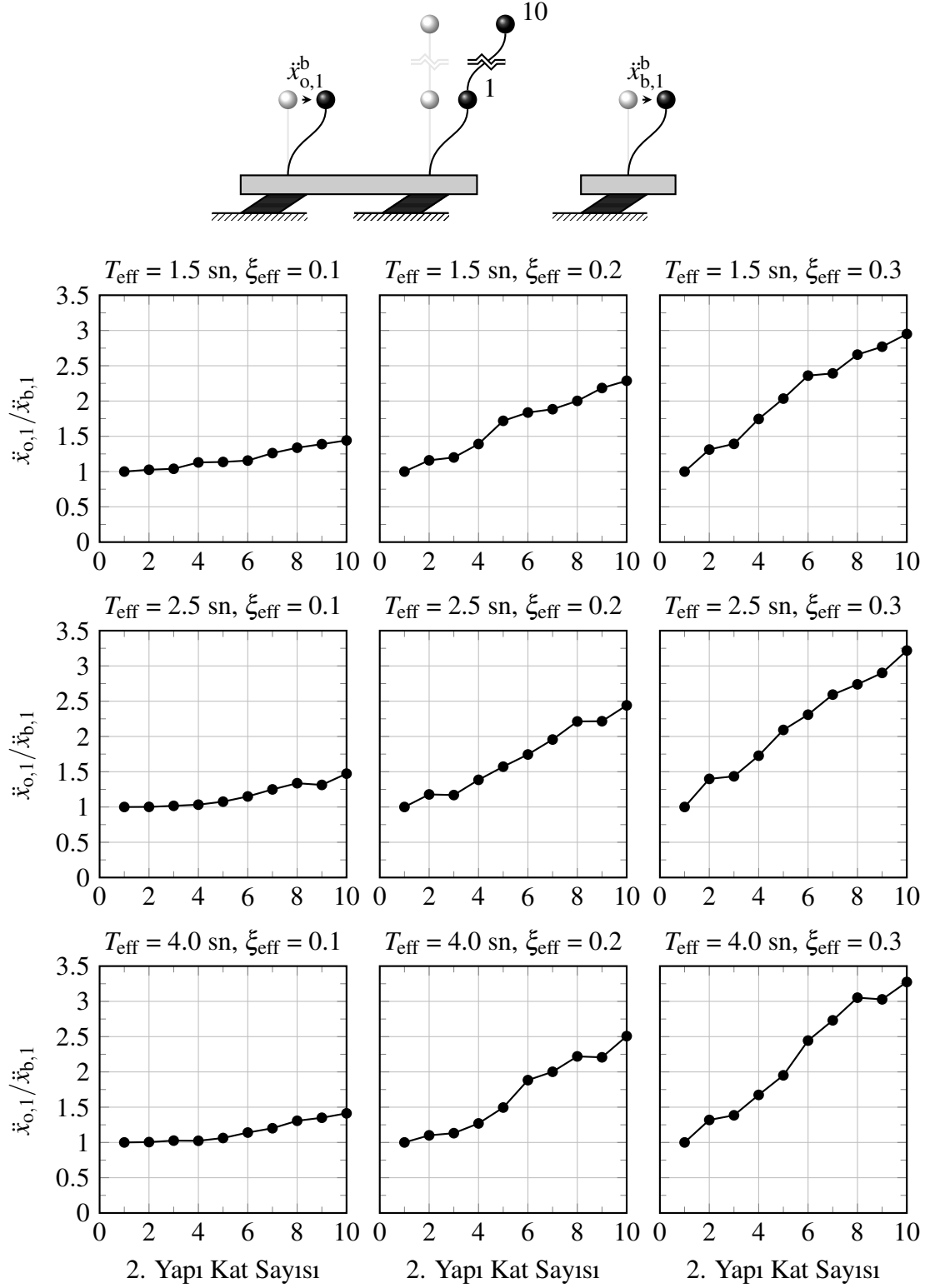
3.6.4 Kat ivmelerinin irdelenmesi

Birinci yapıya ait mutlak kat ivmeleri, ikinci yapının değişimine bağlı olarak belirlenmiş ve birinci yapının bağımsız yalıtım düzleminde bulunması durumuna göre normalize edilmiştir. Birinci yapının yalnızca bir nolu yapı özellikleri ile oluşturulduğu durumlar Şekil 3.34'de ve birinci yapının on nolu yapı özellikleri ile oluşturulduğu durumlar için elde edilen sonuçlar ise Şekil 3.35'de sunulmuştur.

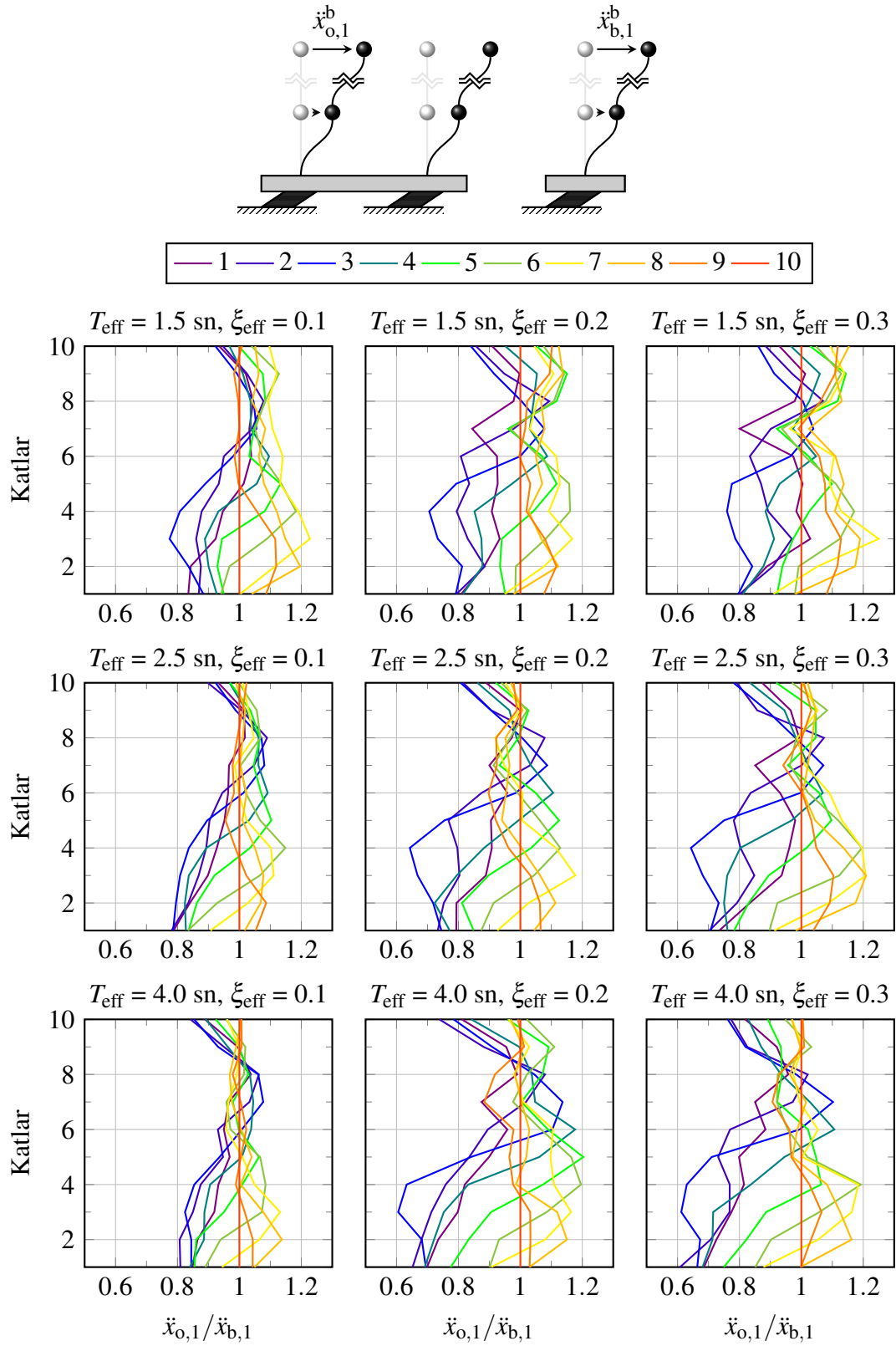
Burada birinci yapıya ait en büyük kat ivme oranlarının, Şekil 3.31'de verilen kesme kuvveti oranları ile aynı olduğu görülmektedir. Birinci yapıya etkiyen mutlak ivmelerin artması ile kütlesi değişmeyen bir katlı ve tek serbestlik dereceli bir nolu yapının kesme kuvvetleri de aynı oranda artmaktadır. Yapı katlarına etkiyen mutlak ivme denklem 3.7'e göre hesaplanmıştır.

$$\ddot{x}_{1,1}^{abs} = \ddot{x}_{1,1}^b + \ddot{x}_b^g + \ddot{x}_g^{abs} \quad (3.7)$$

Burada $\ddot{x}_{1,1}^{abs}$ bir nolu birinci yapının mutlak ivmesini, $\ddot{x}_{1,1}^b$, birinci yapının yalıtım düzlemine göre bağıl ivmesini, $\ddot{x}_b^g$ yalıtım düzleminin zemine göre bağıl ivmesini, $\ddot{x}_g^{abs}$ ise yer ivmesini temsil etmektedir.



Şekil 3.34 : Bir katlı birinci yapı normalize kat ivmelerinin ikinci yapının kat sayısına göre değişimi.

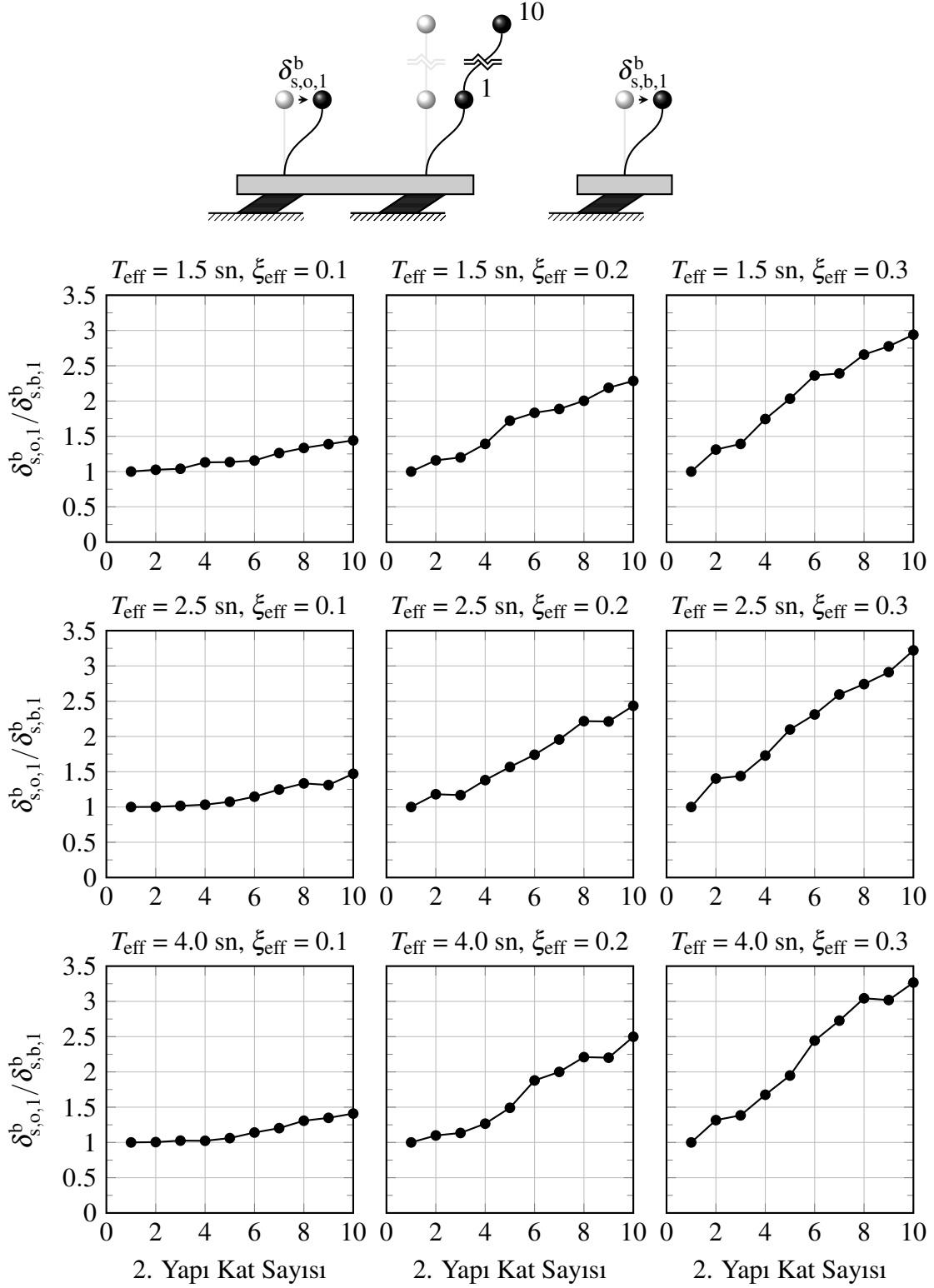


Şekil 3.35 : On katlı birinci yapı normalize kat ivmelerinin ikinci yapının kat sayısına göre değişimi.

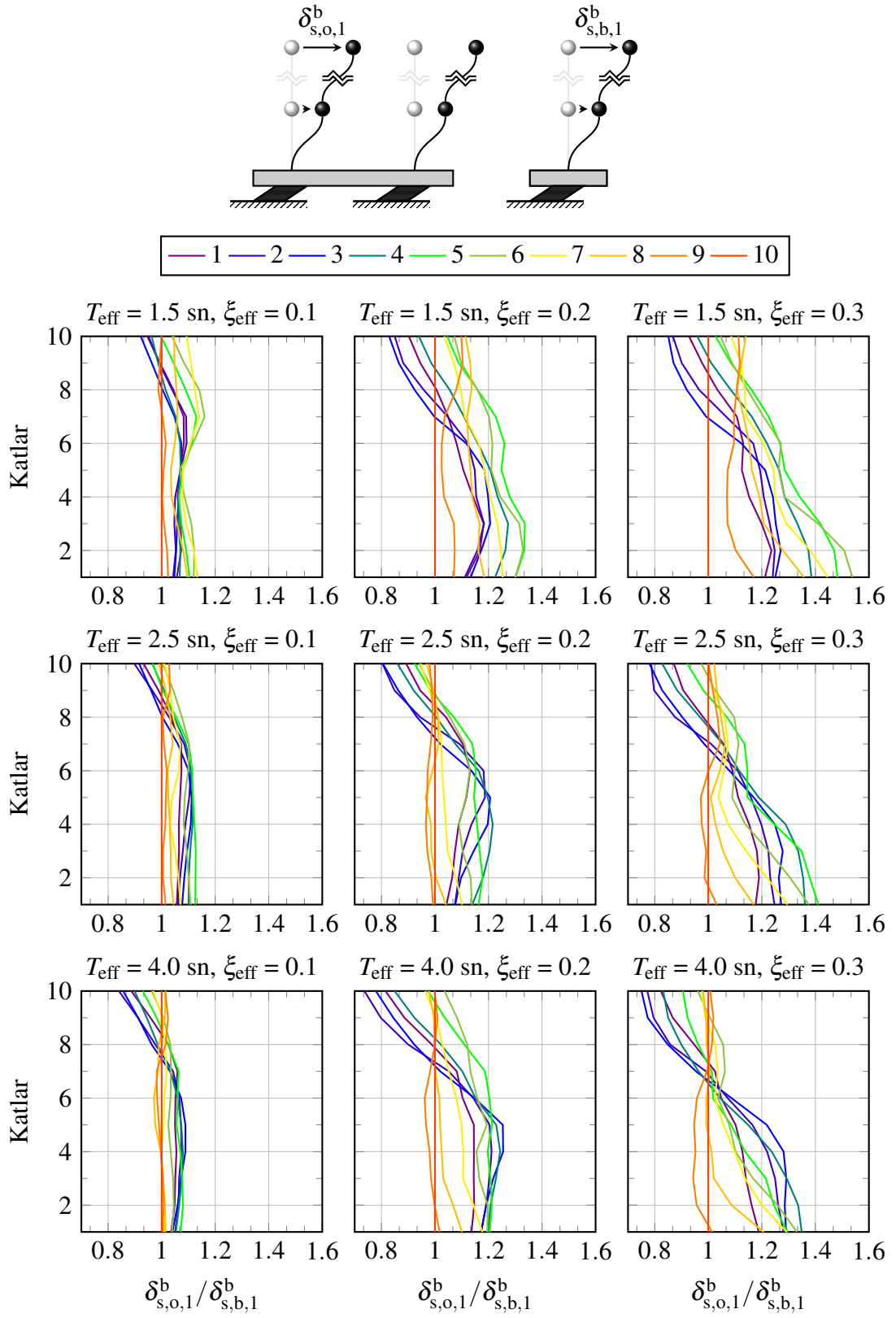
3.6.5 Görelî kat ötelemelerinin irdelenmesi

Birinci yapının bir nolu yapı özelliklerinin kullanıldığı durumlarda, ikinci yapının parametrik değişimine bağılı olarak incelenen görelî kat ötelemeleri, Şekil 3.36'de sunulmuştur. Benzer olarak birinci yapının on nolu yapı özellikleri kullanılarak tamamlanan analizler ise Şekil 3.37'de sunulmuştur.

Burada bir nolu birinci yapı için bulunan deplasmanların yalıtım düzlemine göre bağılı hareketi hesaplanmıştır. Bir nolu birinci yapıya ait görelî kat ötelemelerinin değişim oranları, Şekil 3.31'de verilen kesme kuvvetleri oranıyla aynı olmaktadır. Yapı rijitliğinin sabit kalması sebebiyle doğrusal elastik ve tek katlı bir nolu yapı için artan kesme kuvvetlerine karşılık görelî kat ötelemeleri de Hooke kanununa uygun olarak artmaktadır.



Şekil 3.36 : Bir katlı birinci yapı normalize göreli kat ötelemelerinin ikinci yapının kat sayısına göre değişimi.



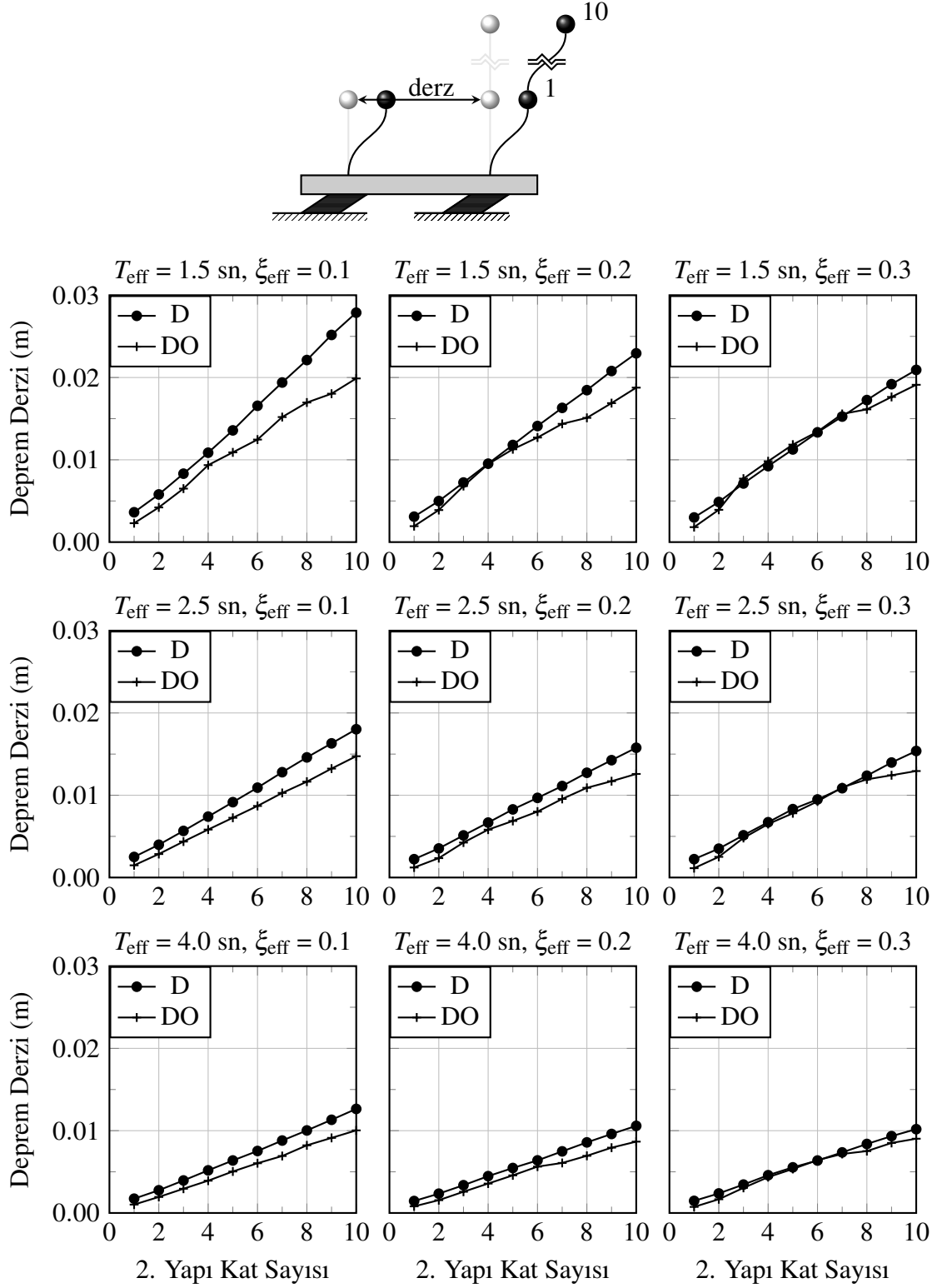
Şekil 3.37 : On katlı birinci yapı normalize görel kat ötelemelerinin ikinci yapının kat sayısına göre değişimi.

3.6.6 Deprem derz mesafelerinin irdelenmesi

Bir nolu birinci yapının kat seviyesinde bulunması gerekli deprem derz mesafeleri, ikinci yapının değişimine bağlı olarak izelge 3.3’de belirtilen durumlar için irdelenmiştir.

Derz mesafeleri, doğrusal olmayan analizlerde birinci ve ikinci yapıların aynı kat hizaları için birbirlerine doğru yaptıkları deplasmanların sayısal olarak toplanması ile elde edilir. Daha sonra ivme kayıtlarının her zaman adımı için kaydedilen değerlerinden en büyüklerinin ortalaması alınarak sonuçlar elde edilir. Doğrusal analizlerde ise aynı katın yapacağı en büyük deplasmanların karelerinin toplamının karekökü her zaman adımı için hesaplanır ve en büyük değerlerin ortalamaları bulunur. Yönetmeliklerde belirtilen doğrusal yöntem ile doğrusal olmayan analizlerden elde edilen sonuçlar Şekil 3.38’de karşılaştırılmıştır. Burada "D" harfi doğrusal analizleri, "DO" harfleri ise doğrusal olmayan analizler temsil etmektedir.

Grafiklerden yönetmeliklerin belirttiği doğrusal yöntemler ile hesaplanan deprem derzlerinin büyük oranda yeterli olduğu görölmektedir. Eşdeğer periyodun sabit sönüm oranlarına karşılık artması durumunda iki yöntem ile bulunan sonuçlarda azalma olmaktadır. Ayrıca eşdeğer periyodun sabit değerlerine karşılık artan sönüm oranları için doğrusal yöntem ile bulunan sonuçlarda azalma meydana gelmektedir. Buna karşılık doğrusal olmayan analizlerde eşdeğer sönüm oranına bağlı büyük değişimler olmamaktadır. Dolayısıyla doğrusal yöntemlerin doğrusal olmayan analiz sonuçlarına en yakın değerler, eşdeğer sönüm oranının en büyük olduğu durumlar için elde edilmiştir.

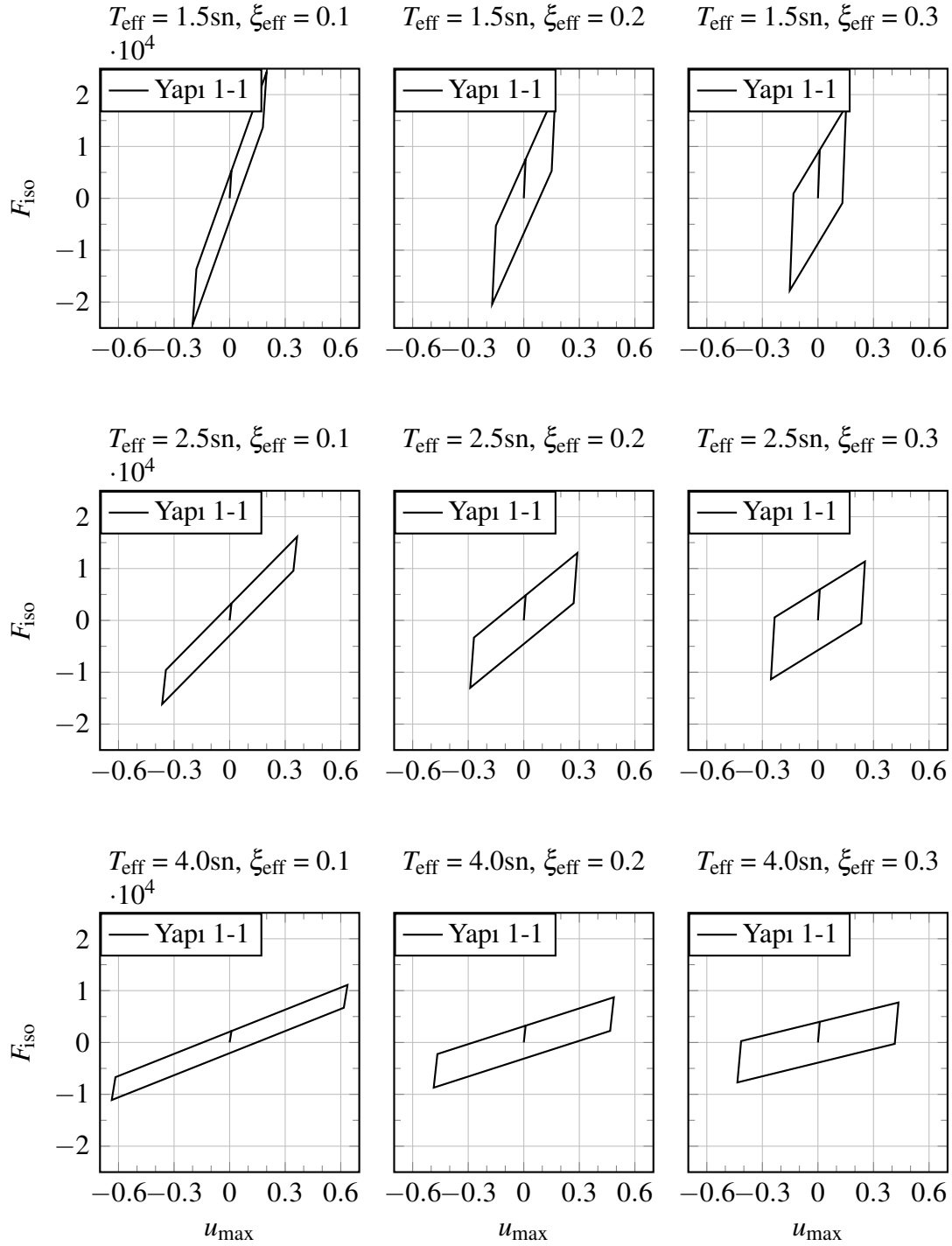


Şekil 3.38 : Bir katlı birinci yapı için gerekli deprem derz mesafelerinin ikinci yapının kat sayısına göre doğrusal ve doğrusal olmayan yöntemler için değişimi.

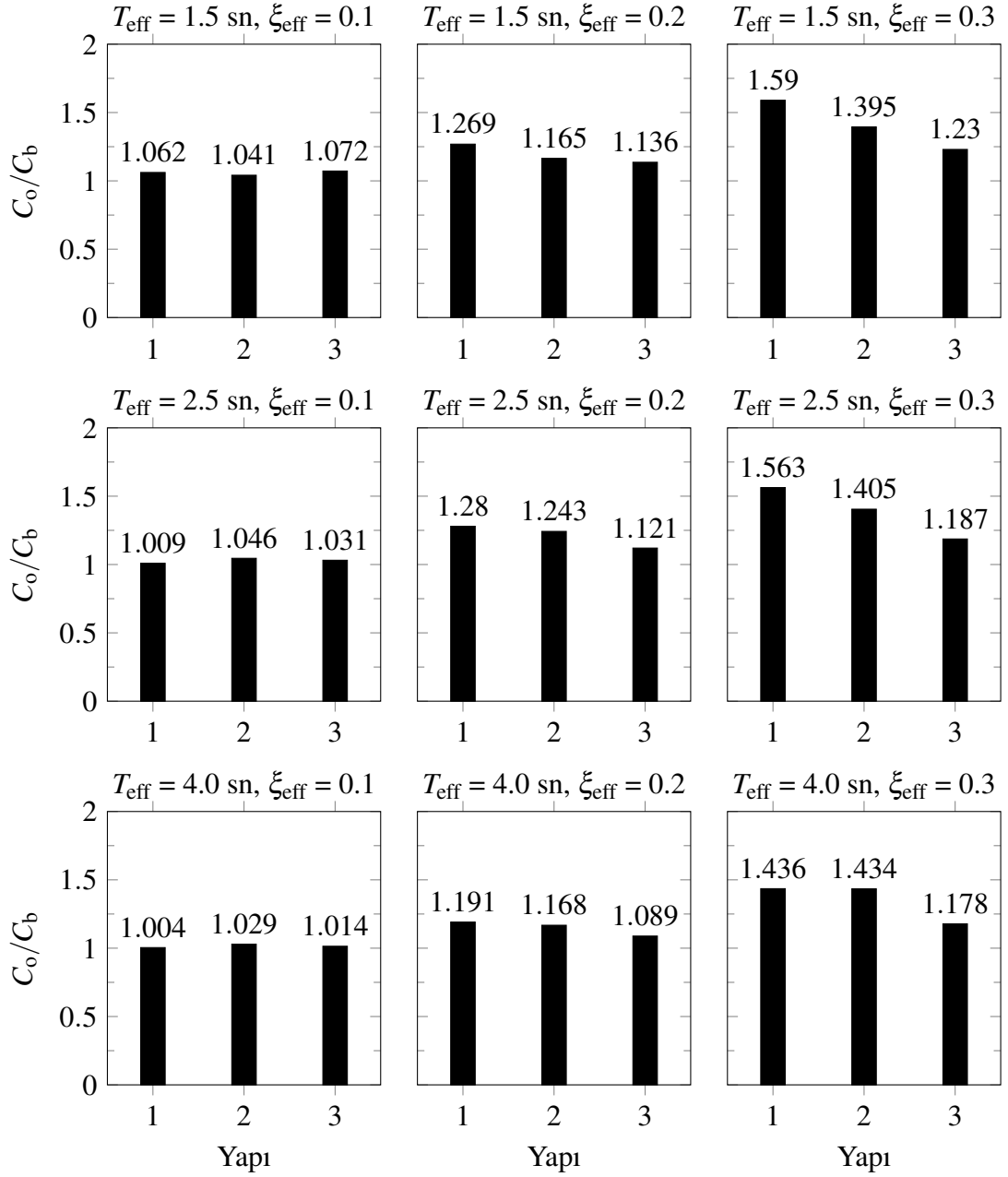
yapı ile ortak yalıtım düzleminde bulunması durumu için taban kesme kuvveti artışı $T_{eff}=1.5s_n$ ve $\xi_{eff}=0.3$ değerleri için Şekil 3.31'den %31 okunmaktadır. Dolayısıyla bir ve iki katlı yapılara ek olarak üç katlı bir yapının da ortak yalıtım düzleminde bulunması durumunda bir katlı yapı kesme kuvveti %28 daha artmaktadır. Ayrıca her yapı için denklem 3.6'de verilen bağıl hata formüllerine uygun olarak hesaplanan oranlar Şekil 3.42'de verilmiştir. Grafikten de görüleceği yalıtım birimlerinin eşdeğer sönüm oranının artması ile üst yapı taban kesme kuvvetleri katsayısının toplam taban kesme kuvveti katsayısına göre olan bağıl hata artmaktadır. Yalıtım biriminin $T_{eff}=1.5s_n$ değeri için en yüksek değeri olan 0.612'ye ulaşmaktadır.

Sismik yalıtımlı yapıların denklem 3.5 ve 3.6'ya uygun olarak hesaplanmış toplam taban kesme kuvvet katsayıları ve bağıl hata değerleri sırasıyla Şekil 3.4 ve 3.5'de verilmiştir. Okunan en büyük hata oranı $T_{eff}=1.5s_n$ ve $\xi_{eff}=0.3$ değerleri için yaklaşık %46.8 olmaktadır. Bir ve iki katlı yapıların ortak yalıtım düzleminde bulunduğu yapı düzeni ve aynı yalıtım birimi değerleri için toplam kesme kuvveti katsayısı bağıl hatası %21.7 olmaktadır. Dolayısıyla üç katlı yapının eklenmesi hata oranını yaklaşık %25.1 arttırmaktadır.

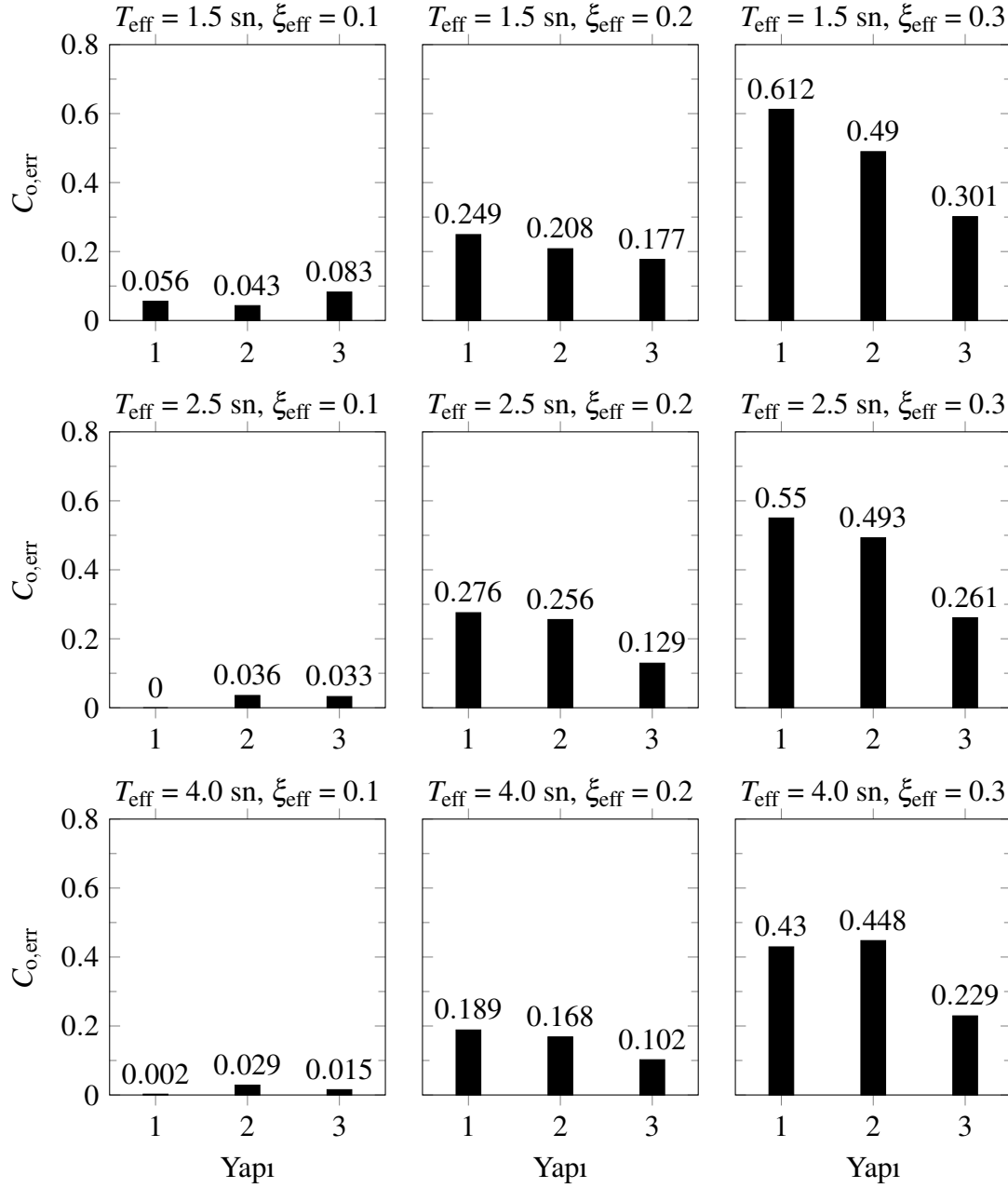
Denklem 3.6 ve 3.7'de sırasıyla yalıtım birimi kesme kuvveti katsayısı ve üst yapı toplam kesme kuvveti katsayısına göre bağıl hatası verilmiştir. En büyük hata oranı $T_{eff}=2.5s_n$ ve $\xi_{eff}=0.3$ değerleri için %9.4 okunmaktadır.



Şekil 3.40 : Ortak yalıtım düzleminde bulunan üç bağımsız yapı için yalıtım birimi kuvvet-yer değiştirme iskelet eğrileri.



Şekil 3.41 : Ortak yalıtım düzleminde bulunan üç yapının taban kesme kuvveti katsayılarının bağımsız yalıtım düzleminde bulunan yapıların taban kesme kuvveti katsayılarına oranı.



Şekil 3.42 : Ortak yalıtım düzleminde bulunan üç yapının taban kesme kuvveti katsayılarının toplam taban kesme kuvveti katsayılarına göre bağlı hataları.

Çizelge 3.4 : Ortak yalıtım düzleminde bulunan üç yapının toplam taban kesme kuvveti katsayıları.

	$\xi_{eff}=0.1$	$\xi_{eff}=0.2$	$\xi_{eff}=0.3$
$T_{eff}=1.5$	0.3757	0.3200	0.2918
$T_{eff}=2.5$	0.2444	0.1990	0.1869
$T_{eff}=3.5$	0.1662	0.1309	0.1207

Çizelge 3.5 : Ortak yalıtım düzleminde bulunan üç yapının taban kesme kuvveti katsayıları toplamının toplam taban kesme kuvveti katsayılarına göre bağlı hataları.

	$\xi_{eff}=0.1$	$\xi_{eff}=0.2$	$\xi_{eff}=0.3$
$T_{eff}=1.5$	0.0606	0.2115	0.4678
$T_{eff}=2.5$	0.0219	0.2203	0.4347
$T_{eff}=3.5$	0.0154	0.1531	0.3689

Çizelge 3.6 : Ortak yalıtım düzleminde bulunan üç yapının izolatör kesme kuvveti katsayıları.

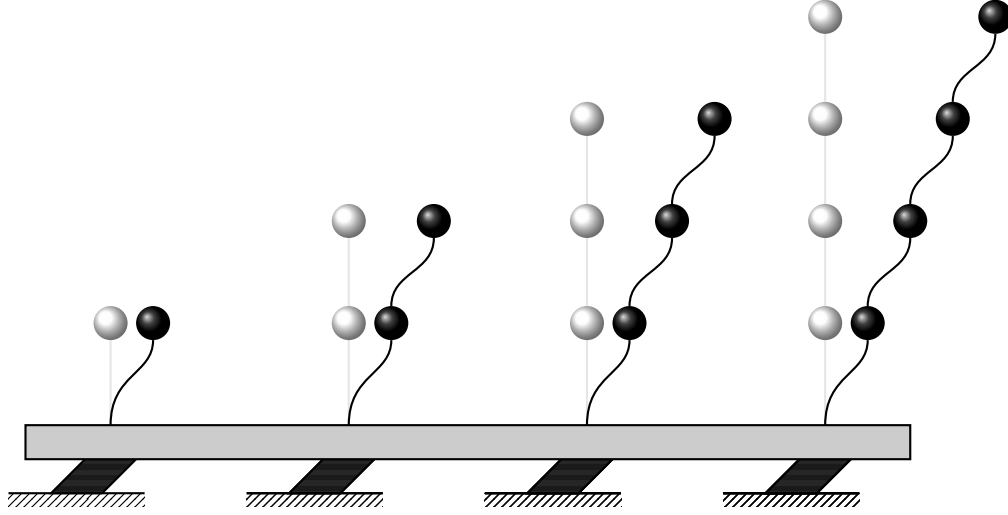
	$\xi_{eff}=0.1$	$\xi_{eff}=0.2$	$\xi_{eff}=0.3$
$T_{eff}=1.5$	0.3627	0.3038	0.2648
$T_{eff}=2.5$	0.2404	0.1937	0.1692
$T_{eff}=3.5$	0.1654	0.1298	0.1149

Çizelge 3.7 : Ortak yalıtım düzleminde bulunan üç yapının izolatör kesme kuvveti katsayılarının toplam taban kesme kuvveti katsayılarına göre bağlı hataları.

	$\xi_{eff}=0.1$	$\xi_{eff}=0.2$	$\xi_{eff}=0.3$
$T_{eff}=1.5$	-0.0346	-0.0506	-0.0925
$T_{eff}=2.5$	-0.0162	-0.0267	-0.0944
$T_{eff}=3.5$	-0.0047	-0.0081	-0.0485

3.7.2 Ortak yalıtım düzleminde bulunan dört bağımsız yapının incelenmesi

Yapı düzeni Şekil 3.39’de gösterilen ortak yalıtım düzleminde bulunan sismik yalıtımlı dört yapı bu başlık altında incelenmiştir.



Şekil 3.43 : Ortak yalıtım düzleminde bulunan dört bağımsız yapı düzeni.

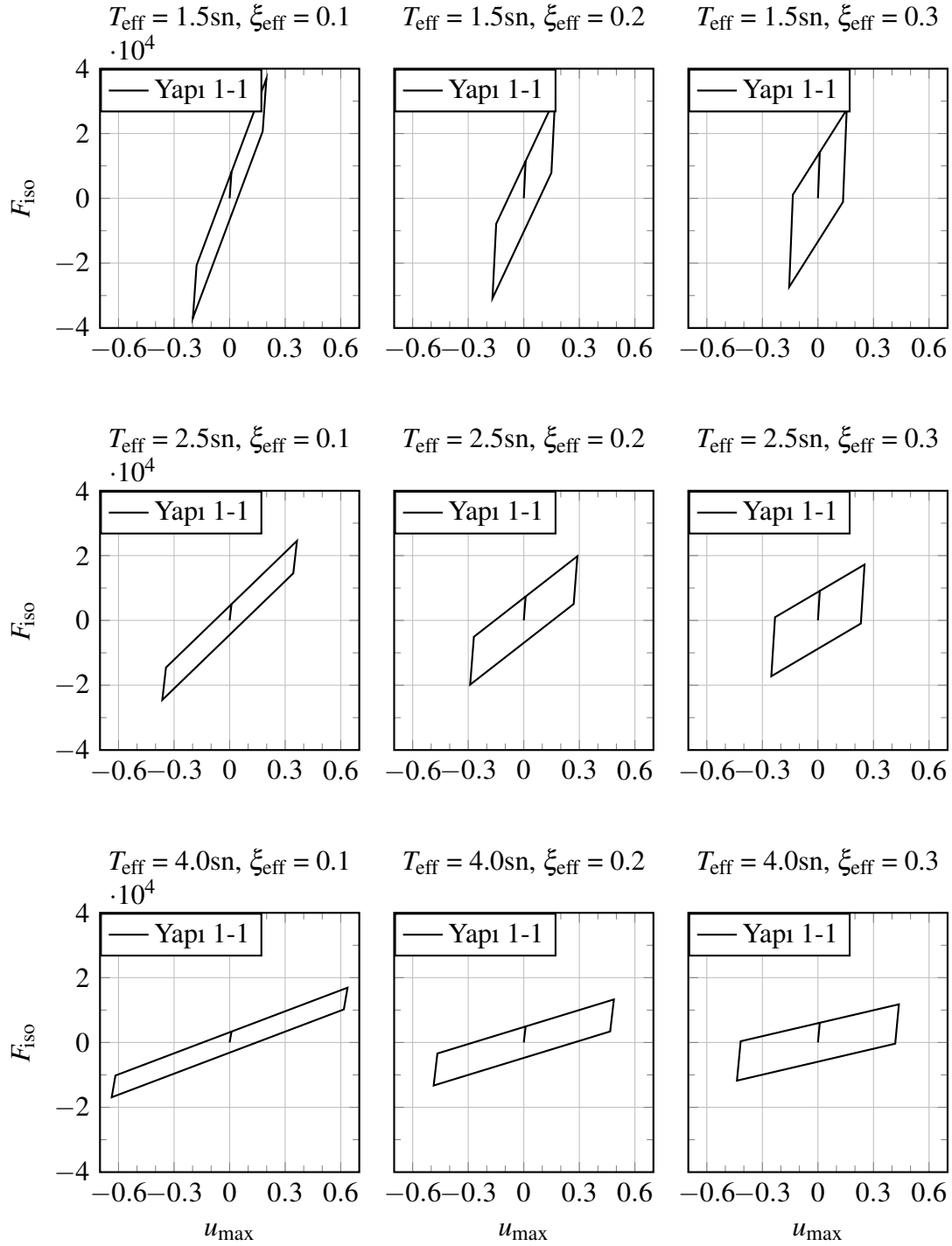
Yalıtım birimlerinin eşdeğer periyot ve sönüm değerlerinin belirlenmesi için bulunan kuvvet-yer değiştirme iskelet eğrileri Şekil 3.44’de gösterilmiştir. Ortak yalıtım düzleminde bulunan yapıların taban kesme kuvveti kat sayılarının, bağımsız yalıtım düzleminde bulunan yapıların taban kesme kuvveti katsayılarına göre normalize edilmiş değerleri Şekil 3.45’de gösterilmiştir.

Grafikten okunan en büyük değere göre ortak yalıtım düzleminde bulunan iki katlı yapının taban kesme kuvveti, bağımsız yalıtım düzleminde bulunması durumuna göre $T_{eff}=4.0sn$ ve $\xi_{eff}=0.3$ değerleri için %85.7 artmaktadır. Ayrıca bir katlı yapının taban kesme kuvveti ise ortak yalıtım düzleminde bulunması durumunda $T_{eff}=2.5sn$ ve $\xi_{eff}=0.3$ değeri için yaklaşık %69.9 artmaktadır. Bir katlı yapının yalnızca iki katlı yapı ile ortak yalıtım düzleminde bulunması durumu için taban kesme kuvveti artışı $T_{eff}=2.5sn$ ve $\xi_{eff}=0.3$ değerleri için Şekil 3.31’den %39.9 okunmaktadır. Dolayısıyla bir ve iki katlı yapılara ek olarak üç ve dört katlı iki yapının da ortak yalıtım düzleminde bulunması durumunda bir katlı yapı kesme kuvveti %30 daha artmaktadır. Ayrıca her yapı için denklem 3.6’de verilen bağıl hata formüllerine uygun olarak hesaplanan taban kesme kuvveti katsayılarının toplam taban kesme kuvveti

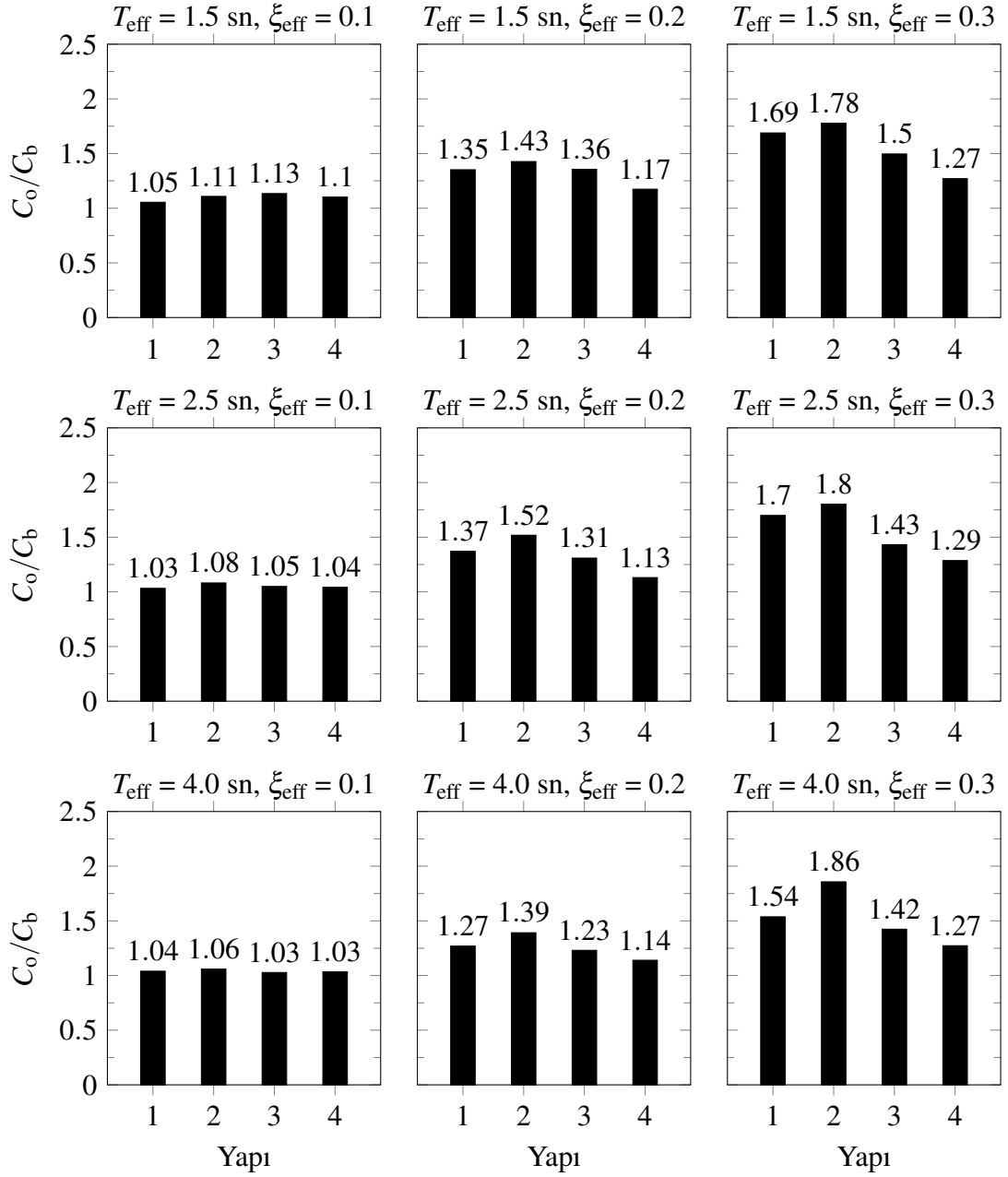
katsayılarına oranları Şekil 3.46’de verilmiştir. Yalıtım biriminin $T_{\text{eff}}=2.5\text{sn}$ ve $\xi_{\text{eff}}=0.3$ değeri için en yüksek hata 0.926 olmaktadır.

Sismik yalıtımlı yapıların denklem 3.5 ve 3.6’ya uygun olarak hesaplanmış toplam taban kesme kuvvet katsayıları ve bağıl hata değerleri sırasıyla Şekil 3.8 ve 3.9’de verilmiştir. Okunan en büyük hata oranı $T_{\text{eff}}=2.5\text{sn}$ ve $\xi_{\text{eff}}=0.3$ değerleri için yaklaşık %63.9 olmaktadır. Bir ve iki katlı yapıların ortak yalıtım düzleminde bulunduğu yapı düzeni ve aynı yalıtım birimi değerleri için toplam kesme kuvveti katsayısı bağıl hatası %25.97 olmaktadır. Dolayısıyla üç ve dört katlı iki yapının eklenmesi hata oranını yaklaşık %37.93 arttırmaktadır.

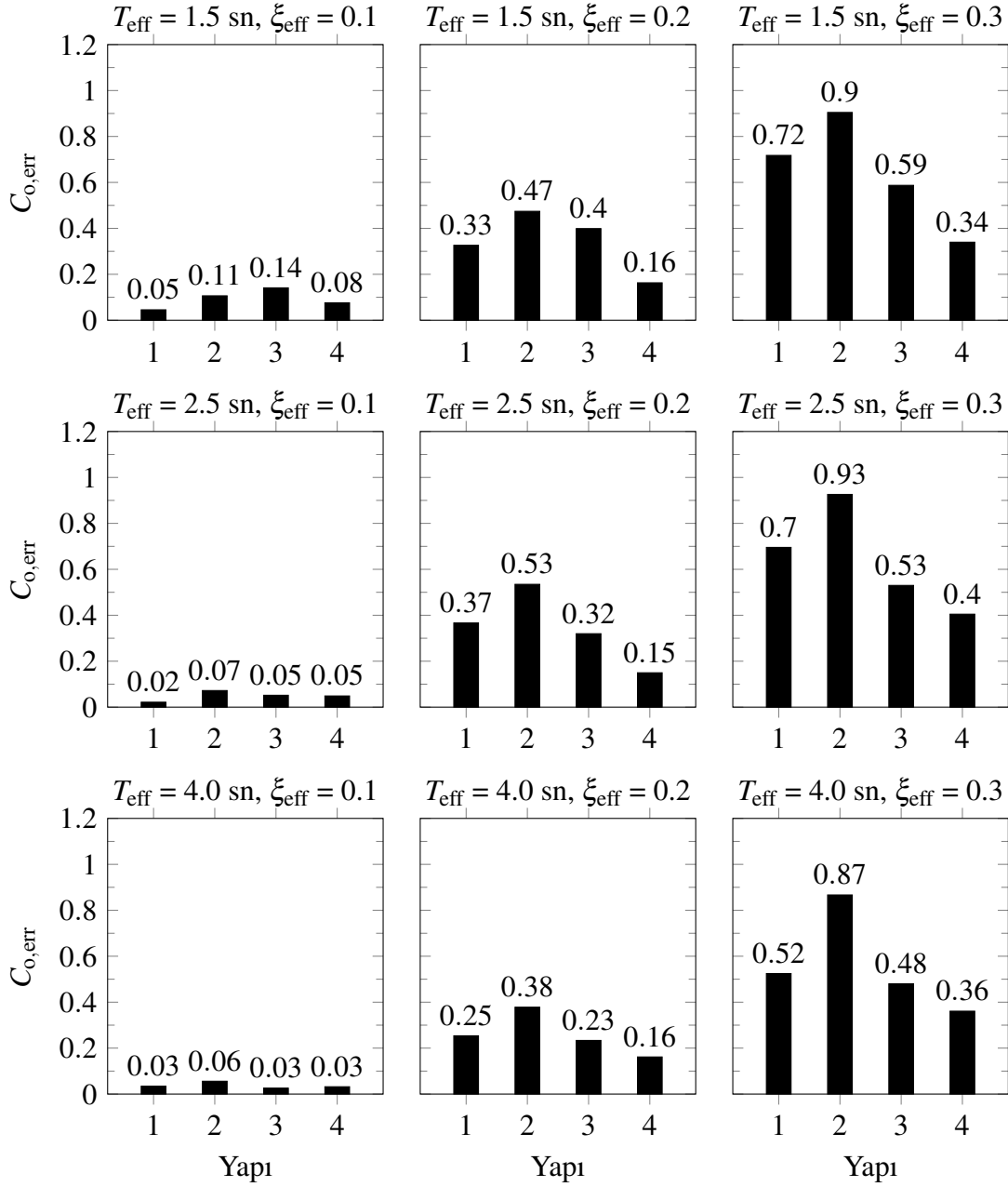
Denklem 3.10 ve 3.11’de sırasıyla yalıtım birimi kesme kuvveti katsayısı ve üst yapı toplam kesme kuvveti katsayısına göre bağıl hatası verilmiştir. En büyük hata oranı $T_{\text{eff}}=2.5\text{sn}$ ve $\xi_{\text{eff}}=0.3$ değerleri için %9.28 okunmaktadır.



Şekil 3.44 : Ortak yalıtım düzleminde bulunan dört bağımsız yapı için yalıtım birimi kuvvet-yer değiştirme iskelet eğrileri.



Şekil 3.45 : Ortak yalıtım düzleminde bulunan dört yapının taban kesme kuvveti katsayılarının bağımsız yalıtım düzleminde bulunan yapıların taban kesme kuvveti katsayılarına oranı.



Şekil 3.46 : Ortak yalıtım düzleminde bulunan dört yapının taban kesme kuvveti katsayılarının toplam taban kesme kuvveti katsayılarına göre bağlı hataları.

Çizelge 3.8 : Ortak yalıtım düzleminde bulunan dört yapının toplam taban kesme kuvveti katsayıları.

	$\xi_{eff}=0.1$	$\xi_{eff}=0.2$	$\xi_{eff}=0.3$
$T_{eff}=1.5$	0.3769	0.3212	0.2909
$T_{eff}=2.5$	0.2441	0.1989	0.1858
$T_{eff}=3.5$	0.1666	0.1322	0.1212

Çizelge 3.9 : Ortak yalıtım düzleminde bulunan dört yapının taban kesme kuvveti katsayıları toplamının toplam taban kesme kuvveti katsayılarına göre bağlı hataları.

	$\xi_{eff}=0.1$	$\xi_{eff}=0.2$	$\xi_{eff}=0.3$
$T_{eff}=1.5$	0.0922	0.3406	0.6374
$T_{eff}=2.5$	0.0486	0.3427	0.6391
$T_{eff}=3.5$	0.0370	0.2568	0.5581

Çizelge 3.10 : Ortak yalıtım düzleminde bulunan dört yapının izolatör kesme kuvveti katsayıları.

	$\xi_{eff}=0.1$	$\xi_{eff}=0.2$	$\xi_{eff}=0.3$
$T_{eff}=1.5$	0.3614	0.3020	0.2676
$T_{eff}=2.5$	0.2401	0.1939	0.1685
$T_{eff}=3.5$	0.1654	0.1299	0.1152

Çizelge 3.11 : Ortak yalıtım düzleminde bulunan dört yapının izolatör kesme kuvveti katsayılarının toplam taban kesme kuvveti katsayılarına göre bağlı hataları.

	$\xi_{eff}=0.1$	$\xi_{eff}=0.2$	$\xi_{eff}=0.3$
$T_{eff}=1.5$	-0.0410	-0.0598	-0.0800
$T_{eff}=2.5$	-0.0164	-0.0255	-0.0928
$T_{eff}=3.5$	-0.0074	-0.0174	-0.0495

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada ortak yalıtım düzleminde bulunan sismik yalıtımlı iki yapı için parametrik bir çalışma yapılmıştır. Analizler bağımsız veya ortak yalıtım düzleminde bulunan sismik yalıtımlı yapıların doğrusal olmayan dinamik analizlerinin parametrik olarak yapılabilirdiği MSBIS programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Üst yapı yapısal özelliklerinin parametrik olarak değiştiği analizlerin tamamı, yalıtım birimlerinin farklı eşdeğer periyot ve sönüm değerleri için tekrarlanmıştır. Burada ortak yalıtım düzleminde bulunan sismik yalıtımlı birinci yapının yapısal özellikleri değişen ikinci yapı ve izolatör parametreleri değişimi ile meydana gelen etkileşimlerini incelemek amaçlanmıştır. Buna göre birinci yapıda oluşan kat kesme kuvvetlerinde, göreceli kat ötelemelerinde ve kat ivmelerinde oluşan değişim irdelenmiştir. Taban kesme kuvvetinin üst yapıya dağılımı ise yalıtım birimlerinin değişen dinamik özelliklerine göre belirlenmiştir. Ayrıca ortak yalıtım düzlemindeki iki yapı için gerekli deprem derz mesafeleri doğrusal yöntemler ile bulunan sonuçlarla kıyaslanmıştır.

Çalışmada elde edilen sonuçlara göre yalıtım birimlerinin artan eşdeğer sönüm oranına karşılık gelen büyük doğrusalsızlık sebebi ile ortak yalıtım düzleminde bulunan yapıların yüksek mod etkilerinin göreceli yer değiştirme ve iç kuvvetlerinde önemli artışlara sebep olduğu görülmüştür. Bu artışların iki yapının açılmalık frekanslarının ayrışması ile arttığı tespit edilmiştir. Dolayısıyla iki yapının aynı açılmalık frekansa sahip olması durumunda elde edilen iç kuvvet ve yer değiştirmeler, yalıtım birimlerinin aynı eşdeğer periyot ve sönüm değerleri için eşit bulunmaktadır. Bununla birlikte yalıtım birimlerinin artan eşdeğer sönüm değerleri için sismik yalıtımlı yapı taban kesme kuvvetlerinin üst katlara dağılımında meydana gelen dikdörtgen form yerini üst katlarda daha büyük kuvvetlerin olduğu ters üçgen formuna bıraktığı görülmüştür.

Tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda listelenmiştir.

1. Yalıtım birimlerinin sahip olduğu histeretik sönüm nedeniyle meydana gelen yüksek mod etkisi doğrusal analizler ile bulunan sonuçların değişmesine neden olmaktadır.

2. Ortak yalıtım düzleminde bulunan ve farklı açısıl frekanslara sahip yapıların şekil değiştirme ve iç kuvvetleri, bağımsız yalıtım düzleminde bulunan aynı yapılara kıyasla artış göstermektedir.
3. Yapı taban kesme kuvvetlerinin üst katlara dağılımının eşdeğer sönüm oranının artışı ile dikdörtgen formdan ters üçgen formuna doğru değiştiği görülmüştür. Ayrıca iki yapının açısıl frekanslarına bağlı olarak bu değişimin artış veya azalışta olduğu tespit edilmiştir.
4. Deprem derz mesafelerinde doğrusal yöntemler ile bulunan değerlerin yeterli olduğu tespit edilmiştir.
5. Ortak yalıtım düzleminde bulunan 1. yapı taban kesme kuvveti katsayısının toplam taban kesme kuvveti katsayısına göre bağıl hatasının en büyük değeri, 1 ve 10 katlı iki yapının ortak yalıtım düzleminde bulunması durumunda ve $T_{eff} = 2.5\text{sn}$ ve $\xi_{eff}=0.3$ değerleri için 2.20 olarak hesaplanmıştır.
6. Ortak yalıtım düzleminde bulunan yapıların taban kesme kuvveti katsayılarının toplam taban kesme kuvveti katsayısına göre bağıl hatasının en büyük değeri, 2 ve 10 katlı iki yapının ortak yalıtım düzleminde bulunması durumunda ve $T_{eff} = 2.5\text{sn}$ ve $\xi_{eff}=0.3$ değerleri için 1.20 olarak hesaplanmıştır.
7. Yalıtım birimi kesme kuvveti katsayısının ortak yalıtım düzleminde bulunan yapıların toplam taban kesme kuvveti katsayısına göre bağıl hatasının en büyük değeri, 1 ve 5 katlı iki yapının ortak yalıtım düzleminde bulunması durumunda ve $T_{eff} = 2.5\text{sn}$ ve $\xi_{eff}=0.3$ değerleri için -0.218 olarak hesaplanmıştır.
8. 1 ve 10 katlı iki yapının ortak yalıtım düzleminde bulunması durumunda $T_{eff} = 4\text{sn}$ ve $\xi_{eff}=0.3$ değerleri için, 1 katlı yapının kesme kuvveti kat ivmesi ve görel kat ötelemesinin, bağımsız yalıtım düzleminde bulunması durumuna göre 3.27 katına çıktığı belirlenmiştir.
9. 1 ve 10 katlı iki yapının ortak yalıtım düzleminde bulunması durumunda 10 katlı yapının kat kesme kuvvetleri, bağımsız yalıtım düzleminde bulunması durumuna göre alt katlarda en büyük azalma $T_{eff} = 1.5\text{sn}$ ve $\xi_{eff}=0.3$ değerleri için %21.6 ve üst katta ise en büyük azalma $T_{eff} = 4\text{sn}$ ve $\xi_{eff}=0.2$ değerleri için %18.9 olarak tespit edilmiştir.

10. 10 katlı yapının ortak yalıtım düzleminde bulunması durumunda kat kesme kuvvetleri, bağımsız yalıtım düzleminde bulunması durumuna göre alt katlarda en fazla %53.1 artış $T_{\text{eff}} = 1.5\text{sn}$ ve $\xi_{\text{eff}}=0.3$ değerleri için 6 katlı yapı ile birlikte bulunması durumu için gerçekleşmiştir. Ayrıca üst katta en büyük azalma $T_{\text{eff}} = 4\text{sn}$ ve $\xi_{\text{eff}}=0.2$ değerleri için 2 katlı yapı ile birlikte bulunmaları durumu için %26.1 olarak saptanmıştır.
11. 10 katlı yapının ortak yalıtım düzleminde bulunması durumunda görelî kat ötelemeleri, bağımsız yalıtım düzleminde bulunması durumuna göre alt katlarda en fazla %53.9 artış $T_{\text{eff}} = 1.5\text{sn}$ ve $\xi_{\text{eff}}=0.3$ değerleri için 6 katlı yapı ile birlikte bulunması durumu için gerçekleşmiştir. Ayrıca üst katta en büyük azalma $T_{\text{eff}} = 4\text{sn}$ ve $\xi_{\text{eff}}=0.2$ değerleri için 2 katlı yapı ile birlikte bulunmaları durumu için %26.4 olarak saptanmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] **Zekioğlu, A., Darama, H. ve Erkuş, B.** (2009). Performance-based seismic design of a large structure seismically isolated structure: Istanbul Sabiha Gokcen International Airport terminal building, *Proc. of the SEAOC 2009 Convention*, http://web.itu.edu.tr/bariserkus/Zekioglu2009_SGIA.pdf.
- [2] **Touaillon, J.**, (1870), Improvement in Buildings, <https://patents.google.com/patent/US845046A/>, united States Patent Office 99,973.
- [3] **Bechtold, J.**, (1907), Earthquake-Proof Building, <https://patents.google.com/patent/US845046A/>, united States Patent Office 845,046.
- [4] **Calantarients, J.** (1909). *Improvements in and Connected with Building and Other Works, Construction and Appurtenances to Resist the Action of Earthquakes and the Like*, https://books.google.com.tr/books?id=Q_UkNgAACAAJ.
- [5] **Chopra, A.K., Clough, D.P. ve Clough, R.W.** (1972). Earthquake resistance of buildings with a ‘soft’ first storey, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1(4), 347–355, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/eqe.4290010405>.
- [6] **Kelly, J.M.** (1986). Aseismic base isolation: review and bibliography, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 5(4), 202 – 216, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0267726186900060>.
- [7] **Robinson, W.H. ve Tucker, A.G.** (1977). A Lead-Rubber Shear Damper, *New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, 10(3), 151 – 153, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0267726186900060>.
- [8] **Zayas, V.A., Low, S.S. ve Mahin, S.A.** (1990). A Simple Pendulum Technique for Achieving Seismic Isolation, *Earthquake Spectra*, 6(2), 317–333, <https://doi.org/10.1193/1.1585573>.
- [9] **Martelli, A., Clemente, P., De Stefano, A., Forni, M. ve Salvatori, A.**, (2014). Recent Development and Application of Seismic Isolation and Energy Dissipation and Conditions for Their Correct Use, Springer International Publishing, Cham, s.449–488, https://doi.org/10.1007/978-3-319-07118-3_14.

- [10] **ASCE** (2010). *Minimum design loads for buildings and other structures*, ASCE Standard ASCE/SEI 7-10, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia.
- [11] **TBDY** (2018). *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği*, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara.
- [12] **ASCE** (2014). *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*, American Society of Civil Engineers, asce/sei 41-13 sürüm, <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/9780784412855>.
- [13] **ASCE** (2016). *Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures*, ASCE Standard ASCE/SEI 7-16, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, www.asce.org/bookstore/ascelibrary.org.
- [14] **York, K. ve Ryan, K.L.** (2008). Distribution of Lateral Forces in Base-Isolated Buildings Considering Isolation System Nonlinearity, *Journal of Earthquake Engineering*, 12(7), 1185–1204, <https://doi.org/10.1080/13632460802003751>.
- [15] **Clough, R.W.** (1955). On the importance of higher modes of vibration in the earthquake response of a tall building, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 45(4), 289, <http://0-dx.doi.org.divit.library.itu.edu.tr/>.
- [16] **Skinner, R., Robinson, W. ve McVerry, G.** (1993). *An introduction to seismic isolation*, Wiley, <https://books.google.com.tr/books?id=QMhRAAAAMAAJ>.
- [17] (2008). *AASHTO LRFD bridge design specifications*, Fourth edition with 2008 interim revisions. Washington, D.C. : American Association of State Highway and Transportation Officials, [2008] ©2007, <https://search.library.wisc.edu/catalog/9910071548102121>.
- [18] **FEMA** (2003). *Nehrp Recommended Provisions For Seismic Regulations For New Buildings And Other Structures (Fema 450)*, Building Seismic Safety Council National Institute Of Building Sciences, Washington, D.C., <https://www.wbdg.org/ffc/dhs/criteria/fema-450-pl>.
- [19] **Eurocode** (2004). *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance — Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*, European Committee For Standardization, Brussels.
- [20] **Newmark, N.** (1959). A Method of Computation for Structural Dynamics, sayı179-181. no.lar in A Method of Computation for Structural Dynamics, American Society of Civil Engineers, <https://books.google.com.tr/books?id=MXSctgAACAAJ>.
- [21] **Wilson, E., Computers ve Structures, I.** (2000). *Three Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures: A Physical Approach with Emphasis on*

Earthquake Engineering, Computers and Structures, <https://books.google.com.tr/books?id=tKMuaAAACAAJ>.

- [22] **Molnar, A.J., Vashi, K.M. ve Gay, C.W.** (1976). Application of Normal Mode Theory and Pseudoforce Methods to Solve Problems With Nonlinearities, *Journal of Pressure Vessel Technology*, 98(2), 151–156, <http://dx.doi.org/10.1115/1.3454352>.
- [23] **OpenSees** (2008). Open System for Earthquake Engineering Simulation, *Computer Program and Supporting Documentation*, Pacific Engineering Research Centre, University of California, Berkeley.
- [24] **Kumar, M., Whittaker, A.S. ve Constantinou, M.C.** (2014). An advanced numerical model of elastomeric seismic isolation bearings, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 43(13), 1955–1974, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/eqe.2431>.
- [25] **Nagarajaiah, S., Reinhorn, A.M. ve Constantinou, M.C.** (1991). Nonlinear Dynamic Analysis of 3-D-Base-Isolated Structures, *Journal of Structural Engineering*, 117(7), 2035–2054, <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%290733-9445%281991%29117%3A7%282035%29>.
- [26] **Tsopelas, P., Nagarajaiah, S., Constantinou, M. ve Reinhorn, A.** (1991). 3D-BASIS-M: Nonlinear Dynamic Analysis of Multiple Building Base Isolated Structures, **Report 91-0014**, National Center for Earthquake Engineering Research, <http://hdl.handle.net/10477/857>.
- [27] **Wen, Y.K.** (1976). Method for Random Vibration of Hysteretic Systems, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 102(2), 249–263, <http://cedb.asce.org/CEDBsearch/record.jsp?dockkey=0006630>.
- [28] **Tsopelas, P., Nagarajaiah, S., Constantinou, M. ve Reinhorn, A.** (1994). Non-linear dynamic analysis of multiple building base isolated structures, *Computers & Structures*, 50(1), 47 – 57, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0045794994904367>.
- [29] **Selek, M. ve Alhan, C.** (2013). *Ortak bir izolasyon tabanına sahip olan binaların sismik davranışı*, İstanbul Üniversitesi, 2013., <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cat03261a&AN=ist.1235986&lang=tr&site=eds-live&authtype=ip,uid>.
- [30] **Sorace, S. ve Terenzi, G.** (2014). Analysis, Design, and Construction of a Base-Isolated Multiple Building Structure, *Advances in Civil Engineering*, 2014, 13, <http://dx.doi.org/10.1155/2014/585429>.
- [31] **Ferraioli, M. ve Mandara, A.** (2016). Base Isolation for Seismic Retrofitting of a Multiple Building Structure: Evaluation of Equivalent Linearization Method, *Mathematical Problems in Engineering*, 2016, 17, <http://dx.doi.org/10.1155/2016/8934196>.

- [32] **Ferraioli, M. ve Mandara, A.** (2017). Base Isolation for Seismic Retrofitting of a Multiple Building Structure: Design, Construction, and Assessment, *Mathematical Problems in Engineering*, 2017, 24, <https://doi.org/10.1155/2017/4645834>.
- [33] **Güler, M.D., Yılmaz, C. ve Erkuş, B.** (2017). Ortak Yalıtım Düzleminde Bulunan Bağımsız Yapıların Davranışlarının İncelenmesi, *4. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*.
- [34] **Pang, Y.B.** (2012). Seismic Response Analysis on Two-Tower Isolated Structure with Enlarged Base, *Applied Mechanics and Materials*, 193-194, 753-756, <https://www.scientific.net/AMM.193-194.753>.
- [35] **Erkuş, B.** (2004). Comparison of the Techniques Used in the Newmark Analysis of Nonlinear Structures., *17th ASCE Engineering Mechanics Conference*, http://web.itu.edu.tr/bariserkus/Erkus2004a_Nonlin.pdf.
- [36] **Fahjan, Y.M.** (2008). Türkiye Deprem Yönetmeliği (DBYBHY, 2007) Tasarım İvme Spektrumuna Uygun Gerçek Deprem Kayıtlarının Seçilmesi ve Ölçeklenmesi, *İMO Teknik Dergi*, 292, 4423-4444, <http://dergipark.gov.tr/download/article-file/136649>.
- [37] **DBYBHY** (2007). *Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkındaki Yönetmelik*, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara.
- [38] **PEER**, (2017), Pasific Earthquake Engineering Research Center Strong Ground Motion Database, <https://ngawest2.berkeley.edu/>.
- [39] **Atik, L.A. ve Abrahamson, N.** (2010). An Improved Method for Nonstationary Spectral Matching, *Earthquake Spectra*, 26(3), 601-617, <https://doi.org/10.1193/1.3459159>.
- [40] **Ryan, K.L. ve Chopra, A.K.** (2004). Estimation of Seismic Demands on Isolators Based on Nonlinear Analysis, *Journal of Structural Engineering*, 130(3), 392-402, <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%290733-9445%282004%29130%3A3%28392%29>.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Mücahit Bekin

Doğum Tarihi ve Yeri: 1991, Ankara

E-Posta: mucahitbekin@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lise:** 2009, Ankara Atatürk Lisesi
- **Lisans:** 2014, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği