



RECEP TAYYİP
ERDOĞAN
ÜNİVERSİTESİ

**T.C.
RECEP TAYYİP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**SÖNÜMLEYİCİ SİSTEMLERİ EKLENMİŞ BETONARME BİR
BİNANIN YAPI-ZEMİN ETKİLEŞİMİ DİKKATE ALINARAK
ANALİZİ**

(Yüksek Lisans Tezi)

Furkan Yurdakul KAYIKÇI

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Ali GÜRBÜZ**

**RİZE
2024**

KABUL VE ONAY

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında, Dr. Öğr. Üyesi Ali GÜRBÜZ danışmanlığında, Furkan Yurdakul KAYIKÇI tarafından hazırlanan *Sönümleyici Sistemleri Eklenmiş Betonarme Bir Binanın Yapı-Zemin Etkileşimi Dikkate Alınarak Analizi* adlı bu tez çalışması, 05/06/2024 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliği/oy çokluğuyla başarılı bulunarak jürimiz tarafından **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Ünvanı, Adı SOYADI

İmza

Başkan

:

Dr. Öğr. Üyesi Ali GÜRBÜZ

Üye

:

Dr. Öğr. Üyesi Zeliha TONYALI

Üye

:

Dr. Öğr. Üyesi Muhammet YURDAKUL

ETİK BEYAN

İnşaat Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programından mezun olmak üzere teslim ettiğim “Sönümleyici Sistemleri Eklenmiş Betonarme Bir Binanın Yapı-Zemin Etkileşimi Dikkate Alınarak Analizi” adlı tezim, bilim ve araştırma etiği prensiplerine riayet edilerek tarafımdan yazılmıştır.

Tez çalışmamda, başka kaynaklardan aktarılan bütün bilgi ve alıntılar, Enstitünüz Tez Yazım Kılavuzuna uygun olarak açıkça gösterilmiştir. Kaynağı gösterilenler dışında kalan bütün bilgiler uygun araştırma yöntemi kullanılarak tarafımdan edinilmiş ve esere bu şekilde yansıtılmıştır. Şahsıma ait olmayan hiçbir bilgi, kasıt veya kusurlar, şahsıma aitmiş gibi gösterilmemiştir. İnternet kaynakları dâhil, sahibine / kaynağına atıf yapılmaksızın hiçbir bilgi kullanılmamıştır. Aksinin ortaya çıkması halinde doğacak bütün hukuki, idari, akademik ve etik sorumluluk tarafıma ait olacaktır. Eserin tesliminden sonra herhangi bir zamanda, bilim etiğine aykırılık tespit edilmesi ve / veya eserimle ilgili intihal veya intihal şeklinde anlaşılabilecek bir durumun ortaya çıkması halinde; Üniversiteniz ve eğitim kadronuzun hiçbir şekilde sorumlu tutulmayacağını hür irademle kabul, beyan ve taahhüt ederim.

05/06/2024

Furkan Yurdakul KAYIKÇI

ÖN SÖZ

Bu çalışma, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında, yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

“Sönümleyici Sistemleri Eklenmiş Betonarme Bir Binanın Yapı-Zemin Etkileşimi Dikkate Alınarak Analizi” isimli tez çalışmamın her aşamasında bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım, öğrencisi olmaktan son derece onur duyduğum danışman Hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ali GÜRBÜZ minnet ve şükranlarımı sunarım.

Furkan Yurdakul KAYIKÇI

2024/ RİZE

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	I
ETİK BEYAN.....	II
ÖN SÖZ	III
İÇİNDEKİLER	IV
ÖZET	IX
ABSTRACT.....	X
KISALTMALAR VE SİMGELER	XI
TABLolar LİSTESİ.....	XIII
ŞEKİLLER LİSTESİ	XIV
GİRİŞ	1
1. GENEL BİLGİLER	3
1.1. Konuyla İlgili Önceden Yapılmış Çalışmalar	3
1.1.1. Katlar Arası İzolasyonlu ve Yapı-Zemin Etkileşimli Yapıyla İlgili Önceden Yapılan Çalışmalar	3
1.1.2. Viskoz Sönümleyicili ve Yapı-Zemin Etkileşimli Yapıyla İlgili Önceden Yapılan Çalışmalar	9
1.1.3. Katlar Arası İzolasyonlu ve Akışkan Viskoz Sönümleyicili Yapıyla İlgili Önceden Yapılan Çalışmalar	14
1.2. Tezin Amacı ve Kapsamı	16
1.3. Yapı-Zemin Etkileşiminin Modellemesi	17
1.3.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi	17
1.3.2. Sonlu Eleman Analizi	18
1.3.3. Sonlu Eleman Formülasyonu	19
1.3.4. Sonlu Elemanların Gelişimi	21
1.3.4.1. Tek Boyutlu Elemanlar	22
1.3.4.2. İki Boyutlu Elemanlar	22
1.3.4.3. Üç Boyutlu Elemanlar	23
1.3.5. Sonlu Elemanlar Modeli Sınır Şartları	24
1.3.5.1. Ölçekli Sınır Sonlu Eleman Yöntemi	24

1.3.5.1.1. Esneklikten Arındırılmış Ölçekli Sınır Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	25
1.3.5.2. Viskoz Sınır Şartı.....	25
1.3.5.3. Tutarlı Sınırlar.....	28
1.3.5.4. Serbest Sınırlar.....	28
1.3.5.5. Karma Modelleme	28
1.3.5.6. Sınır Elemanlar	29
1.3.5.7. Sonsuz Elemanlar Yöntemi	29
1.3.5.8. Eğri Sınır Koşulları.....	30
1.3.5.9. Mükemmel Uyumlu Katman	30
1.3.5.9.1. Mükemmel Uyumlu Ayırık Katman.....	31
1.3.5.9.2. Analitik Dalga Boylarına Sahip Mükemmel Uyumlu Ayırık Katmanlar.....	31
1.3.6. Zemin-Yapı Etkileşiminde Kullanılabilecek Modeller	31
1.3.6.1. Zemin Modelleri	32
1.3.6.1.1. Bir Parametrelili Zemin Modelleri.....	32
1.3.6.1.2. İki Parametrelili Zemin Modelleri.....	32
1.3.6.1.2.1. Filonenko-Borodich Modeli.....	33
1.3.6.1.2.2. Hetenyi Modeli.....	33
1.3.6.1.2.3. Pasternak Modeli.....	34
1.3.6.1.2.4. Vlasov Modeli	35
1.3.6.1.2.5. Reissner Modeli.....	37
1.3.6.1.3. Üç Parametrelili Zemin Modelleri	38
1.3.6.1.3.1. Geliştirilmiş Vlasov Modeli	38
1.3.6.1.3.2. Kerr Modeli	40
1.3.7. Yapı-Zemin Etkileşim Türleri	41
1.3.7.1. Eylemsizlik Etkileşimi.....	41
1.3.7.2. Kinematik Etkileşim	42
1.3.8. Üst Yapı-Zemin Davranış Yaklaşımları	43
1.3.8.1. Rijit Taban Yaklaşımı.....	43
1.3.8.2. Esnek Taban Yaklaşımı	43

1.3.9. Yapı-Zemin Etkileşim Problemleri Çözümünde Kullanılabilecek Modelleme Yaklaşımları	44
1.3.9.1. Alt Sistem Yöntemi	44
1.3.9.2. Ortak Yöntem	44
1.3.10. Yapı-Zemin Etkileşiminde Doğrusal Olmayan Analizler	45
1.3.10.1. Statik İtme Analizi	45
1.3.10.2. Zaman Tanım Alanında Doğrudan İntegrasyon Analizi.....	46
1.4. Yapı-Zemin Dinamik Etkileşimi	46
1.4.1. Yapı-Zemin Dinamik Etkileşimini Etkileyen Faktörler	47
1.4.2. Yerel Zemin Koşulları	47
1.4.2.1. Yerel Zemin Kalınlığı	47
1.4.2.2. Zemin Spektrumları	47
1.4.2.3. Zemin Periyodu ve Zemin Özelliklerinin Üstyapıya Etkisi.....	48
1.4.3. Zemin Sönümü	48
1.4.3.1. Malzeme Sönümü (İç Sönüm)	48
1.4.3.2. Geometrik Sönüm	48
1.4.3.3. Histeretik Sönüm (Çevrimsel Sönüm).....	49
1.4.4. Sıvılaşma	49
1.4.5. Zemin Büyütmesi	51
1.4.6. Yüzey Topografya Etkisi	51
1.4.7. Yüzeysel Temellerde Yapı-Zemin Etkileşimi	51
1.4.8. Derin Temellerde Zemin-Yapı Etkileşimi	52
1.4.9. Yapı Yüksekliği	53
1.4.10. Yapı Ağırlığı	53
1.4.11. Yapı-Zemin Etkileşimi Denklemleri	53
1.4.11.1. Korunum Denklemleri	53
1.4.11.2. Yer Etkileşim Kuvveti	54
1.4.11.3. Katlar Arası İzolasyonlu Yapı-Zemin Etkileşimli Sistemin Hareket Denklemleri	56
1.4.11.4. Akışkan Viskoz Sönümleyicili Yapı-Zemin Etkileşimli Sistemin Hareket Denklemleri.....	59
1.5. Sönümleyiciler	60

1.5.1. Pasif Kontrol Sistemleri	61
1.5.1.1. Taban İzolasyon Sistemleri	61
1.5.1.1.1. Kauçuk Mesnetler	62
1.5.1.1.1.1. Tabakalı kauçuk mesnetler.....	63
1.5.1.1.1.2. Kurşun Kauçuk Mesnetler.....	64
1.5.1.1.1.3. Düşük Sönümlü Kauçuk Mesnet.....	65
1.5.1.1.1.4. Yüksek Sönümlü Kauçuk Mesnet.....	65
1.5.1.1.2. Sürtünmeli Sarkaç Sistemler	66
1.5.1.1.2.1. Saf Sürtünmeli Sistem.....	67
1.5.1.1.2.2. Tek Eğrilikli Sürtünmeli Sarkaç Mesnet.....	68
1.5.1.1.2.3. İki Eğrilikli Sürtünmeli Sarkaç Mesnet.....	68
1.5.1.1.2.4. Üç Eğrilikli Sürtünmeli Sarkaç Mesnet	69
1.5.1.1.3. EradiQuake İzolatör	70
1.5.1.1.4. Esnek-Sürtünmeli Taban İzolasyon Sistemi	70
1.5.1.1.5. Fransız Elektrik Sistemi	71
1.5.1.2. Pasif Enerji Sönümleyiciler	72
1.5.1.2.1. Metalik Sönümleyiciler.....	72
1.5.1.2.2. Visko-Elastik Sönümleyiciler	73
1.5.1.2.3. Akışkan Viskoz Sönümleyiciler	73
1.5.1.2.4. Ayarlı Kütle Sönümleyici	74
1.5.2. Aktif Kontrol Sistemleri	75
1.5.2.1. Aktif Ayarlı Kütle Sönümleyiciler	76
1.5.2.2. Aktif Kütle Sönümleyiciler	76
1.5.2.3. Aktif Destek Sistemleri	78
1.5.2.4. Darbe Üretme Sistemleri	78
1.5.2.5. Aktif Ayarlı Sıvı Kolon Sönümleyiciler.....	79
1.5.3. Yarı-Aktif Kontrol Sistemleri.....	79
1.5.3.1. Manyeto-Reolojik Sönümleyici.....	80
1.5.3.2. Değişken Orifis Sönümleyici.....	80
1.5.3.3. Değişken Sürtünme Sönümleyici	81
1.5.3.4. Değişken Rijitlikli Sönümleyiciler	82
1.5.4. Karma Kontrol Sistemleri.....	82

1.5.4.1. Karma Kütle Sönümleyiciler	83
1.5.4.2. Taban İzolasyonlu Ayarlı Kütle Sönümleyiciler	83
1.5.4.3. Manyeto-Reolojik Sönümleyici ve Ayarlı Kütle Sönümleyici.....	84
2. SAYISAL ÖRNEK.....	85
2.1. Bina Modelleme Süreci.....	88
2.2. Zemin Modelleme Süreci.....	93
2.3. Doğrusal Olmayan Zaman Tanım Alanında Deprem Analizinde Kullanılan Parametrelerin Elde Edilme Süreci	95
2.3.1. Spektrumların Elde Edilmesi.....	95
2.3.2. Deprem Kayıtlarının Elde Edilmesi ve Ölçeklendirilmesi İşlemi.....	95
2.4. Yüksek Sönümlü Kauçuk Mesnet Tasarım Süreci.....	104
2.5. Akışkan Viskoz Sönümleyici Optimizasyon Süreci	115
2.5.1. AVS'li Bina Optimizasyon Süreci	115
2.5.2. AVS'li Binanın Sönümleme Katsayısının Bulunması	116
2.5.3. KAİ+AVS 1'li Binanın Optimizasyon Süreci.....	118
2.5.4. KAİ+AVS 1'li Binanın Sönümleme Katsayısının Bulunması.....	118
2.5.5. KAİ+AVS 2'li Binanın Sönümleme Katsayısının Bulunması.....	119
3. BULGULAR.....	122
3.1. En Büyük Deplasmanların İncelenmesi.....	122
3.2. En Büyük İvmelerin İncelenmesi.....	134
3.3. Doğal Hâkim Titreşim Periyotlarının İncelenmesi	146
3.4. En Büyük Görelî Kat Ötelenmelerinin İncelenmesi	147
3.5. En Büyük Taban Kesme Kuvvetlerinin İncelenmesi.....	152
3.6. Toplam Girdi Enerjisinin İncelenmesi.....	155
4. SONUÇLAR	160
KAYNAKÇA.....	163

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği

Tez Türü : Yüksek Lisans Tezi

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Ali GÜRBÜZ

Hazırlayan : Furkan Yurdakul KAYIKÇI

Yıl : 2024

Sayfa Sayısı : 189

ÖZET

SÖNÜMLEYİCİ SİSTEMLERİ EKLENMİŞ BETONARME BİR BİNANIN YAPI-ZEMİN ETKİLEŞİMİ DİKKATE ALINARAK ANALİZİ

Bu tezde bir hastane binasının zemin-yapı etkileşimi dikkate alınarak sönümleyicisiz, sadece katlar arası izolasyonlu, sadece akışkan viskoz sönümleyicili, üstyapıya akışkan viskoz sönümleyicinin eklendiği katlar arası izolasyonlu karma yapı ve buna alternatif bir çözüm olarak altyapıya akışkan viskoz sönümleyicinin eklendiği katlar arası izolasyonlu karma yapının doğrusal olmayan dinamik analizleri yapılmıştır. Bu dinamik analizler için 4 farklı yer hareketinin düşey bileşenleri de eklenilmiştir. Daha önce akışkan viskoz sönümleyicili ve taban izolasyonu bir yapının zemin-yapı etkileşimi de dikkate alınarak deprem analizleri yapılmasına rağmen katlar arası izolasyonlu ve akışkan viskoz sönümleyicili bir yapının zemin-yapı etkileşimi de dikkate alınarak deprem analizleri yapılmamıştır. Dinamik analizler için SAP2000 v23.0.0 programından yararlanılmıştır. Christchurch New Zealand ve Darfield New Zealand depremleri farklı açılarda kaydedildikleri için bu depremlerin doğrultuları dereceye göre girilmiştir. Zemin-yapı etkileşimi ortak sistem yöntemiyle modellenmiştir. Sınır şartı olarak viskoz sınır şartı kullanılmıştır. Tüm modellemelerde sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Akışkan viskoz sönümleyicilerin optimizasyonu için basitleştirilmiş sıralı arama algoritması, sönümleme katsayısı için tekdüze dağılım yöntemi kullanılmıştır. Analizler sonucunda karma sistemli yapılar diğer pasif titreşim kontrol sistemlerinden daha etkili olduğu ortaya çıkmıştır. Ancak bazı depremlerde her bir titreşim kontrol sisteminin birbirlerine yakın sonuçlar verdiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Zemin-yapı etkileşimi, katlar arası izolasyon, akışkan viskoz sönümleyici, karma titreşim kontrollü sistem, zaman tanım alanında analiz, sonlu elemanlar

Recep Tayyip Erdogan University Institute of Graduate Studies

Department : Civil Engineering

Thesis Type : Master's Thesis

Supervisor : Assist. Prof. Dr. Ali GÜRBÜZ

Author : Furkan Yurdakul KAYIKÇI

Year : 2024

Pages : 189

ABSTRACT

ANALYSIS OF A REINFORCED CONCRETE BUILDING ADDED DAMPING SYSTEMS CONSIDERING STRUCTURE-SOIL INTERACTION

In this thesis, nonlinear dynamic analyses of a hospital building are performed by considering the soil-structure interaction for bare frame, only inter-storey isolated, only fluid viscous damped, inter-storey isolated hybrid structure in which fluid viscous dampers are added to the superstructure and alternatively inter-storey isolated hybrid structure in which fluid viscous dampers are added only to the substructure. Vertical components of 4 different ground motions are added for these dynamic analyses. Even though before earthquake analyses of building with fluid viscous damper and with base-isolation hybrid system are conducted considering soil-structure interaction, earthquake analyses of building with interstory isolation and with fluid viscous damper hybrid system building are not conducted considering soil-structure interaction. It is made benefit of SAP2000 v23.0.0. software for dynamic analyses. Because of the fact that Christchurch New Zealand and Darfield New Zealand earthquakes were recorded at different angles, directions of these earthquakes are inputted with respect to degree. Soil-structure interaction are modelled by direct method. As a boundary condition, viscous boundary condition is used. Finite elements method is used in all modelling. Simplified sequential search algorithm for optimization of fluid viscous dampers, uniform distribution method for damping coefficient are used. In results of analyses, it is turned out to be that hybrid isolated building are more efficient than other passive vibration control systems. However, in some earthquakes, it is seen to give close results each of all vibration control systems.

Keywords: Soil-structure interaction, interstory isolation, fluid viscous damper, hybrid vibration control system, time history analysis, finite elements method

KISALTMALAR VE SİMGELER

A_i	: yapay sınırdaki bulunan bir düğüm noktasının temsil ettiği alan
AVS	: Akışkan viskoz sönümleyicili
[B]	: uzama yer değiştirme matrisi
[C]	: sönüm matrisi
C_D	: viskoz sönümleyicili yapının sönüm matrisi
c_r	: ileri geri sallanma (rocking) sönümü
c_s	: sağa sola sallanma (swaying) sönümü
[D]	: malzeme özellik matrisi
D	: plağın eğilme rijitliği
DGT	: Dayanım Göre Tasarım
$\{\delta\}$	: eleman yer değiştirme vektörü
$\{\varepsilon\}$	: eleman gerinim vektörü
$\{f\}$	: düğüm noktası kuvvetleri vektörü
G	: kayma modülü
GH	: kayma rijitliği
I_b	: temelin kütle atalet momenti
I_i	: i. katın kat kütle atalet momenti
[k]	: rijitlik matrisi
[K]	: global özellik matrisi
KAİ	: Katlar arası izolasyon
KH	: Kontrollü Hasar
KK	: Kesintisiz Kullanım
k_r	: ileri geri sallanma (rocking) rijitliği
k_s	: sağa sola sallanma (swaying) rijitliği
ξ	: kazılmış zeminin histeretik sönümü
[M]	: kütle matrisi
m_b	: temelin kütlesi
M^e	: kazılmış zeminin ivme birim darbe tepki matrisi
ρ	: zeminin birim hacim kütlesi
$\{q\}$	: düğüm noktası değerlerini simgeleyen sütun matrisi

$\{Q\}$	: düğüm noktası kuvvet vektör
$\{r\}$	: düğüm noktası bilinmeyenlerinin global vektörü
$\{R\}$	: düğüm noktası zorlama değişkenlerinin global vektörü
R	: yakın bölge yapısının geometrik merkezi ile yapay sınır noktasının bulunduğu sınır çizgisi veya yüzey arasındaki mesafe
$\{R(t)\}$	: deprem sırasında oluşan zamana bağlı atalet kuvveti vektörü
s	: elastik sabit
$\text{\text{ŞDGT}}$	: şekil değiştirmeye göre tasarım
ν	: poisson oranı
$\{u(t)\}$	: deplasman vektörü
$\{\dot{u}(t)\}$	: hız vektörü
$\{\ddot{u}(t)\}$	: ivme vektörü
V_P	: basınç dalgası
V_S	: kayma dalgası
ω	: açısal frekans
Z	: Zemin Kat
ZYE	: Zemin-yapı etkileşimi

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1. Malzeme özellikleri	89
Tablo 2. Binaya ait deprem verileri.....	91
Tablo 3. Zeminin dinamik karakteristik özellikleri.....	94
Tablo 4. Basit ölçeklendirme için kullanılan bina periyotları.....	97
Tablo 5. Deprem ölçek katsayıları	100
Tablo 6. Deprem ivme kayıtlarına ait bilgiler.....	100
Tablo 7. Depremlerin kaydedildikleri açılar	103
Tablo 8. Rayleigh Sönüm Katsayıları	104
Tablo 9. YSKM boyutları	107
Tablo 10. YSKM’de depremsiz durumda oluşan şekil değiştirmeler ve kontrolleri	107
Tablo 11. YSKM’de depremli durumda oluşan şekil değiştirmeler ve kontrolleri.	108
Tablo 12. YSKM’de burkulma yükleri ve eksenel yük kapasiteleri.....	108
Tablo 13. $\lambda_{üst}$ ve λ_{alt} değerleri.....	109
Tablo 14. DD-1 yer hareketi düzeyinin tasarım yer değiştirmesini bulmada kullanılan değerler.....	112
Tablo 15. Bulunan DD-1 yer hareketi düzeyindeki tasarım yer değiştirmesinin kontrolü	112
Tablo 16. DD-2 yer hareketi düzeyinin tasarım yer değiştirmesini bulmada kullanılan değerler.....	113
Tablo 17. Bulunan DD-2 yer hareketi düzeyindeki tasarım yer değiştirmesinin kontrolü	113
Tablo 18. Analizlerde kullanılan YSKM’nin mekanik özellikleri.....	115
Tablo 19. Sönümleme katsayısını bulmak için kullanılan değerler.....	117
Tablo 20. Sönümleme katsayısını bulmak için kullanılan değerler.....	119
Tablo 21. Sönümleme katsayısını bulmak için kullanılan değerler.....	120
Tablo 22. Analizlerde kullanılan AVS’nin mekanik özellikleri	121

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Üçgensel ve dikdörtgensel elemanlar.....	19
Şekil 2. Kelvin-Voigt katısının şematik gösterimi (Kramer 1996)	25
Şekil 3. Viskoz sınır şartı (Çağlar, Garip ve Yaman 2005).....	26
Şekil 4. Viskoz sınır şartı modellemesi (Xie, Chi ve Wang 2020).....	28
Şekil 5. Sonlu elemanlar için sınır şartları a) ana sınırlar b) yerel sınırlar c) tutarlı sınırlar (Kramer 1996).	28
Şekil 6. Sonlu Eleman Modeli ve Sınır Eleman Modelinin karşılaştırılması (Tonyalı ve Ates 2018)	29
Şekil 7. Eğri sınır koşulu (Griffiths 1990).....	30
Şekil 8. Üzerine tekil yük yüklenmiş Winkler Modeli (Mamuk 2010).....	32
Şekil 9. Filonenko-Borodich Modeli (Mamuk 2010).....	33
Şekil 10. Hetenyi Modeli (Mamuk 2010).....	34
Şekil 11. Pasternak Modeli (Mamuk 2010).....	35
Şekil 12. Vlasov Modeli (Mamuk 2010)	37
Şekil 13. Reissner modeli (Tanahashi ve Suzuki 2020)	38
Şekil 14. Elastik zemine oturan bir plak şeması (Teodoru ve Muşat 2010).....	39
Şekil 15. Zemin modelleme şekilleri (a) eşdeğer yaylarla modellenmesi (b) kayma kirişi olarak modellenmesi (c) yarı sonsuz ortam olarak idealleştirilmesi (d) sonlu elemanlarla modellenmesi (Ala 2007)	40
Şekil 16. Kerr temel modeli örneği (Shahsavari ve diğ. 2018)	41
Şekil 17. Eylemsizlik Etkileşimi (Pitilakis 2006).....	42
Şekil 18. Kinematik etkileşim (Pitilakis 2006).....	43
Şekil 19. Rijit taban yaklaşımı (Çetinkaya, Çelebi ve Kırtel 2017)	43
Şekil 20. Esnek taban yaklaşımı (Çetinkaya, Çelebi ve Kırtel 2017).....	44
Şekil 21. Tipik bir histeretik eğrisi (Tatsuoka, Iwasaki ve Takagi 1978)	49
Şekil 22. Kauçuk mesnetler için idealleştirilmiş (histeresiz) eğrisi (Arguc, Avsar ve Ozdemir 2017)	62
Şekil 23. Tabakalı kauçuk mesnet örneği (Sun ve Zhufu 2022)	64
Şekil 24. Kurşun çekirdekli kauçuk örneği (Yasar ve diğ. 2023).....	64
Şekil 25. Düşük sönümlü kauçuk mesnet örneği (Aldemir ve Aydın 2005).....	65

Şekil 26. Yüksek sönümlü kauçuk mesnet örneği (Çavdar ve Yıldız 2023).....	66
Şekil 27. Sürtünmeli sarkaç sistemler için idealleştirilmiş (histerezis) eğrisi (Ayhan 2006)	66
Şekil 28. Tipik bir saf sürtünmeli sistem örneği (Polycarpou 2009).....	68
Şekil 29. Tek eğrilikli sürtünmeli sarkaç mesnet örneği (Dicleli 2013).....	68
Şekil 30. İki eğrilikli sürtünmeli sarkaç mesnetlerin basitleştirilmiş kesiti (TBDY 2018)	69
Şekil 31. Üç eğrilikli sürtünmeli sarkaç mesnetin çalışma prensibi (Dicleli 2013) ..	70
Şekil 32. Tipik çok yönlü EradiQuake sismik izolatörünün bileşenleri (Lee ve Cho 2013)	70
Şekil 33. Esnek-sürtünmeli taban-izolasyon sisteminin tipik bir örneği (Gil ve diğ. 2020)	71
Şekil 34. Fransız elektrik sistemi detayı (Ürkmezyel 2023)	72
Şekil 35. Bir metalik sönümleyici örneği (Ocak, Niğdeli ve Bekdaş 2023)	73
Şekil 36. Ayarlı kütle sönümleyici (Naimi ve Waheb 2019)	75
Şekil 37. Aktif ayarlı kütle sönümleyicileri (ATMD) sistemine sahip yapının genel bileşeni (Kayabekir ve diğ. 2020).....	76
Şekil 38. Aktif kütle sönümleyici şematığı (Rosti ve diğ. 2022)	78
Şekil 39. Manyeto-reolojik sönümleyici örneği (Engin ve diğ. 2021)	80
Şekil 40. Değişken orifis sönümleyici örneği (Luca ve Pastia 2009).....	81
Şekil 41. Değişken sürtünmeli sönümleyici şematik diyagramı (Ng ve Xu 2007) ...	81
Şekil 42. Değişken rijitlik sönümleyici sistemin şematik gösterimi (Kori ve Jangid 2007)	82
Şekil 43. Karma kütle sönümleyici (Kavyashree, Patil ve Rao 2021)	83
Şekil 44. Çatı katı kat planı	85
Şekil 45. (a) Normal kat planı (b) Yalıtım katı kat planı.....	86
Şekil 46. Yalın yapının (a) önden görünümü (b) soldan görünümü	87
Şekil 47. Katlar arası izolasyonlu yapının (a) önden görünümü (b) soldan görünümü	87
Şekil 48. Akışkan viskoz sönümleyicili yapının (a) önden görünümü (b) soldan görünümü	87

Şekil 49. Üstyapıya akışkan viskoz sönümleyicinin eklendiği katlar arası izolasyonlu karma yapının (a) önden görünümü (b) soldan görünümü	88
Şekil 50. Altyapıya akışkan viskoz sönümleyicinin eklendiği katlar arası izolasyonlu karma yapının (a) önden görünümü (b) soldan görünümü	88
Şekil 51. Aksların oluşturulması	89
Şekil 52. (a) Kiriş enkesiti (b) normal kat ve çatı katı kolonu (c) yalıtım katı kolonu	90
Şekil 53. SAP2000’de tanımlanan kütle kaynağı	90
Şekil 54. (a) Kirişler için etkin kesit rijitlik çarpanları (b) Kolonlar için etkin kesit rijitlik çarpanları (c) Döşemeler için etkin kesit rijitlik çarpanları	92
Şekil 55. Yarı rijit diyafram.....	93
Şekil 56. Yapının zemin-yapı etkileşimli modelinin önden görünüşü	94
Şekil 57. Yapının zemin-yapı etkileşimli modelinin yandan görünüşü.....	94
Şekil 58. Yatay elastik tasarım spektrumları	95
Şekil 59. Deprem kayıtlarını elde etmede girilen parametreler.....	96
Şekil 60. Elastik tasarım spektrumunu siteye gönderme sayfası.....	97
Şekil 61. Spektrum edit sayfası	98
Şekil 62. Web sayfası üzerinde ölçeklendirme yapılması için gereken parametreler	99
Şekil 63. 21 Şubat 2011 tarihli Christchurch New Zealand deprem ivme kayıtları	101
Şekil 64. 16 Temmuz 2007 tarihli Chuetsu-oki deprem ivme kayıtları	101
Şekil 65. 3 Ekim 2010 tarihli Darfield New Zealand depreminin ivme kayıtları ...	102
Şekil 66. 17 Ocak 1994 tarihli Northridge depreminin ivme kayıtları.....	102
Şekil 67. Optimizasyon sonucu ve meydana gelen burulmayı engellemek için yerleştirilen sönümleyiciler.....	116
Şekil 68. Optimizasyon sonucu ve meydana gelen burulmayı engellemek için yerleştirilen sönümleyiciler.....	118
Şekil 69. Christchurch New Zealand Durum 1 katlarda oluşan en büyük deplasman değerleri (a) x yönündeki N23E bileşeninin değerleri (b) x yönündeki N67W bileşeninin değerleri (c) y yönündeki N23E bileşeninin değerleri (d) y yönündeki N67W bileşeninin değerleri	123
Şekil 70. Christchurch New Zealand Durum 2 katlarda oluşan en büyük deplasman değerleri (a) x yönündeki N23E bileşeninin değerleri (b) x yönündeki N67W	

bileşeninin değerleri (c) y yönündeki N23E bileşeninin değerleri (d) y yönündeki N67W bileşeninin değerleri	124
Şekil 71. Christchurch New Zealand Durum 1 katlarda oluşan en büyük deplasmanları titreşim kontrol sistemlerinin yüzde kaç değiştirdiğini gösteren grafikler (a) x yönündeki N23E bileşeninin değerleri (b) x yönündeki N67W bileşeninin değerleri (c) y yönündeki N23E bileşeninin değerleri (d) y yönündeki N67W bileşeninin değerleri.....	125
Şekil 72. Christchurch New Zealand Durum 2 katlarda oluşan en büyük deplasmanları titreşim kontrol sistemlerinin yüzde kaç değiştirdiğini gösteren grafikler (a) x yönündeki N23E bileşeninin değerleri (b) x yönündeki N67W bileşeninin değerleri (c) y yönündeki N23E bileşeninin değerleri (d) y yönündeki N67W bileşeninin değerleri.....	126
Şekil 73. Chuetsu-oki depremi Durum 1 katlarda oluşan en büyük deplasman değerleri (a) x yönü (b) y yönü	127
Şekil 74. Chuetsu-oki depremi Durum 2 katlarda oluşan en büyük deplasman değerleri (a) x yönü (b) y yönü	127
Şekil 75. Chuetsu-oki Durum 1 katlarda oluşan en büyük deplasmanları titreşim kontrol sistemlerinin yüzde kaç değiştirdiğini gösteren grafikler (a) x yönü (b) y yönü.....	128
Şekil 76. Chuetsu-oki Durum 2 katlarda oluşan en büyük deplasmanları titreşim kontrol sistemlerinin yüzde kaç değiştirdiğini gösteren grafikler (a) x yönü (b) y yönü.....	128
Şekil 77. Darfield New Zealand Durum 1 katlarda oluşan en büyük deplasman değerleri (a) x yönündeki N23E bileşeninin değerleri (b) x yönündeki N67W bileşeninin değerleri (c) y yönündeki N23E bileşeninin değerleri (d) y yönündeki N67W bileşeninin değerleri	129
Şekil 78. Darfield New Zealand Durum 2 katlarda oluşan en büyük deplasman değerleri (a) x yönündeki N23E bileşeninin değerleri (b) x yönündeki N67W bileşeninin değerleri (c) y yönündeki N23E bileşeninin değerleri (d) y yönündeki N67W bileşeninin değerleri	130
Şekil 79. Darfield New Zealand Durum 1 katlarda oluşan en büyük deplasmanları titreşim kontrol sistemlerinin yüzde kaç değiştirdiğini gösteren grafikler (a) x	

yönündeki N23E bileşeninin değerleri (b) x yönündeki N67W bileşeninin değerleri (c) y yönündeki N23E bileşeninin değerleri (d) y yönündeki N67W bileşeninin değerleri.....	131
Şekil 80. Darfield New Zealand Durum 2 katlarda oluşan en büyük deplasmanları titreşim kontrol sistemlerinin yüzde kaç değiştirdiğini gösteren grafikler (a) x yönündeki N23E bileşeninin değerleri (b) x yönündeki N67W bileşeninin değerleri (c) y yönündeki N23E bileşeninin değerleri (d) y yönündeki N67W bileşeninin değerleri.....	132
Şekil 81. Northridge Durum 1 katlarda oluşan en büyük deplasman değerleri (a) x yönü (b) y yönü	133
Şekil 82. Northridge Durum 2 katlarda oluşan en büyük deplasman değerleri (a) x yönü (b) y yönü	133
Şekil 83. Northridge Durum 1 katlarda oluşan en büyük deplasmanları titreşim kontrol sistemlerinin yüzde kaç değiştirdiğini gösteren grafikler (a) x yönü (b) y yönü	133
Şekil 84. Northridge Durum 2 katlarda oluşan en büyük deplasmanları titreşim kontrol sistemlerinin yüzde kaç değiştirdiğini gösteren grafikler (a) x yönü (b) y yönü	134
Şekil 85. Christchurch New Zealand Durum 1 katlarda oluşan en büyük ivme değerleri (a) x yönündeki N23E bileşeninin değerleri (b) x yönündeki N67W bileşeninin değerleri (c) y yönündeki N23E bileşeninin değerleri (d) y yönündeki N67W bileşeninin değerleri.....	135
Şekil 86. Christchurch New Zealand Durum 2 katlarda oluşan en büyük ivme değerleri (a) x yönündeki N23E bileşeninin değerleri (b) x yönündeki N67W bileşeninin değerleri (c) y yönündeki N23E bileşeninin değerleri (d) y yönündeki N67W bileşeninin değerleri.....	136
Şekil 87. Christchurch New Zealand Durum 1 katlarda oluşan en büyük ivmeleri titreşim kontrol sistemlerinin yüzde kaç değiştirdiğini gösteren grafikler (a) x yönündeki N23E bileşeninin değerleri (b) x yönündeki N67W bileşeninin değerleri (c) y yönündeki N23E bileşeninin değerleri (d) y yönündeki N67W bileşeninin değerleri.....	137

Şekil 88. Christchurch New Zealand Durum 2 katlarda oluşan en büyük ivmeleri titreşim kontrol sistemlerinin yüzde kaç değiştirdiğini gösteren grafikler (a) x yönündeki N23E değerleri (b) x yönündeki N67W değerleri (c) y yönündeki N23E değerleri (d) y yönündeki N67W değerleri.....	138
Şekil 89. Chuetsu-oki Durum 1 katlarda oluşan en büyük ivme değerleri (a) x yönü (b) y yönü.....	139
Şekil 90. Chuetsu-oki Durum 2 katlarda oluşan en büyük ivme değerleri (a) x yönü (b) y yönü.....	139
Şekil 91. Chuetsu-oki Durum 1 katlarda oluşan en büyük ivmeleri titreşim kontrol sistemlerinin yüzde kaç değiştirdiğini gösteren grafikler (a) x yönü (b) y yönü	140
Şekil 92. Chuetsu-oki Durum 2 katlarda oluşan en büyük ivmeleri titreşim kontrol sistemlerinin yüzde kaç değiştirdiğini gösteren grafikler (a) x yönü (b) y yönü	140
Şekil 93. Darfield New Zealand Durum 1 katlarda oluşan en büyük ivme değerleri (a) x yönündeki N23E bileşeninin değerleri (b) x yönündeki N67W bileşeninin değerleri (c) y yönündeki N23E bileşeninin değerleri (d) y yönündeki N67W bileşeninin değerleri.....	141
Şekil 94. Darfield New Zealand Durum 2 katlarda oluşan en büyük ivme değerleri (a) x yönündeki N23E bileşeninin değerleri (b) x yönündeki N67W bileşeninin değerleri (c) y yönündeki N23E bileşeninin değerleri (d) y yönündeki N67W bileşeninin değerleri.....	142
Şekil 95. Darfield New Zealand Durum 1 katlarda oluşan en büyük ivmeleri titreşim kontrol sistemlerinin yüzde kaç değiştirdiğini gösteren grafikler (a) x yönündeki N23E değerleri (b) x yönündeki N67W değerleri (c) y yönündeki N23E değerleri (d) y yönündeki N67W değerleri.....	143
Şekil 96. Darfield New Zealand Durum 2 katlarda oluşan en büyük ivmeleri titreşim kontrol sistemlerinin yüzde kaç değiştirdiğini gösteren grafikler (a) x yönündeki N23E değerleri (b) x yönündeki N67W değerleri (c) y yönündeki N23E değerleri (d) y yönündeki N67W değerleri.....	144
Şekil 97. Northridge Durum 1 katlarda oluşan en büyük ivme değerleri (a) x yönü (b) y yönü.....	145

Şekil 98. Northridge Durum 2 katlarda oluşan en büyük ivme değerleri (a) x yönü (b) y yönü.....	145
Şekil 99. Northridge Durum 1 katlarda oluşan en büyük ivmeleri titreşim kontrol sistemlerinin yüzde kaç değiştirdiğini gösteren grafikler (a) x yönü (b) y yönü	145
Şekil 100. Northridge Durum 2 katlarda oluşan en büyük ivmeleri titreşim kontrol sistemlerinin yüzde kaç değiştirdiğini gösteren grafikler (a) x yönü (b) y yönü	146
Şekil 101. Doğal hâkim titreşim periyotları	146
Şekil 102. Christchurch New Zealand Durum 1 katlarda oluşan en büyük görelî kat ötelenme değerleri (a) x yönündeki N23E bileşeninin değerleri (b) x yönündeki N67W bileşeninin değerleri (c) y yönündeki N23E bileşeninin değerleri (d) y yönündeki N67W bileşeninin değerleri	147
Şekil 103. Christchurch New Zealand Durum 2 katlarda oluşan en büyük görelî kat ötelenme değerleri (a) x yönündeki N23E bileşeninin değerleri (b) x yönündeki N67W bileşeninin değerleri (c) y yönündeki N23E bileşeninin değerleri (d) y yönündeki N67W bileşeninin değerleri	148
Şekil 104. Chuetsu-oki Durum 1 katlarda oluşan en büyük görelî kat ötelenme değerleri (a) x yönü (b) y yönü	149
Şekil 105. Chuetsu-oki Durum 2 katlarda oluşan en büyük görelî kat ötelenme değerleri (a) x yönü (b) y yönü	149
Şekil 106. Darfield New Zealand Durum 1 katlarda oluşan en büyük görelî kat ötelenme değerleri (a) x yönündeki N23E bileşeninin değerleri (b) x yönündeki N67W bileşeninin değerleri (c) y yönündeki N23E bileşeninin değerleri (d) y yönündeki N67W bileşeninin değerleri	150
Şekil 107. Darfield New Zealand Durum 2 katlarda oluşan en büyük görelî kat ötelenme değerleri (a) x yönündeki N23E bileşeninin değerleri (b) x yönündeki N67W bileşeninin değerleri (c) y yönündeki N23E bileşeninin değerleri (d) y yönündeki N67W bileşeninin değerleri	151
Şekil 108. Northridge Durum 1 katlarda oluşan en büyük görelî kat ötelenme değerleri (a) x yönü (b) y yönü	152

Şekil 109. Northridge Durum 2 katlarda oluşan en büyük görelî kat ötelenme değerleri (a) x yönü (b) y yönü	152
Şekil 110. Christchurch New Zealand depremi uygulandığında elde edilen en büyük taban kesme kuvveti değerleri (a) x yönü (b) y yönü	153
Şekil 111. Chuetsu-oki depremi uygulandığında elde edilen en büyük taban kesme kuvveti değerleri (a) x yönü (b) y yönü	153
Şekil 112. Darfield New Zealand depremi uygulandığında elde edilen en büyük taban kesme kuvveti değerleri (a) x yönü (b) y yönü	154
Şekil 113. Northridge depremi uygulandığında elde edilen en büyük taban kesme kuvveti değerleri (a) x yönü (b) y yönü	155
Şekil 114. Christchurch New Zealand depremin dinamik analizi sonucu sistemlere giren enerji miktarları.....	156
Şekil 115. Chuetsu-oki depremin dinamik analizi sonucu sistemlere giren enerji miktarları.....	157
Şekil 116. Darfield New Zealand depremin dinamik analizi sonucu sistemlere giren enerji miktarları.....	158
Şekil 117. Northridge depremin dinamik analizi sonucu sistemlere giren enerji miktarları.....	159

GİRİŞ

Yapı ve zemin depremde birbirlerini etkilerler. Bu etkileşim özellikle yumuşak zeminlerde daha belirgindir (Kutunis 2001; Karabörk, Deneme ve Bilgehan 2010). Çoğunlukla tasarımlarda temelin rijit zemine oturduğu kabul edilir. Ancak bu tür tasarımlarda zemin etkileri görmezden gelindiğinden gerçekçi bir çözüm olmaz (Garip 2017; Çağlar, Garip ve Yaman 2005). Zemin sonsuz ortamdır. Ancak yapı-zemin dinamik etkileşimi ve dalga yayılımı problemlerinde zemin üçe ayrılır. Bunlar sınırlı ortam ya da yakın bölge, etkileşim ara-yüzeyi ve sınırsız ortam ya da uzak bölgedir (Çağlar, Garip ve Yaman 2005). Yakın bölgenin sonlu elemanlar yöntemiyle kolay bir şekilde modellenmesi yapılabilir. Fakat uzak bölge için kullanılan sonlu elemanlara göre ayrılmış sınırlara uygun yapay sınır şartları ya da uygun etkileşim bölge elemanları kullanılabilir. Yakın bölgenin sınırlarına göre dalga yayılma koşulları seçilmelidir (Karabörk, Deneme ve Bilgehan 2010).

Zemin-yapı etkileşimi problemlerinin çözümleri iki yaklaşıma dayalıdır. Bunlardan biri doğrudan yöntem diğeri de çok adımlı ya da diğer adıyla alt sistem yöntemidir (Aydinoğlu 1992). Doğrudan yöntemde yapı ve zemin beraber sonlu elemanlar yöntemiyle modellenir (Ala 2007). Çok adımlı yöntemde ise zemin sistemi doğrusal uzak bölge ve doğrusal olmayan yakın bölge diye ikiye ayrılır (Karabörk 2009).

Eskiden sonlu elemanlar yöntemiyle yalnızca zemin modellemesinde yakın bölge hesaba katılır, uzak bölgenin etkisi hesaba katılmaz, uzak bölge için sınır elemanlar yöntemi kullanılırdı. Bu durumda yansıyan dalgalar hesaba katılmadığından analiz yanlış sonuçlar verirdi. Uzak bölgeyi dâhil etmek için etkileşim arayüzünde sonlu elemanlar düğüm noktalarına özel yapay sınır şartları eklenir ya da özel etkileşim elemanları kullanılır. Bu sınır şartları da dalga yayılma şartlarını sağlayacak şekilde olmalıdır (Karabörk, Deneme ve Bilgehan 2010).

Depreme dirençli yapı tasarımı, inşaat yöntemlerinin araştırılması, deprem nedeniyle hasarın azaltılması yüksek öneme sahip mühendislik problemleridir. Depreme dirençli yapılar ya hasar almadan elastik bir davranış sergiler ya da deprem sırasında sınırlı hasarla sünek bir davranış sergiler. Deprem gibi yapıyı doğrudan etkileyen dinamik kuvvetlere karşı yapıda oluşan hasar seviyesini önlemek ya da

azaltmak önemlidir. Çeşitli yöntemler mühendislik yapılarında deprem etkisini azaltmak için geliştirilmiştir. Nispeten en yeni yöntemlerden biri yapısal kontroldür. Yapısal kontrol yapıya uygulanan ek elemanlarla sağlanır. Bunun için dört yapısal kontrol sistemi vardır: pasif kontrol sistemleri, aktif kontrol sistemleri, yarı-aktif kontrol sistemleri ve karma kontrol sistemleri (Topaloglu ve Yanık 2023).



1. GENEL BİLGİLER

1.1. Konuyla İlgili Önceden Yapılmış Çalışmalar

1.1.1. Katlar Arası İzolasyonlu ve Yapı-Zemin Etkileşimli Yapıyla İlgili Önceden Yapılan Çalışmalar

Tsai, Wang ve Su (2019) yılında yapmış oldukları çalışmada anakaya üzerinde tabakalanan çoklu tabakalı zeminler üzerinde inşa edilen katlar arası izolasyonlu bir yapıda zemin-yapı etkileşimi ve yüksek mod etkilerini araştırmışlardır. Bunun için kapalı form çözümlerinden yararlanmışlardır. Sonuç olarak zemin yapı etkileşiminin yapının sismik tepkisini oneli ölçüde değiştirdiğini, zemin katmanların ve izolatörün sönüm özelliklerinin üstyapıya giden enerjinin aktarılmasında ve emilmesinde önemli rol oynadığını, yüksek sönüm oranının üstyapının ilk iki modunun tepkilerini azaltma da genelde yararlı olduğunu, üstyapıya aktarmaya çalışan titreşim enerjisini yansıtmada izolatörün verimliliğinin zemin katmanlarının özellikleriyle bir ilgisinin olmadığını ancak üstyapının ve izolatörün özelliklerine bağımlı olduğunu, sistemin yüksek mod tepkilerinin genellikle zemin katmanlarının özellikleriyle baskın olduğunu ve üstyapının yüksek mod tepkilerini azaltmanın izolatörün daha yüksek sönümü tarafından fayda görülmediğini, zemin yapı etkileşiminin etkisinin izolatör deplasman kapasitesini tasarlama da dikkatlice ele alınması gerektiğini çünkü zemin ortamının tepkisinin sınırdan yansıyan dalgalarla büyüyebileceğini ve izolasyonlu üstyapı ve yer yüzeyinin hareketinin faz dışı olabileceğini ve yüksek sönüm oranlarının izolatör deformasyonu azaltmada genellikle yararlı olduğunu bulmuşlardır.

Yingxiong ve diğ. (2021) yılında yapmış oldukları çalışmada uzak fay uzun periyotlu ve normal yer hareketi altında kazık-zemin-katlar arası izolasyonlu sistem etkileşimini araştırmak için sarsma tablasında yumuşak zemin üzerine 5 katlı yapıyı monte etmişlerdir. Çalışmada yumuşak zeminin yüksek frekanslı bileşenleri azaltabilirken orta ve düşük frekanslı bileşenleri büyüttüğü görülmüştür. Normal yer hareketi altında katlar arası izolasyon daha önemli hale gelir ve izolasyon etkisi tepe yer hareketiyle ters orantılıdır. Uzak fay uzun periyotlu yer hareketi durumunda izolasyon etkisi normal yer hareketinden daha da kötüdür. Temel ve izolasyon tabakasının belirli bir dönme etkisi vardır ve izolasyon tabakası temelin dönmesini

büyütebilir. Büyütme etkisi uzak fay uzun periyotlu yer hareketinde daha belirgindir, bu yüzden uzak fay uzun periyotlu yer hareketinde izolasyon katmanı daha fazla deplasman yapar.

Dewen ve diğ. (2022) yılında yapmış oldukları çalışmada katlar arası izolasyon sisteminin etkisini araştırmak için 5 serbestlik dereceli basitleştirilmiş ayrık bir yay sistemin dinamik denklemini oluşturmuşlardır. Çalışmada yakın fay ve uzak fay etkilerini ve yapı-zemin etkileşimini dikkate alarak ve Newmark yöntemlerinden faydalanarak analizler yapmışlardır. Analizler sonucunda uzak fay etkisinde yapı-zemin etkileşiminin izolasyonların deformasyonunda etkisinin çok az olduğunu, yakın fay etkisinde zemin kayma dalgası hızının arttıkça altyapının ivmesi artarken üstyapının ivmesinin ve taban kesme kuvvetinin arttığını ancak yapı-zemin etkileşiminin izolasyon tabakasının yer değiştirmesinde etkisinin az olduğunu bulmuşlardır.

Liu ve diğ. (2022) yılında yapmış oldukları çalışmada bir 18 katlı betonarme taban izolasyonundan ve katlar arası izolasyondan oluşan aralıklı kat izolasyonlu yapıyı yapı-zemin etkileşimini de dikkate alarak 3 farklı yer hareketi altında analiz etmişlerdir. Binanın ortasında çekirdek tüp inşa edilmiştir. Analizler ETABS programında yapılmıştır. Zemin yaylarla ve sönümleyicilerle modellenmiştir. Zemin sert ve yumuşak olacak şekilde 2 farklı türde ele alınmıştır. Analizler sonucunda yapı-zemin etkileşiminden dolayı yapının rijitliğinin azaldığını, periyodun uzatıldığını ve sismik tepkinin azaldığını, zemin ne kadar yumuşadıkça bu etkinin o kadar çok arttığını, çekirdek tüpün kesme kuvveti ve hasarı azalırken çerçevenin kesme kuvveti ve hasarının arttığını, çerçevedeki sismik izolasyonlu mesnetin enerji emmesi azalırken çekirdek tüpteki sismik izolasyonlu mesnetin arttığını ve zemin ne kadar çok yumuşadıkça bu eğilimin o kadar çok belirgin olduğunu görmüşlerdir.

Gao ve diğ. (2023) yılında yapmış oldukları çalışmada çift izolasyon katlı, katlar arası izolasyonlu ve izolasyonsuz olacak şekilde 3 farklı yapı modelini, yapı-zemin etkileşimini de dikkate alarak 3 farklı yer hareketi altında analiz etmişlerdir. Analiz için 12 katlı betonarme bir yapıdan yararlanmışlardır. Kirişlerin betonu C30 iken, kolonların betonu C40'tır. Modellerde kurşun çekirdekli kauçuk mesnet kullanılmıştır. Zeminler yaylarla modellenmişlerdir. Analizler sonucunda çift kat izolasyonlu yapının periyodunun katlar arası izolasyonlu yapının periyodundan daha

büyük olduğunu, sert zeminin tepkilerinin yapı-zemin etkileşimsiz duruma nazaran daha küçük olduğunu, çift izolasyon katlı binanın daha fazla titreşim emdiğini, yumuşak zemin durumunda izolasyonlu yapının etkisinin azaldığını ve çift izolasyon katlı yapının ille de katlar arası izolasyonlu yapıdan üstün olamayacağını, üç zemin durumunda da çift izolasyon katlı yapının üst izolasyon katmanındaki izolatörün basınç gerilmesi taban izolasyon katmanındaki izolatörden daha düşük olduğunu görmüşlerdir.

Hasan ve Younus (2023) yılında yapmış oldukları çalışmada bir çelik kıyı ötesi yapısını izolasyonsuz, taban izolasyonlu ve katlar arası izolasyonlu olacak şekilde 3 farklı şekilde modellemişlerdir. Modellerde zemin-yapı etkileşimi ve yapı-su etkileşimini de dikkate almışlardır. Her yapıyı her biri 40 metre genişliğinde 3'e 3'lük kazık temel sistemin üzerine oturarak modellemişlerdir. Yapı modellemelerini Dinamik Açık analiz türüyle analiz etmişlerdir. Tüm modellemeler üç boyutlu katı cisimlerle yapılmıştır. Analizler sonucunda uygun izolasyon seçiminin kıyı ötesi yapıların tepkisini azaltabileceğini, taban izolasyonunun yüksek su dalgasına maruz kalan platformlar için tam stabilite sağladığını ve temele aktarılan yük ve momentleri azalttığını, izolasyonsuz durumda kazıkların ötelenmesi birbirlerinden farklıyken izolasyonlu durumda birbirleriyle aynı ötelenmeyi yaptığını, taban izolasyonlu durumda güvertenin deplasmanı çok küçükken izolasyonsuz ve katlar arası izolasyonlu durumda deplasmanların sırasıyla %26 ve %50 daha büyük olduğunu bulmuşlardır.

Topaloglu ve Yanik (2023) yılında yapmış oldukları çalışmada yapı-zemin etkileşimi dikkate alarak 5 katlı bir binanın SAP2000 yazılımında taban izolasyonu ve katlar arası izolasyonunun etkisini incelemiştir. Bunun için ankastre mesnetli bina, zemin-yapı etkileşimli bina, zemin-yapı etkileşimi dikkate alan ve almayan sadece taban izolasyonlu bina ve hem taban izolasyonlu ve hem orta kat izolasyonlu binayı iki farklı yer hareketi altında analiz etmiştir. Analizler sonucunda taban izolasyonu ve katlar arası izolasyonunun binanın sismik performansını olumlu etkilediğini bulmuştur. Ayrıca sadece taban izolasyonlu bina ile hem taban izolasyonlu hem de katlar arası izolasyonlu binanın sismik performansının birbirlerine yakın olduğunu bulmuşlardır. Yapı-zemin etkileşimi ivme, hız ve deplasmanları artırmıştır.

Wan ve diğ. (2023) yılında yapmış oldukları çalışmada bir eğimli dağlık alan üzerine uzun destekli zemin yapı etkileşimli, uzun destekli geleneksel zemin-yapı etkileşimli, uzun destekli değişken zemin parametrelili zemin-yapı etkileşimli olacak şekilde 3 farklı bina modellerine deprem analizler uygulamışlardır. Bina 12 katlıdır. İzolasyon düzlemi 3. Ve 4. katlar arasına yerleştirilmiştir. Zemin için üç farklı kayma dalgası hızı tanımlanmıştır. Zemin yay ve sönümleyicilerle modellenmiştir. Eğimin açısı 17° 'dir. Depremler aşağı eğim ve enine eğim yönünde uygulanmıştır. Deprem analizleri sonucunda zemin-yapı etkileşimli tepkilerin zemin-yapı etkileşimsiz tepkilerden daha gerçekçi olduğu, zeminin sönümü ve rijitliğin tepkileri değiştirdiği için değişken parametrelili zeminin geleneksel zeminin parametrelerinden daha düşük çıktığını, kayma dalgası hızı azaldıkça yapının sismik tepkilerinin arttığını, enine eğim yönündeki tepkilerin aşağı eğim yönündeki tepkilerden daha büyük olduğunu bulmuşlardır.

Wan, Li, ve diğ. (2023) yılında yapmış oldukları çalışmada yapı-zemin etkileşimini dikkate alarak katlar arası izolasyonlu 10 katlı bir binanın eğimli zemin üzerinde 7 farklı yer hareketi altında bir boyutlu, iki boyutlu ve üç boyutlu deprem analizlerini yapmışlardır. İzolasyon düzlemi 1. ve 2. katlar arasına yerleştirilmiştir. Zemin Mohr Coulomb modeliyle modellenmiştir. Sınır şartları olarak yapay viskoelastik sınırlar kullanılmıştır. Analizler sonucunda zemin-yapı etkileşiminin tepkileri büyüttüğünü, üç boyutlu depremlerin bir boyutlu ve iki boyutlu depremlerden daha önemli olduğunu, üç boyutlu depremlerde izolatörün çekme ve basınç sınır değerlerini aştığını ve bunun da izolatörün kopmasına ve yapının devrilmesine neden olabileceğini, üç boyutlu izolatörün çekme ve basınç gerilmelerini etkili bir şekilde azalttığını, düşey ve yanal deprem emme performansına sahip olduklarını, üç boyutlu izolatörün zemin gerilmesinin iki boyutlu izolatörle kıyasla azalttığını bulmuşlardır.

Xiao ve diğ. (2023) yılında yapmış oldukları çalışmada yapı-zemin etkileşimini dikkate alarak düzensiz planlı katlar arası izolasyonlu 19 katlı bir betonarme binaya deprem analizleri uygulamışlardır. Yapıda zemin-yapı etkileşimini incelemek için yumuşak zemin, sert zemin ve zemin-yapı etkileşimsiz olacak şekilde 3 farklı türde bina modeli ele alınmıştır. Zemin-yapı etkileşimi yaylarla hesaba katılmıştır. İzolatör birimi olarak kurşun çekirdekli kauçuk mesnet kullanılmıştır. İzolatör düzlemi 8. kat ila 9. katın arasına yerleştirilmiştir. Kolon ve kirişlere plastik

mafsallar atılmıştır. Tüm modellemeler sonlu elemanlar programı olan ETABS'dan yararlanılmıştır. Yapılan analizler sonucu zemin yumuşadıkça depremde bina tepkilerinin büyüdüğünü, bu yüzden yüksek katlı yapılarda dikkate alınması gerektiğini, zemin yumuşadıkça ilk 3 periyotun ve plastik mafsallaşmaların arttığını, zemin yumuşadıkça burulma etkisinin arttığını gözlemlemişlerdir.

Xu ve diğ. (2023) yılında yapmış oldukları çalışmada yapı-zemin etkileşimi dikkate alındığında birleşik uzun periyotlu sismik hareketlerin rezonansa girme olasılığı olduğundan, sarsma tablası üzerinde ve sonlu eleman simülasyonu ile katlar arası izolasyon sistemli 6 katlı çelik yapı sistemini kurmuşlardır. Deprem analizleri yapmak için yakın fay-sıradan, uzak fay-sıradan, yakın fay-darbeli, uzak fay harmonik yer hareketi olmak üzere toplam 4 yer hareketi seçilmiştir. Yapı-zemin etkileşiminin etkisini daha net görebilmek için yapı rijit tabana ve yumuşak zemine oturtulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre zemin-yapı etkileşimi dikkate alındığında binanın doğal titreşim periyodu rijit tabana göre elde edilen doğal titreşim periyodunun 1,2 katıdır. Aynı şekilde sönüm katsayısı rijit tabana oturtulan binanın periyodunun 1,4 katıdır. Zemin-yapı etkileşimi dikkate alındığında altyapının üst kısmının ivme büyütme faktörü üst yapının üst kısmına göre daha büyük olduğunu bulmuştur. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alındığında katlar arası izolasyonlu binanın yer değiştirme tepkisi büyümüştür. Yapı-zemin etkileşimi ortalama sismik hareketin kesme kuvvetini önemli ölçüde azaltmıştır ve $PGA=0,1g$ iken sismik hareketler alt katmanda büyük oranda artarken $PGA=0,2g$ olduğunda rijit tabanıninkine oldukça yakın çıkmıştır.

Xu, Gao ve diğ. (2023) yılında yapmış oldukları çalışmada karstik bir bölgenin stabilitesini artırmak için yapı-zemin etkileşimini dikkate alan katlar arası izolasyonlu bir yapıya farklı girdi hareketleri altında bir boyutlu, iki boyutlu ve üç boyutlu yer hareketleri uygulamışlardır. Sonuçta üç boyutlu yer hareketinin iki boyutlu ve bir boyutlu yer hareketlerinden daha fazla görelî kat ötelenmesi ve daha fazla katlar arası kesme kuvvetleri vermiştir. Katlar arası izolasyon üstyapıya daha az düşey yer ivmesi aktarmıştır. Üç boyutlu izolasyon mesnetteki çekme ve basınç gerilmelerini düşürmüştür. Üç boyutlu izolasyon ayrıca temelde daha düşük zemin gerilmelerine sebep olmuştur.

Yanik ve Topaloğlu (2023) yılında yapmış oldukları çalışmada 15 katlı binanın ankastre mesnetli, taban izolasyonlu ve hem taban izolasyonlu ve hem de katlar arası

izolasyonlu olacak şekilde 3 farklı deprem yer hareketi altında zaman tanım alanında analizlerini yapmışlardır. Analizler sonucunda hem katlar arası izolasyonlu hem de taban izolasyonlu 15 katlı binanın sismik performansından önemli iyileşmeler sağlandığı görülmüştür. Ayrıca yapı-zemin etkileşiminin ve yapının yüksekliğinin, yapının sismik davranışını azalttığı sonucuna ulaşmışlardır.

Wan ve diğ. (2024) yılında yapmış oldukları çalışmada dağlık alanda bir 11 katlı betonarme katlar arası izolasyonlu yapının eğimli arazide yapı-zemin etkileşimini dikkate alarak 2 adet sıradan, 2 adet yakın fay darbe tipli uzun periyotlu, 3 adet uzak fay uzun periyotlu harmonik, 3 adet uzak fay uzun periyotlu harmonik olmayan olacak şekilde 10 farklı yer hareketi alanda deprem analizlerini yapmışlardır. İzolasyon düzlemi 2. ve 3. katlar arasına yerleştirilmiştir. Analizler sonucunda dağlık alanda yapı-zemin etkileşiminin yapının sismik tepkisini büyüttüğünü, yapının uzun periyotlu depremler altında tepkisinin sıradan depremlerden daha büyük olduğunu, yapının tepkisinin uzak fay harmonik deprem altında yakın fay darbe tipli depremden daha büyük olduğunu, yapının tepkisinin yakın fay darbe tipli deprem altında uzak fay harmonik olmayan depremden daha büyük olduğunu, yapı uzun periyotlu depremlere maruz kaldığında izolatör mesnetin deplasmanlarının sınır değerleri aştığını ve bunun devrilmeye ve kararsızlığa neden olduğunu bulmuşlardır.

Yang ve diğ. (2024) yılında yapmış oldukları çalışmada 18 katlı betonarme bir yapıyı bir dağın düşey yüzüne hizalı olacak şekilde dağın üzerine oturtulmuştur. Bina zemin yapı etkileşimli katlar arası izolasyonlu, zemin yapı etkileşimsiz katlar arası izolasyonlu, zemin yapı etkileşimli çift izolasyon katlı ve zemin yapı etkileşimsiz çift izolasyon katlı olacak şekilde 4 farklı bina modellerine üç boyutlu yer hareketi analizleri uygulamışlardır. Yer hareketi olarak olağan yer hareketi, uzak fay harmonik olmayan yer hareketi, uzak fay harmonik yer hareketi olacak şekilde 3 farklı yer hareketini kullanmışlardır. Zemin türleri olarak yumuşak zemin, orta yumuşak zemin, orta sert zemin ve sert zemin olacak şekilde 4 farklı zemin türü çalışmada kullanılmıştır. Zeminler yay ve dashpotlarla modellenmiştir. İzolasyon katları bir izolasyon katı olan modelde 5. ila 6. katların arasına, iki izolasyon katı olan modelde ise 5. ila 6. katların arasına ve 10. ila 11. katların arasına konulmuştur. Yapılan analizler sonucu uzak fay uzun periyotlu yer hareketlerinin katlar arası izolasyonlu yapının sismik tepkilerini arttırdığını, göreceli kat ötelenmeleri ve katlar arası kesmeler

özellikle uzak fay uzun periyotlu yer hareketlerinde önemli etkiler gösterdiğini, çift izolasyonlu yapının sismik tepkileri azalttığı için yapısal riski de düşürdüğü, zemin yapı etkileşiminin yapının sismik tepkilerini kötüleştirdiğini ve zemin yumuşadıkça görelî kat ötelenme açılarını, plastik mafsall oluşumunu ve gerilmeleri arttırdığını ve ayrıca çift izolasyon katlı binanın çekme gerilmelerini azalttığı için yapının nadir depremlerde devrilme riskini azalttığını ve katlar arası izolasyonlu binadan daha fazla enerji sönümlediğini görmüşlerdir.

1.1.2. Viskoz Sönümleyicili ve Yapı-Zemin Etkileşimli Yapıyla İlgili Önceden Yapılan Çalışmalar

Pong ve Tsai (2001) yılında yapmış oldukları çalışmada yapı-temel-zemin etkileşimini dikkate alarak 10 katlı çelik bir binanın akışkan viskoz sönümleyicilerle zaman tanım alanında analizlerini yapmışlardır. Yapı esnek temelli ve rijit temelli olacak şekilde 2 farklı tipte ele alınmıştır. Analizler sonucunda zemin ortamının esnekliğinin ve temelin radyasyon sönümünü tasarımlarda dikkate almanın özellikle yüksek binalar için önemli olduğunu ve akışkan viskoz sönümleyicinin yapının sismik rahatsızlığını azaltma da akışkan viskoz sönümleyicilerin etkisinin temelin esnekliğine bağlı olduğunu görmüşlerdir.

Patel ve Jangid (2008) yılında yapmış oldukları çalışmada zemin yapı etkileşimini dikkate alarak viskoz sönümleyicili tek serbestlik dereceli sistemin deprem performansını incelemişlerdir. Çalışmada tek serbestlik dereceli yapıların yumuşak zeminde daha çok etkilendikleri ve yatay yüklere karşı koymada yapısal tepkinin büyük oranda azaldığı sonucuna ulaşmışlardır.

Farghaly (2014) yılında yaptığı çalışmasında yükseklikleri farklı ve viskoz sönümleyicilerle birbirine bağlı iki yapıyı üç boyutlu olarak yapı-zemin etkileşimini de dikkate alarak modellemişlerdir. Zemin yapı etkileşimi için sert, orta ve yumuşak zeminler Winkler metoduyla modellenmiştir. Çalışma sonucunda yumuşak zemin olduğunda yapısal tepkilerin diğerlerinden daha kritik olduğu görülmüştür. Yumuşak zemin durumunda viskoz sönümleyicinin etkisi %25 azalmıştır.

Nsieri, Offir ve Shohat (2014) yılında yapmış oldukları çalışmada Haifa Körfezi alanındaki bir kimyasal tesiste bulunan küresel bir tankın sismik güçlendirmesi için doğrusal olmayan akışkan viskoz sönümleyicilerle tasarım ve

uygulamasını yapmışlardır. Tank 3 boyutlu sonlu elemanlarla modellenmiş ve yapı zemin etkileşimi hesapta dikkate alınmıştır. Detaylı pushover analizler tüm sismik rahatsızlıkları öngörmek tanımlamak için ve akışkan viskoz sönümleyicilerle eklenen efektif sönüm oranını tahmin etmek için yürütülmüştür. Daha sonra eşdeğer viskoz sönüm konseptiyle sönüm katsayısı tahmin edilmiş ve doğrusal olmayan zaman tanım alanında analizler 50 yılda aşılma olasılığı %2 olan spektruma göre ölçeklenen 3 yer hareketiyle uygulanmıştır. Viskoz sönümleyicilere ek olarak hem temel sistemine hem de taşıyıcı çelik kolon sistemine sismik güçlendirme uygulanmıştır. Doğrusal olmayan zaman tanım alanında analizler elde edilen sonuçlar deplasman ve ivmelerin önemli ölçüde azalttığını görmüşlerdir.

Bharadwaj, Mondal ve Debnath (2019) yılında yapmış oldukları çalışmada 6 katlı çelik bir binanın yapı zemin etkileşimini de dikkate alarak doğrusal viskoz sönümleyicilerle doğrusal zaman tanım alanında analizlerle deprem analizlerini yürütmüşlerdir. Bina simetrik, T şekilli ve L şekilli olacak şekilde 3 farklı plan tipinde modellenmiştir. Zemin yumuşak, orta ve sert olacak şekilde 3 farklı şekilde ele alınmıştır. Zeminler yaylarla modellenmiştir. Analizler sonucunda orta ve sert zeminlerin görelî kat ötelenmesini ve ortalama üst kat deplasmanını maksimum azaltma sağladığını, ek akışkan viskoz sönümleyicilerin uygulanmasının bu tür planlarda iyi bir titreşim kontrolü sağladığını ve akışkan viskoz sönümleyicilerin sert zeminde orta zeminden daha iyi titreşim kontrolü sağladığını bulmuşlardır.

Mujeeb ve diğ. (2019) yılında yapmış oldukları çalışmada akışkan viskoz sönümleyiciye sahip olan ve sahip olmayan bir binanın sismik davranışını incelemişlerdir. Z+10 katlı betonarme yapı 4. sismik bölgededir ve orta sıkı zemine oturmuştur. Modeller akışkan viskoz sönümsüz, akışkan viskoz sönümü köşeye eklenen, akışkan viskoz sönümü ortaya eklenen, akışkan viskoz sönümü 2 katta bir eklenen ve sadece alttan 3 kata eklenen olacak şekilde 5 farklı şekilde yapıp analiz etmişlerdir. Çalışma sonucunda köşelere eklenen viskoz sönümleyicilerin daha etkili olduğu ortaya çıkmıştır.

Aydin ve diğ. (2020) yılında yapmış oldukları çalışmada viskoz sönümleyicilerin optimizasyonunu yapı-zemin etkileşimini de dikkate alarak yapmışlardır. Hedef sönüm oranına ve görelî kat ötelenmeleri oranına dayanarak literatürde bulunan bir sönümleyici optimizasyon metodu farklı türde kum türlerini

dikkate alarak bir bina modeli için uyarlanmıştır. Pasif kısıtlar her bir sönümleyicinin alt ve üst limitleri olarak alınırken, aktif kısıtlar sönümleme katsayıları açısından hedef bir sönümleme oranı olarak ele alınmıştır. Önerilen algoritma, tasarımcının optimum tasarımını test eden zaman tanım alanında analizlerini içerir. Tasarım depremleri altında göreceli kat ötelenme oranları her tasarım adımında kontrol edilmiştir. Birinci ve ikinci mod tepkileri ayrı ayrı ele alınmıştır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, kumlu zeminlerin üstyapıların dinamik davranışı üzerindeki olumsuz etkisi, sönümleyicilerin binalara en uygun şekilde yerleştirilmesiyle aşılabilmektedir. Analiz sonuçları, sönümleyici optimizasyon problemlerinin çözümünde zemin etkilerinin dikkate alınması gerektiğini göstermiştir.

Hatipoğlu ve Düzgün (2020) yılında yapmış oldukları çalışmada ANSYS’de iki bitişik yapının zemin-yapı etkileşimini de dikkate alarak deprem etkisinde dinamik analizini yapmışlardır. Analizler ankastre mesnet ve üç farklı zemin koşuluyla yürütülmüştür. Modellemeler iki boyutlu uzayda yapılmıştır. Zemin sınırlarına viskoz sınır şartları eklenmiştir. Akışkan viskoz sönümleyicinin etkisi sabit sönüm katsayısı ve farklı bağlantı tiplerinin kullanımıyla incelenmiştir. Analizler sonucunda akışkan viskoz sönümleyicinin sismik tepki için etkili olsa da zemin-yapı etkileşiminin etkisinin göz önüne alınması gerektiğini, her zemin modelinin yapılan analizlerinin sonuçlarının birbirinden farklı olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca her kata değil de sadece en üst kata ya da en üst katla beraber orta kata viskoz sönümleyici konulmasının yeterli olduğuna kanaat getirmişlerdir.

Yang ve diğ. (2020) yılında yapmış oldukları çalışmada rijit tabana oturan ve yumuşak zemine oturan 3’e 3 grup kazık temelli viskoz sönümleyicili 12 katlı bir binaya bir dizi sarsma tablası testleri uygulamışlardır. Çalışma sonucunda rijit tabanlı durumda kazık temelli durumdan daha iyi bir şekilde azalttığı görülmüştür. Ancak kazık temelli durumda yapının pik ivmesini, kat kesme kuvvetini ve göreceli kat ötelenmelerini hafiflettiğini görmüşlerdir. Bunun yanında kazık temel yapının mutlak yer değiştirmesini büyüttüğünü görmüşlerdir. Ayrıca viskoz sönümleyicinin oluşturduğu en büyük kuvvet yapı-kazık-zemin etkileşiminden dolayı azaldığını belirtmişlerdir.

Nathe ve Hirde (2021) yılında yapmış oldukları çalışmada eğimli arazi üzerine oturtulan bir 6 katlı asmolen döşemeli betonarme yapının yapı-zemin etkileşimini de

dikkate alarak tepki spektrumu analizlerini yapmışlardır. Yapıyı ankastre mesnetli akışkan viskoz sönümleyicisiz, yapı-zemin etkileşimli akışkan viskoz sönümleyicisiz ve yapı-zemin etkileşimli akışkan viskoz sönümleyicili olacak şekilde 3 farklı şekilde ele almışlardır. Zemin sert ve yumuşak olacak şekilde 2 farklı türde ele alınmıştır. Zemin yaylarla modellenmişlerdir. Analizler sonucunda zemin yapı etkileşimsiz yapının daha fazla kuvvet tahmin ederken en büyük kat deplasmanlarını, en büyük görelî kat ötelenmesini ve burulma düzensizliğini daha düşük tahmin ettiğini, akışkan viskoz sönümleyicili yapıda zemin yapı etkileşimi dikkate alındığında taban kesme kuvveti %37 artmıştır ancak yine de ankastre mesnetli durumdan çok daha az olduğunu, zemin yapı etkileşimini kuvvet dağılımını değiştirdiği için burulma momenti artışına neden olabileceğini, burulma düzensizliği oranını zemin yapı etkileşimi artırsa da akışkan viskoz sönümleyicinin kullanımı bu oranı düşürdüğünü, akışkan viskoz sönümleyicilerin yapıların sismik tepkilerinin düşürme de başarılı olduklarını görmüşlerdir.

Shamkhi Al-Ghazali ve Shariatmadar (2021) yılında yapmış oldukları çalışmada akışkan viskoz sönümleyicilerin komşu binalarda deprem esnasında oluşan çekiçlemeye olan etkisini araştırmak için 3 adet çelik binayı 3 farklı düzende analiz etmişlerdir. Çalışmada yapı-zemin etkileşimini dikkate almışlardır. Çalışmada simetrik ve asimetrik binalardan yararlanmışlardır. Asimetrik binaların üzerine ayrıca artırılmış ayarlı kütle sönümleyiciler ve simetrik binaların altıncı katına aktif tendonlar yerleştirilmiştir. Artırılmış ayarlı kütle sönümleyiciler ve aktif tendonların gerçek zamanlı aktif kuvvetlerini üretmek için aralık tür 2 bulanık mantık kontrolörünü kullanmışlardır. Sonuçlar her iki ana yönde akışkan viskoz sönümleyicilerle kontrol edilen asimetrik binaların olduğu düzende daha yüksek performansa sahip olduğunu bulmuşlardır.

Sivrikaya, Aydın ve Turker (2021) yılında yapmış oldukları çalışmada viskoz sönümleyicilerin optimizasyonunda yapı-zemin etkileşimini etkisini araştırmışlardır. Bunun için kumlu zeminden yararlanmışlardır. Yapı-zemin modelinin frekans tanım alanında Fourier dönüşümleri yaparak çıkartılmıştır. Optimizasyon yöntemi kullanılarak en dik yön arama algoritması kullanılmıştır. Hedef fonksiyonu olarak en büyük deplasman, en büyük mutlak ivme, taban kesmesi, taban momentini azaltma seçilmiştir. Yapının hâkim titreşim periyodu dikkate alınmıştır ve zaman tanım

alanında deprem analizleri için El Centro ivme kaydından yararlanılmıştır. Sonuç olarak hedef fonksiyonun değişiminin, toplam sönüm kapasitesinin ve yer koşullarının optimal tasarımı değiştirdiğini, sönümleyicisiz sistemlere kıyasla düşük deplasmanın sönümleyicili sistemlerde oluştuğunu, rijit durumda yapısal tepkinin kumlu zeminlerdeki farklı göreceli yoğunluğundakinden daha az olduğunu, farklı hedeflerdeki eklenen sönümleyicilerin yapısal tepkiyi iyileştirdiğini ve ayrıca kötü zemin koşullarının neden olduğu zararlı etkileri azalttığını görmüşlerdir.

Asadpour ve diğ. (2023) yılında yapmış oldukları çalışmada yapı-zemin etkileşimini ve Gauss olmayan olasılık yoğunluk fonksiyonlarını dikkate alarak doğrusal olmayan akışkan viskoz sönümleyicili yapıları analiz etmek için yeni bir stokastik doğrusallaştırma tekniği önermişlerdir. Bunun için hem sert hem de yumuşak zemin üzerine tek serbestlik dereceli sistemli yapıları analiz etmişlerdir. Analizler sonucunda önerilen stokastik doğrusallaştırma tekniğinin tahmin edilen tepkilerin hesaplama hatalarını büyük ölçüde azalttığını görmüşlerdir.

Düzgün ve diğ. (2023) yılında yapmış oldukları çalışmada sonlu elemanlar yöntemiyle deprem uyarımı altında yapı-zemin etkileşimi dâhil, viskoz akışkan sönümleyicilerle birbirine bağlanmış iki komşu çok katlı çerçeve yapılar için elde edilen minimum taban kesme kuvveti ve minimum çatı yer değiştirmesini sağlayan zemin tipi, yapının yükseklik oranı, sönümleyicinin sönüm katsayısı ve sönümleyicinin konumu gibi parametreleri tanımlamayı amaçlamışlardır. Sonlu zemin bölgesi sınırlarında yansıtıcı olmayan sınırlar olarak viskoz sınır şartı kullanılmıştır. Sistem iki boyutlu olarak Taguchi yöntemiyle modellenmiştir. Çalışmada zemin tipinin sistem tepkisinde en önemli parametre olduğuna, nispeten daha rijit zeminlerde viskoz sönümleyicilerin daha etkili olduğuna, rijit tabanda ve sıkı zeminde minimum çatı deplasmanı ve taban kesme kuvvetini elde etmek için yapı yükseklik oranının 1,5 olması, sönüm katsayısının 10^5 N*s/m olması ve viskoz sönümleyici sayısı için 1 olması gerektiğine, tek bir viskoz sönümleyicinin ekonomik olduğuna ve Taguchi yönteminin sonlu elemanlarla uyumlu olduğuna ulaşmışlardır.

Düzgün ve Hatipoğlu (2023) yılında yapmış oldukları çalışmada yapı-zemin etkileşimini de dikkate alarak iki komşu çok katlı çerçeveli binaların efektif sönüm katsayısını bulmayı amaçlamışlardır. İki boyutlu sonlu elemanlar komşu çerçeve ve zemin bölgesini sayısal ele alma için kullanmışlardır. Viskoz sınır koşullarını sonlu

zemin bölgesinin kenarlarında özel yansıtıcı olmayan sınırlar olarak kullanmışlardır. Akışkan viskoz sönümleyicilerin 5 farklı sönüm katsayısı efektif sönüm katsayısını değerlendirme de ele alınmıştır. Sönüm katsayıları ayrıık çerçevelerindekilerle birleşik çerçevelerin sonuçlarıyla kıyaslanarak belirlenmiştir. Analizler sonucunda yapı tepkisinde en önemli parametrenin zemin olduğunu ve minimum tepki için en önemli sönüm katsayısının 10^5 N*s/m olduğunu bulmuşlardır.

Hamza ve diğ. (2024) yılında yapmış oldukları çalışmada akışkan viskoz sönümleyicilerin yüksek katlı binada etkisini incelemek için bir 40 katlı betonarme yüksek binada yapı-zemin etkileşimini de dikkate alarak 3 farklı yer hareketi altında doğrusal olmayan zaman tanım alanında analizler uygulamışlardır. Analizler sönümleyicisiz ve yapı-zemin etkileşimsiz, sönümleyicisiz ve yapı-zemin etkileşimli, sönümleyicili ve yapı-zemin etkileşimsiz, sönümleyicili ve yapı-zemin etkileşimli ancak sönümleyicisiz ve yapı-zemin etkileşimsiz modele göre tasarlanan ve sönümleyicili ve yapı-zemin etkileşimli ancak sönümleyicisiz ve yapı-zemin etkileşimli modele göre tasarlanan olacak şekilde 5 farklı duruma göre yapılmıştır. Analizler sonucunda doğrudan yapı-zemin etkileşimini yaklaşımını dikkate alan akışkan viskoz sönümleyicilerin tasarımının, geleneksel yaklaşıma kıyasla kat öteleme ve yer değiştirmelerini %36'ya kadar azaltmaya ve sönümleyiciler tarafından enerji yayılımını %10'a kadar artırmaya yardımcı olabileceğini göstermektedir. Sonuçlar, yüksek bina yapılarının dayanıklılığı için akışkan viskoz sönümleyicilerin optimum tasarımını elde etmek için doğrudan yapı-zemin etkileşimi modellemesinin benimsenmesi vurgulanmıştır.

1.1.3. Katlar Arası İzolasyonlu ve Akışkan Viskoz Sönümleyicili Yapıyla İlgili Önceden Yapılan Çalışmalar

Literatürde yapının bünyesine katlar arası izolasyonlu sistemin ve akışkan viskoz sönümleyicinin dahil edildiği karma sistemli yapıları analiz eden bazı çalışmalar mevcut olsa da bunların hiçbirisi zemin-yapı etkileşimini dahil etmemiştir.

Liu ve diğ. (2018) yılında yapmış oldukları çalışmada 2. ve 3. katlar arasında katlar arası izolasyonlu ve lineer akışkan viskoz sönümleyicili 7 katlı yapıyı izolatör katmanının görelî deplasmanını ve üst yapının toplam ötelenmesini azaltmak için çok amaçlı optimizasyon modeli olan NSGA-II genetik algoritmasıyla optimize ederek

yapıyı analiz etmişlerdir. Analizler sonucunda akışkan viskoz sönümleyicinin izolatör katmanının görelî deplasmanını en fazla %60 azalttığını, altyapının dinamik tepkilerinin, yapının taban kesme kuvvetini akışkan viskoz sönümleyicilerle azaltılabileceğini ve NSGA-II genetik algoritmasıyla en iyi hız üsteli değerlerinin 0,3-1 arasında olduğunu ancak bu değerler yapının doğrusal olmayan tepkisine bağılı olduğundan ortalaması alınamayacağını bulmuşlardır.

Da Porto ve diğ. (2019) yılında yapmış oldukları çalışmada (2018) yılında yapmış oldukları çalışmadan farklı olarak aynı vaka çalışmasını bir de muadil tepki modeli isimli yeni bir optimizasyon yöntemiyle optimize etmişlerdir. Daha sonra bu yapıyı analiz etmişlerdir. Analizler sonucunda üstyapının görelî kat ötelenmesi ve kat ivmeleri izin verilebilir sınırlar arasında kaldığını, izolasyon katmanının yaklaşık %50'ye kadar azaltıldığını, optimum akışkan viskoz sönümleyicilerle alt yapının dinamik tepkisinin iyileştirildiğini, akışkan viskoz sönümleyicilerin oluşturduğu maksimum kuvvet azalan izolatör ötelenmesinden dolayı arttığı için en iyi sönümleyiciyi seçmenin önemli olduğunu, muadil tepki modeli optimizasyon prosedürünün de etkili olduğunu bulmuşlardır.

Donà ve diğ. (2021) yılında yapmış oldukları çalışmada katlar arası izolasyonlu düzenli betonarme binada 3 ayrı vaka çalışmasında NSGA-II genetik algoritması optimizasyon süreciyle hem doğrusal hem de doğrusal olmayan akışkan viskoz sönümleyicileri optimize etmiştir. Optimizasyon için izolasyon ötelenmesi ve maksimum görelî kat ötelenmelerini azaltma hedef fonksiyonları seçilmiştir. Vaka çalışmalarının ilkinde izolasyon katmanı 10. katın ila 11. katın arasında, ikincisinde 8. katın ila 9. katın arasında, üçüncüsünde ise 5. katın ila 6. katın arasında bulunmaktadır. Katlar arası izolasyonda kurşun kauçuk mesnet ve fuse-sistem kullanılmıştır. Analizler sonucunda tüm vaka çalışmalarında optimum akışkan viskoz sönümleyiciler izolasyonun ötelenmesini büyük oranda azaltmış, üstyapının kat ivmelerini ve altyapının görelî kat ötelenmelerini azaltma da iyi bir yapısal performans sağlamıştır. Akışkan viskoz sönümleyicisiz duruma göre akışkan viskoz sönümleyicilerin izolasyon eğilmesini azaltması fuse sistem için %50-%75 arasında değişirken, kurşun kauçuk mesnette bu durum %20-%50 arasında değişmektedir. Ayrıca üst yapının maksimum görelî kat ötelenmesindeki artış kurşun kauçuk mesnet durumunda her zaman %20'den az olmuştur.

1.2. Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmada Z+5 katlı bir hastane binasının ilk önce İDECAD programında performans analizi yapılmıştır. Bu performans analizi sonucunda yapının kontrollü hasar performans düzeyinde olduğu görülmüştür. Bu hastane binasının kontrollü hasar performans düzeyinden kesintisiz kullanım performans düzeyine çekilmesi amaçlanmıştır. Bunun için yüksek sönümlü kauçuk mesnetten (YSKM) ve akışkan viskoz sönümleyiciden (AVS) yararlanılmıştır. Bu sönümleyicilerle beraber yapı 5 farklı durumda ele alınmıştır. Bunlar; sönümleyicisiz (Sİ'suz), sadece katlar arası izolasyonlu (KAİ'li), sadece akışkan viskoz sönümleyicili (AVS'li), üstyapısında akışkan viskoz sönümleyicinin olduğu katlar arası izolasyonlu karma sistem (KAİ+AVS 1'li) ve altyapısında akışkan viskoz sönümleyicinin olduğu katlar arası izolasyonlu karma sistemlerdir (KAİ+AVS 2'li). Modellerde yapı-zemin etkileşimi ortak metot yöntemiyle modellenerek hesaba dahil edilmiştir. Etkileşim arayüzüne viskoz sınır şartı eklenmiştir. Bu modellemelerin hepsine doğrusal olmayan zaman tanım alanında dinamik analizler uygulanmıştır. Kolonlar ve kirişler çubuk (frame) elemanlarla, döşemeler ve perdeler kabuk (shell) elemanlarla, sönümleyici sistemler ve sınır şartları bağ (link) elemanlarla, zeminler zemin katı cisim (solid) elemanlarla modellenmiştir. Zemin tek katmanlı olarak modellenmiştir. Yapı radye temel üzerine oturtulan çerçeveli betonarme sistemdir. Kolon, kiriş, perde ve döşemelerin etkin kesit rijitlikleri Türk Bina Deprem Yönetmeliği 2018 Tablo 13.1'e göre yapılmıştır. Bütün sistemler sonlu elemanlarla modellenmiştir. Doğrusal olmayan zaman tanım alanında analizler yapmak için <https://ngawest2.berkeley.edu/> web sitesinden 4 farklı deprem kaydı alınmıştır. Ayrıca bu web sitesinde bu deprem kayıtlarının basit ölçeklendirilmesi yapılmıştır. Türk Bina Deprem Yönetmeliği 2018'de hem DD-1 hem de DD-2 deprem yer hareketi düzeylerine göre tasarım istendiği için bu tezde yapılan doğrusal olmayan deprem analizleri için deprem kayıtları bu iki deprem yer hareketi düzeyinin spektrumlarına göre ölçeklendirilmiştir. Ayrıca yapının düşey periyodu 0,1 saniyeden büyük çıktığı için deprem analizlerinde deprem kaydının düşey bileşeni de spektrum olarak dahil edilmiştir. Yüksek sönümlü kauçuk mesnet Bridgestone kataloğundan, akışkan viskoz sönümleyici ise Taylor Devices'ın kataloğundan alınmıştır. İzolasyon katı yapının zemin katı ile 1. katın arasına yerleştirilmiştir. Akışkan viskoz sönümleyicinin optimizasyonu için basitleştirilmiş sıralı arama

algoritmasından yararlanılmıştır. Sönüm katsayısını bulmak için tekdüze dağılım yönteminden yararlanılmıştır.

(Abraham ve diğ. 2021; Jouneghani, Hosseini, Rohanimanesh ve Raissi 2023; Rad, Hazaveh ve Holden 2019; Chaudhary, Devkota ve Singh 2019) vb. birçok araştırma hem kauçuk mesneti hem de akışkan viskoz sönümleyiciyi ele almıştır. Ancak bunların hiçbirisi zemin-yapı etkileşimini dikkate almamıştır.

Zemin yapı etkileşimini modellemek için ortak yöntem, sonlu elemanlar ve sınır elemanlar yöntemleri birlikte kullanılmıştır. Viskoz sönümleyicilerin optimizasyonu için Garcia'nın basitleştirilmiş sıralı arama algoritmasından yararlanılmıştır (Garcia 2001). Sönüm katsayısını bulmak için tekdüze dağıtım yönteminden yararlanılmıştır.

Dinamik analizler sonucu sönümleyicilerin en büyük ivmeleri, en büyük ötelenmeleri, taban kesme kuvvetlerini ve görelî kat ötelenmelerini ne kadar değiştirdiği grafikler halinde sunulmuştur.

Birinci bölümde zemin-yapı etkileşimi, zemin yapı dinamik etkileşiminin hareket denklemleri ve sönümleyiciler hakkında genel bilgiler verilmiştir.

İkinci bölümde sayısal analizde kullanılan hastane binasıyla ilgili ve deprem analiziyle alakalı veriler sunulmuştur. Bu veriler sönümleyici olup olmasına göre değişiklik gösterebilmektedir.

Üçüncü bölümde Z+5 katlı bir hastane binasının sönümleyicisiz, sadece yüksek sönümlü kauçuk mesnetli, sadece akışkan viskoz sönümleyicili ve hem yüksek sönümlü kauçuk mesnet hem de akışkan viskoz sönümleyici bir arada olacak şekilde binalar modellendikten sonra analizlerden elde edilen sonuçlar grafikler halinde sunulmuştur.

1.3. Yapı-Zemin Etkileşiminin Modellemesi

1.3.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi yapıların zamana bağlı tepkilerinin sayısal analizleri için çok güçlü ve çok yönlü bir yöntemdir. Bu yöntemde problem ortamı basit şekilli elemanlara bölünür. Sonlu elemanların dinamik özelliği statik rijitlik matrisi ve kütle matrisleriyle modellenir. Sönüm matrisi de mevcut olabilir. Pek çok teknik yapıların

doğrusal ve doğrusal olmayan analizlerinde performansını geliştirmek için sonlu elemanlarda oluşturulmuştur (Song 2009).

Sonlu elemanların kullanımı avantajlıdır çünkü prosedürleri çok yönlüdür ve köklüdür. Bu yöntem keyfi geometrileri, zemin katmanlaşması, malzemenin doğrusal olmaması, anizotropiler ve homojensizlikler gibi zemin ortamının çeşitli yönlerini ele almada etkili avantaj sunar. Ancak düşük dereceli sonlu elemanların zayıf dağılım özellikleri göstermesi ve yüksek dereceli sonlu elemanların ise sahte dalgalar oluşturması gibi bazı sıkıntılardan dolayı hesaplama açısından pahalıdır (Mirhashemian, Khaji ve Shakib 2009).

1.3.2. Sonlu Eleman Analizi

Bir olayın davranışı birtakım matematiksel formüllerle ifade edilebilir. Sonlu elemanlar yöntemi analizlerini formüle dönüştürmede bazı ilkeler bulunmaktadır. Statik denge ilkesi ya da diğer adıyla doğrudan yaklaşım nispeten daha basit korunum denklemleriyle simgelenir. Castigliano teoremi ve minimum potansiyel enerji ilkesi daha karmaşık elastik yapı sistemlerine uygundur. Varyasyonel yöntemler denilen daha yüksek matematiksel ilkeler, nispeten daha karmaşık matematiksel modellerin yönettiği ve içinde türevli terimlerin olduğu olgular için sonlu eleman analizlerinin formüllerini çıkarır. Varyasyonel yöntemler Ritz yöntemi, Galerkin yöntemi, birliktelik yöntemi ve en küçük kareler yöntemi gibi çeşitlere ayrılır (Reddy 2019). Bu ilkelere göre sonlu elemanlar formülü çıkarma da şekil fonksiyonlarında yararlanılır. Tek bir sonlu elemanın genel formülü denklem (1.1)'de verilmiştir.

$$[k]\{q\}=\{Q\} \quad (1.1)$$

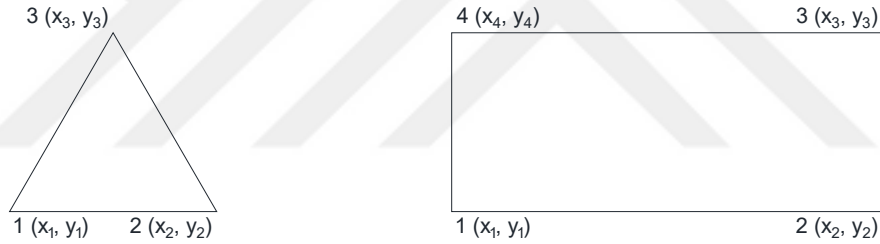
Bu denklemde $[k]$ matrisi sürekliliğin özelliklerini yansıtan matris, $\{q\}$ düğüm noktası değerlerini simgeleyen sütun matrisi ve $\{Q\}$ sürekliliğe girişi temsil eder. Gerilme analizi yapıldığında $[k]$ matrisi rijitlik matrisini, $\{q\}$ düğüm noktası yerdeğiştirme matrisini ve $\{Q\}$ düğüm noktası kuvvet vektörlerini simgeler. Bireysel sonlu elemanların formülleri çıkarıldıktan sonra, sonlu elemanlar bir araya getirilir. Böylece global formül elde edilir. Bu genel formül denklem (1.2)'de verilmiştir.

$$[K]\{r\}=\{R\} \quad (1.2)$$

Bu denklemde $[K]$ global özellik matrisi, $\{r\}$ düğüm noktası bilinmeyenlerinin global vektörünü ve $\{R\}$ düğüm noktası zorlama değişkenlerinin global vektörünü simgeler.

1.3.3. Sonlu Eleman Formülasyonu

Denklem (1.1) ile ifade edilen sonlu eleman denklemi korunum denklemine eleman denkleminin eklenmesiyle elde edilir. Eleman denklemi de şekil fonksiyonu ve geometri denkleminden türetilir. Bir elemanın denklem sayısı o elemanın toplam düğüm noktası sayısını, her eleman denkleminin bilinmeyen sayısı da o düğüm noktasının serbestlik derecesini gösterir. Şekil 1’de üçgensel ve dikdörtgensel elemanlar görülmektedir.



Şekil 1. Üçgensel ve dikdörtgensel elemanlar

Doğrusal üçgensel sonlu elemanlar için şekil fonksiyonu denklem (1.3)’de verilmiştir.

$$\phi(x,y)=a_0+a_1x+a_2y \quad (1.3)$$

Doğrusal dikdörtgensel sonlu elemanlar için şekil fonksiyonu denklem (1.4)’de verilmiştir.

$$\phi(x,y)=a_0+a_1x+a_2y+a_3xy \quad (1.4)$$

Burada a_0, a_1, a_2 ve a_3 bilinmeyenlerin katsayılarıdır. Üçgen eleman denklemleri daha sonra düğüm noktası koşullarının şekil fonksiyonuna dâhil edilir ve tekrardan yazılarak çıkarılmıştır. Bu denklemler (1.5)-(1.7)'de verilmiştir.

$$N_1(x,y) = \frac{1}{x_2y_3} [x_2y_3 - y_3x + (x_3 - x_2)y] \quad (1.5)$$

$$N_2(x,y) = \frac{1}{x_2y_3} [y_3x + x_3y] \quad (1.6)$$

$$N_3(x,y) = \frac{y}{y_3} \quad (1.7)$$

Burada x ve y koordinat sistemlerini ve N_1, N_2 ve N_3 eleman formüllerini gösterir. Bu durumun aynısı dikdörtgen elemanlar için de geçerlidir. Bu denklemler (1.8)-(1.11)'de verilmiştir.

$$N_1(r,s) = \frac{1}{4}(1-r)(1-s) \quad (1.8)$$

$$N_2(r,s) = \frac{1}{4}(1+r)(1-s) \quad (1.9)$$

$$N_3(r,s) = \frac{1}{4}(1+r)(1+s) \quad (1.10)$$

$$N_4(r,s) = \frac{1}{4}(1-r)(1+s) \quad (1.11)$$

Burada r ve s normalize koordinat sistemlerini simgeler. Korunum denklemi eleman denkleminin içine dahil edilerek özel sonlu elemanı biçimlendirir. Örneğin, 2-boyutlu düzlem gerilme için korunum denklemleri denklem (1.12) ve (1.13)'de verilmiştir.

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0 \quad (1.12)$$

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} = 0 \quad (1.13)$$

Yukarıdaki korunum denklemlerinin üçgensel bir eleman için eleman denklemine eklenmesi sonlu eleman formülünü verir. Bu denklemler (1.14)-(1.16)'da verilmiştir.

$$\{\varepsilon\} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial x} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial y} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial y} & \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \\ u_6 \end{Bmatrix} \quad (1.14)$$

$$\{\varepsilon\} = [B] \{\delta\} \quad (1.15)$$

$$\{\sigma\} = [D][B] \{\delta\} \quad (1.16)$$

Burada $\{\varepsilon\}$ eleman gerinim vektörünü, $[B]$ uzama yer değiştirme matrisini, $\{\delta\}$ eleman yer değiştirme vektörünü ve $[D]$ malzeme özellik matrisini temsil eder. Minimum enerji prensibi durumunda denklem (1.17) ve (1.18) türetilir.

$$[k] \{\delta\} = \{f\} \quad (1.17)$$

$$[k] = V^e [B]^T [D] [B] \quad (1.18)$$

Burada V^e elemanın hacmini ve $\{f\}$ düğüm noktası kuvvetleri vektörüdür.

1.3.4. Sonlu Elemanların Gelişimi

Esasen üç grup eleman vardır ve bunlar; tek boyutlu analizlerde kullanılan çizgi elemanlar, iki boyutlu analizlerde kullanılan düzlemsel elemanlar ya da diğer adıyla

membranlar ve üç boyutlu analizlerde kullanılan katı elemanlardır. Her grup altında farklı elemanların formülleri çıkarılmıştır. Örneğin, yay elemanı, çubuk elemanı ve eğilme elemanları çizgi elemanlar grubuna giren özel elemanlardır. Özel elemanlar, elemanın formülleri türetildiği özel durumlarda kullanılır. Diğer taraftan, genel elemanlar, problem türüne göre basitçe korunum denklemini dönüştürerek her durumda kullanılabilir. Üçgen elemanlar ve dikdörtgen elemanlar genel düzlemsel elemanlardır. Dört yüzlü ya da tet, beş yüzlü (üçgen prizma ya da kama olarak da denir) ve altı yüzlü ya da tuğla elemanlar genel katı elemanlardır.

1.3.4.1. Tek Boyutlu Elemanlar

Tek boyutlu elemanların en basit olanı yay elemanlardır. Yay elemanlar doğrusal elemanları modelleme de kullanılırlar. Yay elemanları birçok uygulamada başarıyla uygulanmıştır. Yay elemanların daha sonra doğrusal olmayan modeli geliştirilmiştir. Lee ve Parks (1995)'de plastik deforme olan yayları kapsasın diye artan plastisite teorisiyle çizgi yay sonlu eleman elastik-plastik modeli sundular. En sonunda çizgi yay elemanı ile tamamen plastik çatlak büyümesi formülize edilmiştir.

Yüzey çatlak analizi özellikle 3 boyutlu analizlerde hesap süresini uzatır. Bunun üstesinden kabuk ve çizgi yay elemanlardan faydalanarak gelinir. Böylece 3 boyutlu problem eşdeğer 2 boyutlu probleme indirgenir.

Yay elemanlar daha sonra eleman sınırları arası değerleri yorumlamak için şekil fonksiyonuna eklenerek çubuk elemana genişletilmiştir. Çubuk elemanlar, düzlemsel kafes kirişler, uzay kafes kirişler, kirişler, sürekli kirişler, düzlemsel çerçeveler, ızgara sistemleri ve uzay çerçeveleri gibi iskelet tipi sistemlerin analizinde kullanılır. Kafes ve kiriş yapıların analizi bu elemandan en çok faydalanan uygulamalardan biridir.

1.3.4.2. İki Boyutlu Elemanlar

Diferansiyel denklemlerle problemlerde sonlu elemanı formüle etmek için varyasyonel yöntemlerden yararlanılır. 1952 yılına kadar, yapısal analizlerde yalnızca çizgi elemanlar kullanılırdı. Çizgi elemanlar iki boyutlu analizlerde kullanıldığında gerçekçi sonuçlar vermediğinden düzlemsel elemanlara ihtiyaç artmıştır. Bu eksiklik, 1954 yılında Boeing Uçak Şirketi'nin yapısal dinamik birimi başkanı Turner'ın en-boy

oranı az olan kanatlarda eğilme ve burulma esneklik etki katsayılarını çözmek amacıyla sabit gerinimli üçgen (CST) eleman formülü başarıyla çıkarılarak giderilmiştir (Mj 1956; Perumal ve Mon 2011). CST, tek boyutlu elemanların analiziyle bulunan sonuçların deneysel verilerle uyuşmadığından geliştirilmiştir. CST'ye ilaveten dikdörtgen eleman da denge gerilme modellerine göre formüle edilmiş ve aynı anda sunulmuştur. İlk başta Turner'in geliştirdiği CST ve dikdörtgen elemanlar özellikle kesikli yapıları analiz etmek için kullanılmıştır. Daha sonra bu elemanlar biraz daha ilerletilmiş ve sürekli yapıların analizi için birtakım yöntemler önerilmiştir. Daha sonra 1958 ve 1960'ta otomatik çözen bilgisayar programlarıyla yapısal analizler için üçgen ve dikdörtgen elemanlar kullanılmıştır. Bilgisayar programı ile ilk olarak dikdörtgen sonlu elemanlarla plak eğilme analizi yapılmış ve çıkan sonuçlar dikdörtgen sonlu elemanların geçerliliğini kanıtlamıştır. Ayrıca dikdörtgen sonlu elemanlar problemi üçgen sonlu elemanlardan daha hızlı çözülür. Ancak dikdörtgen sonlu elemanların kullanılamadığı yerlerde üçgen sonlu elemanlardan yararlanılabilir. Üçgen elemanların daha başka kullanım alanları da mevcuttur. Üçgen elemanlar ilk kez levha eğilme analizinde kullanılmıştır. Bundan dolayı üçgen elemanlara levha eğilme elemanı da denilir (Perumal ve Mon 2011).

1.3.4.3. Üç Boyutlu Elemanlar

Bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle katıların, plakaların ve kabukları analiz ederken kullanılan 3 boyutlu elemanlar gibi yeni ve gelişmiş elemanlar geliştirilmiştir. 3 boyutlu elemanlar ilk kez Ohio'da düzenlenen bir konferansta formülize edilmiş ve sunulmuştur ("Proc. Matrix Methods in Structural Analysis" 1965). Bildiride katı mekaniğinde 3-boyutlu katı elemanların örnek uygulamaları da takdim edilmiştir. Konferansta formülü türetilen ve takdim edilen yeni 3-boyutlu elemanlardan biri on düğüm noktalı katı dört yüzlü elemandır. O tarihten itibaren, 3 boyutlu elemanlar akışkan akışının analiz edilmesinde (1969'da sekiz düğüm noktalı izoparametrik elemanlar yardımıyla) ve üç boyutlu katıların statik analizinde kullanılmıştır.

Altı yüzlü (tuğla), dört yüzlü (tet) ve beş yüzlü (üçgen prizma veya kama) olacak şekilde 3 temel katı eleman mevcuttur. Altı yüzlü elemanlar genellikle 3 boyutlu katı cisimleri modellerken kullanılır. İnce basınç elektriği altı yüzlü sonlu eleman da denilen özel altı yüzlü eleman, parçalı dağıtılmış basınç elektriği sensörler

ve alıştırıcıların tabakalaşmasıyla elastik "akıllı" kıtaların tasarım analizinde kullanılabilir (Tzou, Tseng ve Bahrami 1994). (2011)' de altı yüzlü elemanlar masaüstü bilgisayarlarda gerçek zamanlı olacak şekilde elastik deformasyonları simüle etmek amacıyla kullanılmıştır. Dört yüzlü elemanlar genellikle ağ oluşturma ve uyarlanabilir ağ iyileştirme şekillerinde kullanılır. Beş yüzlü elemanlar daha kalın kabuk analizinde kullanılır. Beş yüzlü elemanlar ayrıca darbe yüklemelerinin neden olduğu kompozitlerde çatlakların ve tabaka içi tabaka ayrışmasını, yayılmasını ve etkileşimini araştırmada kullanılır (Moharnmadi, Owen ve Peric 1998). Bu katı elemanlar, sonuçlar gerçeğe daha yakın olsun diye ek düğüm noktaları ile hassaslaştırılır (Perumal ve Mon 2011).

1.3.5. Sonlu Elemanlar Modeli Sınır şartları

Doğrudan modellemede, zeminin büyük bir kısmı yapının tepkisinde dalga yayılımı etkisini dışarıda tutmak için zemin-yapı etkileşimi modelinde dahil edilmelidir. Ancak, zemin boyutunun artışı daha yüksek hesaplama zamanıyla sonuçlanan sonlu elemanlar sayısının artışına neden olur. Buna alternatif olarak daha küçük kısımlı zemin, saçılan dalgalar sınırlar arasından geçtiğinde yansımayacak şekilde düzgün yapay sınır koşullarıyla modellenenebilir (Bapir ve diğ. 2023). Bu amaçla ölçekli sınır sonlu elemanlar, esneklikten arındırılmış sonlu elemanlar, viskoz sınır şartları, tutarlı sınırlar, serbest sınırlar, karma modelleme, sınır elemanlar, sonsuz elemanlar yöntemi, eğri sınır koşulları, mükemmel uyumlu katmanlar gibi sınır şartlarından yararlanılabilir.

1.3.5.1. lekli Sınır Sonlu Eleman Yöntemi

lekli sınır sonlu eleman yöntemi ya da diğer adıyla sonsuz küçük hücreli sonlu elemanlar yöntemi doğrusal kısmi diferansiyel denklemleri yarı analitik olarak çözmek için kullanılan genel bir yöntemdir. Sınırsız ve sınırlı ortamlar için hiperbolik, parabolik ve eliptik problemlere uygulanır. lekli sınır sonlu elemanlar yöntemi, sınırın sadece yüzey sonlu elemanları ile ayrıklaştırılmasını gerektirir. Temel çözüme gerek yoktur (Song ve Wolf 1998; Bazyar ve Song 2020; Hirshikesh ve diğ. 2019).

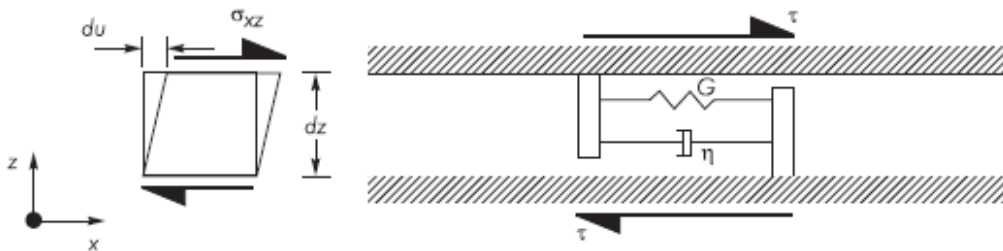
1.3.5.1.1. Esneklikten Arındırılmış Ölçekli Sınır Sonlu Elemanlar Yöntemi

Yarı analitik ölçekli sınır sonlu elemanlara dâhil edilmiş bir alt yöntemidir. Ölçekli sınır sonlu elemanlar yöntemi esnek sonlu elemanlara bölme yeteneği ve yüksek hassasiyetli olmasıyla bilinir. Esneklikten arındırılmış fikri ölçekli sınır sonlu elemanlara dâhil edilmiştir. Böylece viskoz-yay yapay sınırı, karmaşık zemin-yapı dinamik etkileşimli modellerin sonlu elemanlara bölme ve doğrusalsızlığı ile ilgili sorunları çözebilen dinamik bir çözüm şeması önermek için yeni bir esneklikten arındırılmış S-eleman formülasyonu ile birleştirilmiştir (Jia-Long, Ding-Hao ve Gang 2022).

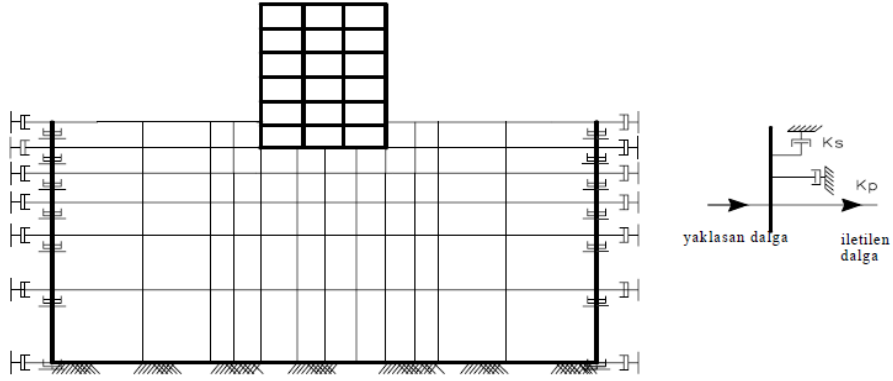
1.3.5.2. Viskoz Sınır Şartı

Bu sınır şartında sınıra çarpan deprem dalgaların tekrar yansımalarını sınırdan geçirecek şekilde önleyip analizin yanlış sonuçlar üretmemesini sağlar. Ancak bunun da doğru bir şekilde çalışması için gelen dalgalar çok küçük açılarda gelmesi gerekir. Bunu sağlamak için de sınırlar yapıdan mümkün olduğunca uzakta kesilmelidir. Fakat sadece cisim dalgalarında işe yarar (Lysmer ve Kuhlemeyer 1969; Garip ve diğ. 2007; Lysmer ve diğ. 1975). Viskoz sınır şartında zemin lineer davranış göstermeli ve izotrop olmalıdır (Kramer 1996; Özel 2019).

Analizlerde viskoz sönümler kullanılırken zemin Kelvin-Voigt katısı şeklinde modellenir. Kelvin-Voigt katısında kayma deformasyonu direnci elastik kısım ile viskoz kısmın toplamına eşittir. Kelvin-Voigt katısının bir örneği şekil 2’de görülmektedir (Kramer 1996). Şekil 3’te viskoz sınır şartı görülmektedir.



Şekil 2. Kelvin-Voigt katısının şematik gösterimi (Kramer 1996)



Şekil 3. Viskoz sınır şartı (Çağlar, Garip ve Yaman 2005)

Zemin sınırına viskoz sınır eklendiğinde sistemin hareket denkleminde özel sönüm matrisi de eklenmiş olur. Hareket denkleminin son hali denklem (1.19)'da verilmiştir.

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [C]\{\dot{u}(t)\} + [V]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = \{R(t)\} \quad (1.19)$$

Bu denklemde $[M]$, $[C]$ ve $[K]$ sırasıyla kütle, sönüm ve rijitlik matrislerin, temsil eder. $\{\ddot{u}(t)\}$, $\{\dot{u}(t)\}$ ve $\{u(t)\}$ ise sırasıyla ivme, hız ve deplasman vektörünü temsil eder. $\{R(t)\}$ ise atalet kuvvetini temsil eder.

Viskoz sınır şartında gerekli olan denklemler aşağıda verilmiştir:

Kayma dalgası hızının ve basınç dalgasının denklemleri denklem (1.20)-(1.22)'de verilmiştir.

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (1.20)$$

$$V_p = \frac{V_s}{s} \quad (1.21)$$

$$s = \sqrt{\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}} \quad (1.22)$$

Bu denklemlerde G kayma modülü, ρ zeminin birim hacim kütlesi, ν poisson oranı, s elastik sabit V_s kayma dalgası ve V_p ise basınç dalgasıdır.

Viskoz sınır şartını modellerken efektif sönüm ve efektif rijitlik değerleri girilir. Bunların denklemleri denklem (1.23)-(1.26)'da verilmiştir.

Kayma dalgası için:

$$K_1 = K_2 = \frac{2G}{R} \sum_{i=1}^I A_i \quad (1.23)$$

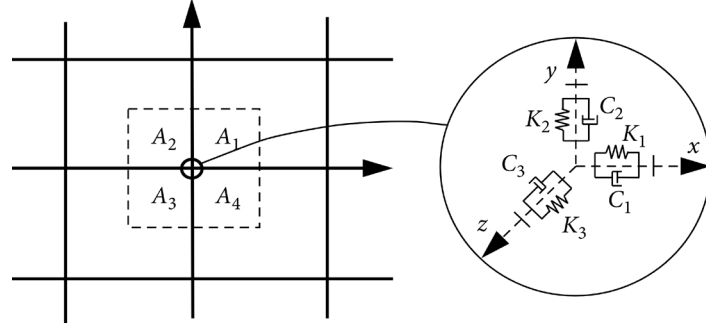
$$C_1 = C_2 = \rho V_s \sum_{i=1}^I A_i \quad (1.24)$$

Basınç dalgası için:

$$K_3 = \frac{4G}{R} \sum_{i=1}^I A_i \quad (1.25)$$

$$C_3 = \rho V_p \sum_{i=1}^I A_i \quad (1.26)$$

Bu denklemlerde K efektif rijitliği, C efektif sönümü, R yakın bölge yapısının geometrik merkezi ile yapay sınır noktasının bulunduğu sınır çizgisi veya yüzey arasındaki mesafedir. $\sum A_i$ yapay sınırdaki bulunan bir düğüm noktasının temsil ettiği alandır. Şekil 4'teki durum için $I=4$ tür (Xie, Chi ve Wang 2020).



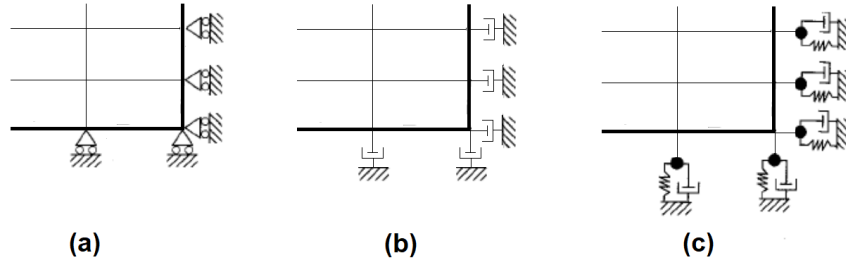
Şekil 4. Viskoz sınır şartı modellemesi (Xie, Chi ve Wang 2020)

1.3.5.3. Tutarlı Sınırlar

Her türlü açıda gelen ve her frekanstaki tüm deprem dalgalarını emebilen sınırlardır. Sınır integral denklemlerinden ya da sınır elemanlar yönteminden bulunan frekansa göre değişen rijitlik matrisleriyle gösterilirler. Tüm yapı-zemin etkileşimi problemlerinde kullanılabilirler (Kramer 1996; Özel 2019).

1.3.5.4. Serbest Sınırlar

Zemin sınırlarına atanmış herhangi bir koşul yoktur (Kramer 1996) Şekil 5'te sonlu elemanlar için atanabilecek bazı sınır şartlarının görselleri görülmektedir.



Şekil 5. Sonlu elemanlar için sınır şartları a) ana sınırlar b) yerel sınırlar c) tutarlı sınırlar (Kramer 1996).

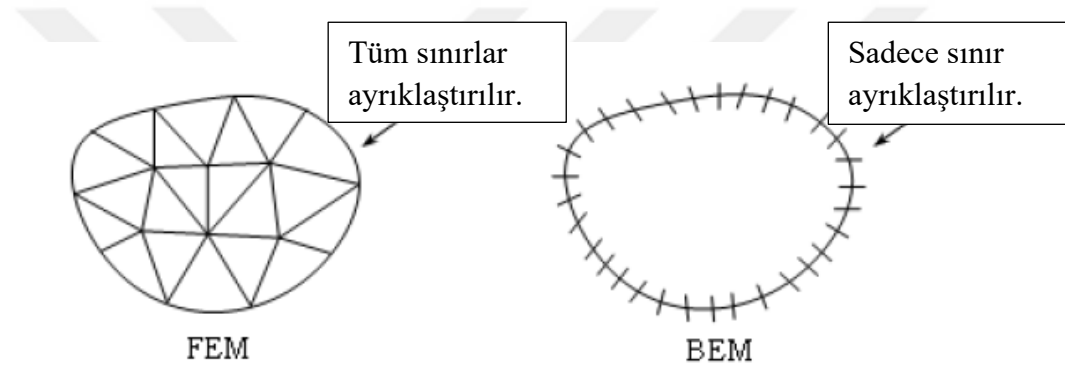
1.3.5.5. Karma Modelleme

Karma modelleme yaklaşımı katmanlı zemin ortamlarında kullanılmak üzere genişletilmiştir. Bu yaklaşım, tüm yapı-zemin sistemini, yapı ve onu çevreleyen zeminin bir kısmından oluşan ve sonlu elemanlar yöntemiyle modellenen bir yakın alan ve bir empedans modeliyle temsil edilen yakın alandan uzaklaşan enerjiden

sorumlu bir uzak alan olarak ikiye ayırmaktadır. Yarı sonsuz uzak alan bölgesini simüle etmek için farklı katmanlı zemin sistemlerine uygun iki analitik yöntem kullanılmaktadır (Tzong ve Penzien 1983).

1.3.5.6. Sınır Elemanlar

Sınır elemanların metodu etkili bir araç olarak mühendislik problemlerinde çalkalama etkisini belirtmede kullanılır. Bu yaklaşımı kullanarak bütün alanın yerine sadece sınırlar ayrıklaştırılır, böylece hesaplama süresi ve maliyet sonlu elemanlar gibi geleneksel metotlara kıyasla büyük ölçüde azalır (Ghalandari ve diğ. 2019). Şekil 6’da sonlu elemanlar ve sınır elemanlar bir arada olacak şekilde gösterilmiştir.



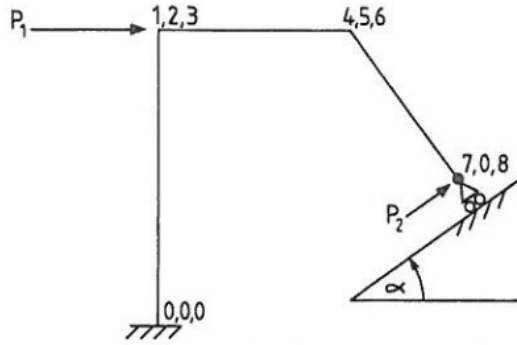
Şekil 6. Sonlu Eleman Modeli ve Sınır Eleman Modelinin karşılaştırılması (Tonyali ve Ates 2018)

1.3.5.7. Sonsuz Elemanlar Yöntemi

Sonsuz elemanlar yöntemi ilgili alanı sonsuz uzunlukta bölümlere ayırır. Sonlu elemanlar yönteminin bir modifikasyonudur. Sonlu bir destek üzerinde polinom ifadelerle yaklaşıtırlan sonlu bir elemanın aksine, sonsuz elemanın sınırsız uzunluğu, asimptottaki alanın değerlendirilmesine izin veren fonksiyonlarla donatılmıştır. Fonksiyonların ve enterpolasyon noktalarının sayısı, elemanın sonsuz yöndeki doğruluğunu tanımlar. Yöntem genellikle akustik problemleri çözmede kullanılır ve Sommerfeld’in akustik dalgaların geri dönmemesi ve uzak alandaki basınç dalgalarının yayılması koşuluna uyulmasını sağlar (Gerdes 1998; Autrique ve Magoulès 2006).

1.3.5.8. Eğri Sınır Koşulları

Bu sınır koşulları arayüzündeki düğüm noktalarının serbestlik yönleri global Kartezyen koordinatlardan farklı olduğu yapılar için uygundur. Örnek olarak krikto yapılarının arayüz düğüm noktalarının serbestlik yönleri Kartezyen koordinatlar için uygun değildir. Bu yüzden zemin-krikto etkileşiminde eğri sınır koşulları sonlu elemanlarla uyumlu şekilde modellenir. Bu sınır koşulunda iki aşamalı yaklaşım kullanılır. Bunlar, arayüz düğüm noktalarına ek serbestlik getirilmesi ve arayüz düğüm noktalarındaki serbestlik yönlerinin önerilen arayüz yönlerine paralel ve dik olacak şekilde dönüştürülmesidir. Bu noktada, arayüz düğüm noktalarındaki eleman yer değiştirmeleri arayüz yönlerinde hesaplanır. Dolayısıyla, gerilmeler hesaplanmadan önce bu yer değiştirmelerin global Kartezyen yönde yeniden dönüştürülmesi gerekir. Buna karşılık, Kartezyen yöndeki gerilme yeniden dağıtım işlemi sırasında arayüz düğüm noktalarında üretilen düzeltilmiş düğüm kuvvetleri, yeni iterasyon sürecine karşılık gelen yeni yer değiştirmeler hesaplanmadan önce arayüz yönlerine geri dönüştürülmelidir (Phuor ve diğ. 2021; Griffiths 1990). Şekil 7’de eğri sınır koşulu sembolik olarak gösterilmiştir.



Şekil 7. Eğri sınır koşulu (Griffiths 1990)

1.3.5.9. Mükemmel Uyumlu Katman

Mükemmel uyumlu katman, doğrusal dalga denklemleri için, teğetsel olmayan tüm geliş açılarının ve sıfır olmayan tüm frekansların giden dalgalarını neredeyse mükemmel bir şekilde emen fiziksel olmayan bir emici katman modelidir. Basit olmasına rağmen ayırıklaştırmada ve kesmede hatalarının olması bu sınır şartının dezavantajıdır (Basu ve Chopra 2004; Berenger 1994).

1.3.5.9.1. Mükemmel Uyumlu Ayrık Katman

Yerel emici sınır koşullarının ve mükemmel uyumlu katmanın avantajlarını birleştirir. Asıl ismi sürekli kesir emici sınır koşullarıdır. Yerel emici sınır koşulun doğruluğunu ve mükemmel uyumlu katmanın esnekliğini dikkate alır. Gerçek ve hayali uzunlukların bir arada bulunması, mükemmel uyumlu ayrık katmanın hem yayılan hem de yayılmayan dalgaları absorbe etmesini sağlar. Bu sınır şartının kilit unsurlarından biri de ayırıklaştırma hatasını ortadan kaldırmak için orta nokta entegrasyon kuralını kullanmasıdır. Yöntemin gücü birçok çalışmayla kanıtlanmıştır (Thirunavukkarasu ve Guddati 2011; Guddati ve Lim 2006; Savadatti ve Guddati 2010).

1.3.5.9.2. Analitik Dalga Boylarına Sahip Mükemmel Uyumlu Ayrık Katmanlar

Mükemmel Uyumlu Ayrık Katmanın geliştirilmiş bir versiyonudur. İlk kez 2018’de Van Nguyen ve Kim tarafından yapılmıştır (Nguyen ve Kim 2018). Yöntem, parametreleri belirlemek için farklı bir strateji ile frekans alanında uygulanmış ve yöntemin etkinliği ve doğruluğu gösterilmiştir; ayrıca, hesaplama çabası önemli ölçüde azaltılmıştır. Ancak yöntem, zaman alanında problemi çözmek için, hayali uzunlukların varlığı nedeniyle hala bazı sorunlar vardır. Gerçek sayılara dayalı bir doğrudan entegrasyon algoritmasında sınır koşullarıyla başa çıkma prosedürü de açık değildir. Bunun için 2020’de Van Nguyen ve Kim bu yöntemi geliştirerek doğrulanmış ve açık bir sonlu elemanlar algoritması ile zemin-yapı etkileşimi analizi için zaman alanına uygulamıştır (Van Nguyen ve Kim 2020).

1.3.6. Zemin-Yapı Etkileşiminde Kullanılabilecek Modeller

Zemin-yapı etkileşiminin dikkate alınmasının asıl sebebi, zeminin üstyapı da etkilerini hesaba katarak daha gerçekçi sonuçlar almaktır. Ancak zeminin kendisi heterojen ve doğrusal olmayan olduğu için bu pek kolay değildir. Ayrıca laboratuvarların hepsi teknik olarak aynı olmadığından zemin özellikleri laboratuvarlardan laboratuvara farklılık gösterir. Zemin özellikleri tespit etmek bu kadar güç olduğu için zemin modellemeleri zeminin fiziksel ve mekanik özelliklerin basitleştirilmiş haliyle yapılır (Özgan 2007). Bu modeller üçe ayrılır:

1.3.6.1. Zemin Modelleri

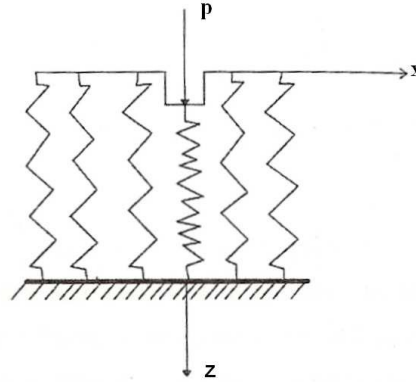
1.3.6.1.1. Bir Parametrelili Zemin Modelleri

Zeminin doğrusal davranışını ilk araştıran Winklerdir. Bu modelde zemin birbirine sonsuz yakın ve hepsi birbirinden bağımsız yaylardan oluşur. Yaylar birbirinden bağımsız olduklarından, bir yay şekil değiştirdiğinde komşu yayı etkilemez. Böylece süreksiz ortam modellenmiş olur. Winkler modelde taban basıncı denklem (1.27)'de verilmiştir.

$$p(x,y) = kw(x,y) \quad (1.27)$$

Burada k zemin yatak katsayısıdır. Yani zemin bir birimlik düşey yerdeğiştirme yaptığında birim genişlikte birim alandaki tepki kuvvetidir.

Winkler modelinin olumsuz tarafları yayların birbirlerini etkilememesi, zeminin yatak katsayısını elde etmede yetersiz kalması ve yayılı yük durumunda sonuçların gerçek dışı olmasıdır (Özgan 2000). Şekil 8'de üzerine tekil yük yüklenmiş bir Winkler modeli gösterilmiştir.



Şekil 8. Üzerine tekil yük yüklenmiş Winkler Modeli (Mamuk 2010)

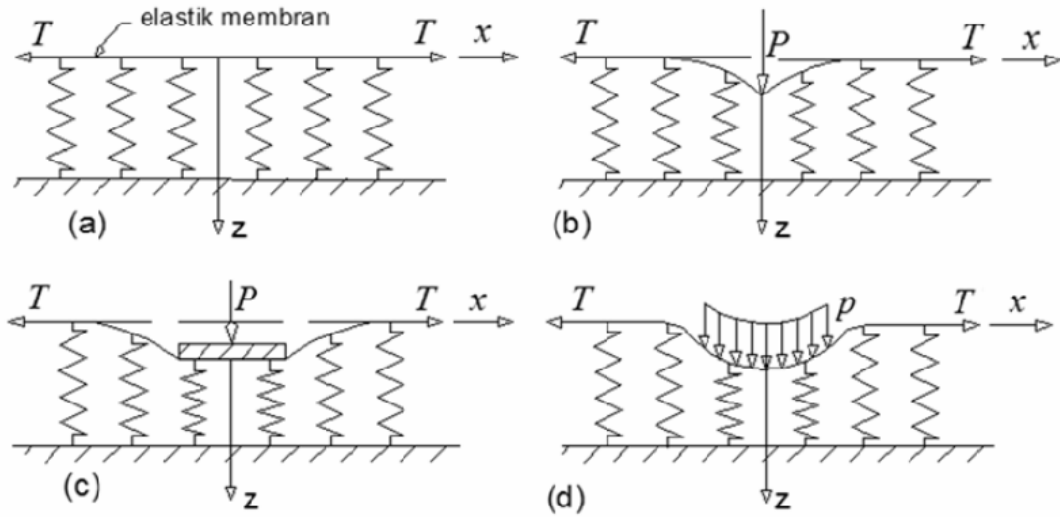
1.3.6.1.2. İki Parametrelili Zemin Modelleri

Winkler modelinin bazı eksiklikleri görülmesinden dolayı araştırmacılar başka alternatif yöntemler bulmuşlardır. Bu modeller şu şekildedir:

1.3.6.1.2.1. Filonenko-Borodich Modeli

Filonenko-Borodich Modeli winkler yaylarının üzerinde bir elastik zar tabakasını olduğunu varsayarak sürekli ortamı modellemiştir. Bu yaklaşımda yaylar yüzeyin gerilmelerinden etkilenecektir (Filonenko-Borodich 1940). Filonenko-Borodich modelinin sembolik bir örneği Şekil 9’da verilmiştir. Bu modelde zeminin tepki fonksiyonu denklem (1.28)’de verilmiştir.

$$q(x,y) = k_s w(x,y) - T \frac{d^2 w(x,y)}{d(x,y)^2} \quad (1.28)$$



Şekil 9. Filonenko-Borodich Modeli (Mamuk 2010)

Burada k zemin yatak katsayısı, T membran kuvvetini, q basınç gerilmesini ve w düşey sehimini temsil eder.

1.3.6.1.2.2. Hetenyi Modeli

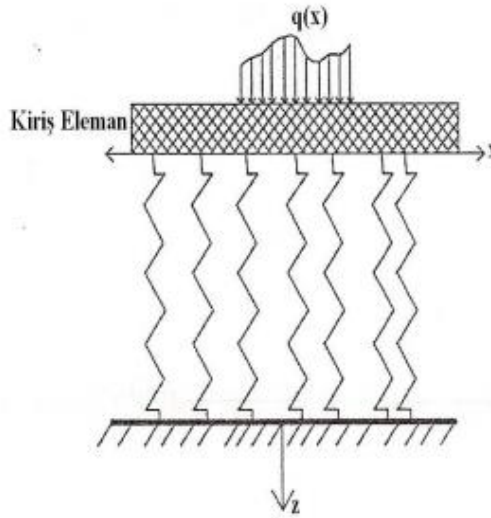
Bu modelde birbirinden bağımsız yaylar arası etkileşim kirişle sağlanır (Hetényi ve Hetbenyi 1946). Hetenyi modelinin sembolik bir örneği Şekil 1.10’da verilmiştir. Bu modelde zeminin tepki fonksiyonu denklem (1.29)’da verilmiştir.

$$q(x,y) = k_s w(x,y) - D \frac{d^4 w(x,y)}{dx^4} \quad (1.29)$$

Burada D plağın eğilme rijitliğidir. Formülü denklem (1.30)'da verilmiştir.

$$D = \frac{E_p h^3}{12(1 - \nu_p^2)} \quad (1.30)$$

Bu denklemde E_p Elastisite Modülü, ν_p ise poisson oranıdır.



Şekil 10. Hetenyi Modeli (Mamuk 2010)

Hetenyi modeli iki boyutlu problemlerin haricinde üç boyutlu problemler için de kullanılabilir. Ancak bu durumda yaylar üzerinde kiriş değil de denklem (1.30) ile bulunan D esneklik rijitliğine sahip elastik bir plaka bulunur (Dhadse, Ramtekkar ve Bhatt 2021).

1.3.6.1.2.3. Pasternak Modeli

Bu modelde Pasternak (1954) tarafından yaylar arası kesme etkileşimi olduğu kabul edilmiştir. Yayların üzerine sıkıştırılamaz, izotropik kayma tabakası eklenir ve böylece düşey elemanlar enine yönde deforme olur. Kayma tabakası $G_x = G_y = G$ ile x-y düzleminde düşey kayma gerilmeleri ' τ ' için formüller denklem (1.31) ve (1.32)'de verilmiştir.

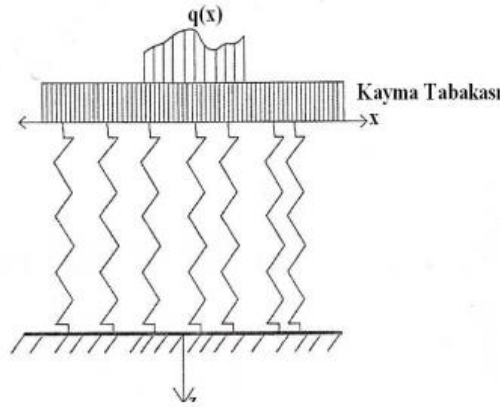
$$\tau_{xz} = G\gamma_{xz} = G \frac{dw}{dx} \quad (1.31)$$

$$\tau_{yz} = G\gamma_{yz} = G \frac{dw}{dy} \quad (1.32)$$

Bu denklemde γ_{xz} ve γ_{yz} zeminin kayma gerilmeleridir. Zemin tepki fonksiyonu denklem (1.33)'de verilmiştir.

$$q(x,y) = k_s w(x,y) - GH \nabla^2 w(x,y) \quad (1.33)$$

Bu denklemde q basınç gerilmesi, k_s yay rijitliği, w deformasyon ve GH kayma rijitliğidir. Pasternak modelinin sembolik bir örneği Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 11. Pasternak Modeli (Mamuk 2010)

1.3.6.1.2.4. Vlasov Modeli

Vlasov modelini diğerlerinden ayıran en önemli özelliği zemini kolon şeklinde modellemesidir. Winkler modelinin aksine bu modelde kayma şekil değiştirmeleri dikkate alınır. Bununla birlikte bu yöntemle taban basıncı bulunabilir (Teodoru ve Muşat 2010; Vlasov 1966). Bu modelin zemin tepki fonksiyonu denklem (1.34)'de verilmiştir.

$$p(x,y) = kw(x,y) - 2t \nabla^2 w(x,y) \quad (1.34)$$

Bu zemin tepki fonksiyonlarındaki Laplace operatörü ve denklem (1.34)'teki k ve t parametreleri denklem (1.35)-(1.37)'de verilmiştir.

$$\nabla^2 = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \quad (1.35)$$

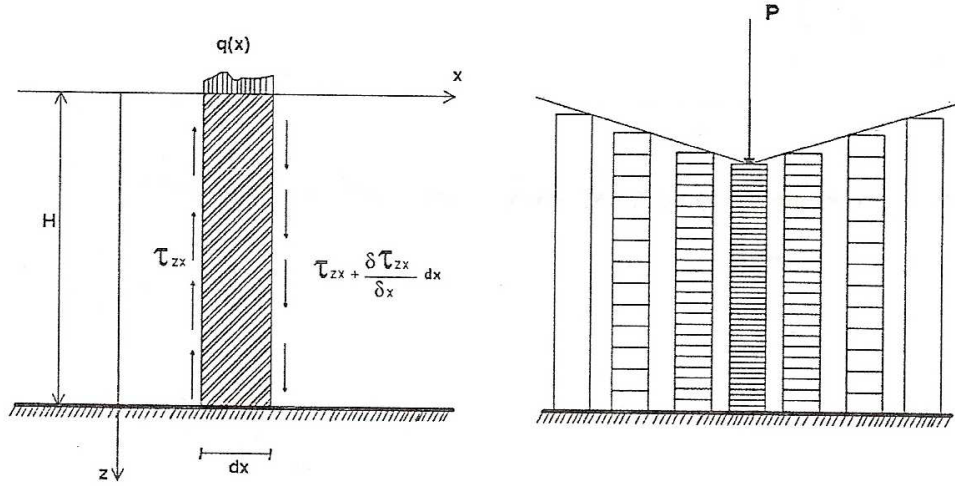
$$k = \frac{E}{(1-\nu_0)^2} \int_0^H \psi^2(z) dz \quad (1.36)$$

$$2t = \frac{E}{(1+\nu_0)^2} \int_0^H \psi^2(z) dz \quad (1.37)$$

Burada ψ plağın radyal yer değiştirmesi, ρ plak merkezinden yarıçapı doğrultusundaki uzaklık, ∇^2 Laplace operatörü, E zemin elastisite modülü, ν_0 poisson oranı, H sıkışabilir tabaka kalınlığı, k ve t zemin parametreleridir. $\psi(z)$ fonksiyonu $w(x,z)$ fonksiyonunun z yönünden yaklaşımıdır ve denklem (1.38)'de verilmiştir.

$$\psi(z) = \frac{\sinh\left(\gamma\left(\frac{H-z}{R}\right)\right)}{\sinh\left(\gamma\left(\frac{H}{R}\right)\right)} \quad (1.38)$$

Vlasov zemin modeli parametreleri, zemin elastik değerlerine ve sıkışmış zeminin tabaka kalınlığına bağlıdır. Bu kadar formülden dolayı çözümü diğerlerinden daha zordur. Vlasov modelinin sembolik bir örneği Şekil 12'de verilmiştir.



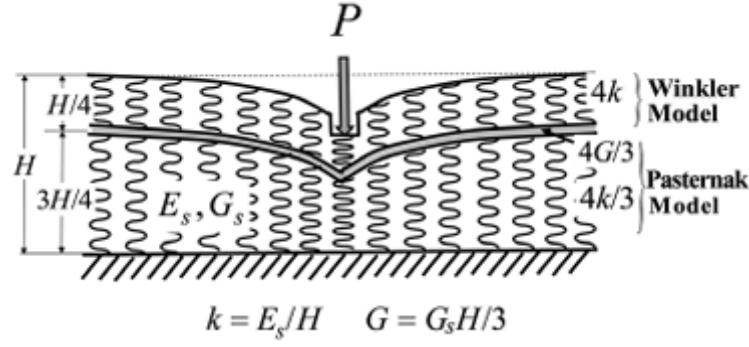
Şekil 12. Vlasov Modeli (Mamuk 2010)

1.3.6.1.2.5. Reissner Modeli

Reissner zamana bağlı davranışı hesaba katarak lineer elastik izotropik süreklilik için temel gerilme-şekil değiştirme bağıntılarını basitleştirerek yeni bir mekanik model önerdi. Eğer zamana bağlı davranışlar dahil edilmezse, model denklem (1.39) ile açıklanır. Model $H/4$ derinliğine sahip Winkler modelinden, $3H/4$ derinliğine sahip Pasternak modelinden oluşur. Bu modelin zemin tepki fonksiyonu denklem (1.39)'da verilmiştir.

$$p - \frac{G}{4k} \nabla^2 p = ky - G \nabla^2 w \quad (1.39)$$

Bu denklemde y düşey deformasyon, p düşey yük, $k=Es/H$ yatak katsayısı, $G=Gs.H/3$ zeminin kayma rijitliği, H zemin tabakasının kalınlığı, Es zeminin elastisite modülü, Gs zeminin kayma modülüdür. Reissner modelinin şematik bir örneği Şekil 13'te verilmiştir (Pandey ve diğ. 2023; Tanahashi ve Suzuki 2020).



Şekil 13. Reissner modeli (Tanahashi ve Suzuki 2020)

İki parametrelili zemin modellerin olumsuz yönleri şunlardır:

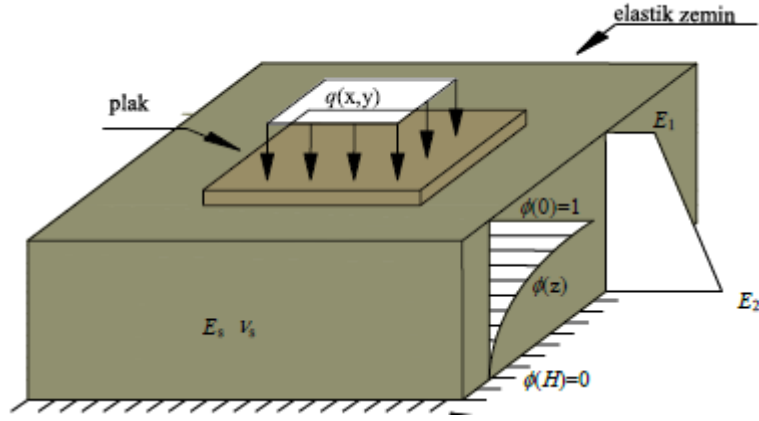
- Dinamik durumlar dikkate alınmaz.
- Sadece düşey yönde çalışırlar.
- Zemindeki değişiklik görmezden gelinir. Zemin homojen yarı sonsuz ya da sert kayaya oturduğunda lineer davranışını simgeler.
- Modelin değişkenleri gerçek dışıdır.

1.3.6.1.3. Üç Parametrelili Zemin Modelleri

Yapılar emniyetli bir şekilde tasarlanırken zemin özellikleri de bilinmelidir. Bu yüzden araştırmacılar, Vlasov modelinde zemin özelliklerini araştırmışlardır. Bunun için de zeminin elastik özelliklerinden yararlanmışlar ve bazı yöntemler geliştirmişlerdir. En bilinen model Vallabhan ve Das'ın zeminin parametrelerine, derinliğine, malzeme özelliklerine, yapının geometrisine ve yüklemesine bağlı olan Geliştirilmiş Vlasov modelidir (Vallabhan ve Das 1988; Girija Vallabhan ve Das 1991).

1.3.6.1.3.1. Geliştirilmiş Vlasov Modeli

Geliştirilmiş Vlasov modelinin Şekil 14'te sembolik bir örneği görülmektedir.



Şekil 14. Elastik zemine oturan bir plak şeması (Teodoru ve Muşat 2010)

Bu modelde alt zeminin etkisi denklem (1.40)'da verilmiştir.

$$q_z = -2t\nabla^2 w + kw \quad (1.40)$$

Bu denklem de zemin yatak katsayısı k denklem (1.41)'de verilmiştir.

$$k = \int_0^H \frac{E_s(1-v_s)}{(1+v_s)(1-2v_s)} \left(\frac{\partial \phi(z)}{\partial z} \right)^2 dz \quad (1.41)$$

Bu denklemde H zeminin derinliğini, v poisson oranını gösterir. (1.40) denklemindeki zeminin kayma parametresi 2t ise denklem (1.42)'de verilmiştir.

$$2t = \int_0^H G_s \phi(z)^2 dz \quad (1.42)$$

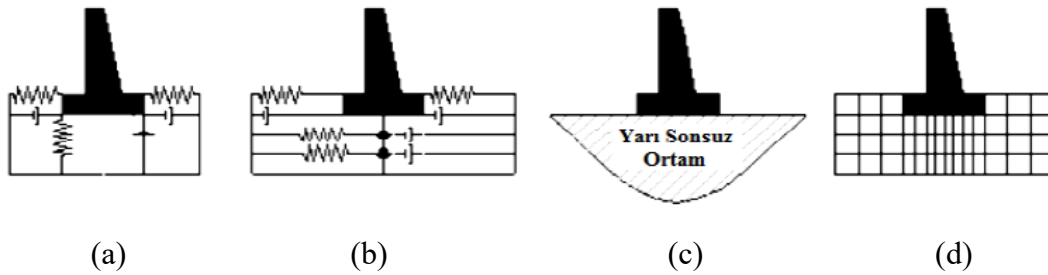
Bu denklemdeki G_s ise zeminin kayma modülünü gösterir. (1.40) denklemindeki 2t sıfıra eşit olduğunda Winkler tipi elastik zemine oturan plak tepkisi elde edilir. Zeminin düşey deplasmanını belirten $\phi(z)$ fonksiyonu denklem (1.43)'de verilmiştir.

$$\emptyset(z) = \frac{\sinh(\gamma(\frac{1-z}{H}))}{\sinh(\gamma)} \quad (1.43)$$

Zemin yüzey parametresi γ boyutsuz katsayısı denklem (1.44)'de verilmiştir.

$$\left(\frac{\gamma}{H}\right)^2 = \frac{(1-2\nu_s) \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} (\nabla w)^2 dx dy}{2(1-\nu_s) \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} w^2 dx dy} \quad (1.44)$$

$z = 0$ için $\emptyset(z) = 1$ ve $z = H$ için $\emptyset(z) = 0$ 'dır. Bu şu demektir H derinliğinde zeminin düşey yerdeğiştirmesi sıfırken, yüzeyde plağın düşey yerdeğiştirmesi kadardır. (1.41) ve (1.42) denklemleri malzemeye, zemin derinliğine $\emptyset(z)$ fonksiyonuna, $\emptyset(z)$ fonksiyonu zemin derinliği ve γ 'ya, γ değeri de plak yerdeğiştirmesine, zemin poisson oranına ve zemin derinliğine bağıldır. Şekil 15'te zemini modellemede kullanılabilecek bazı yöntemler şematik olarak verilmiştir.

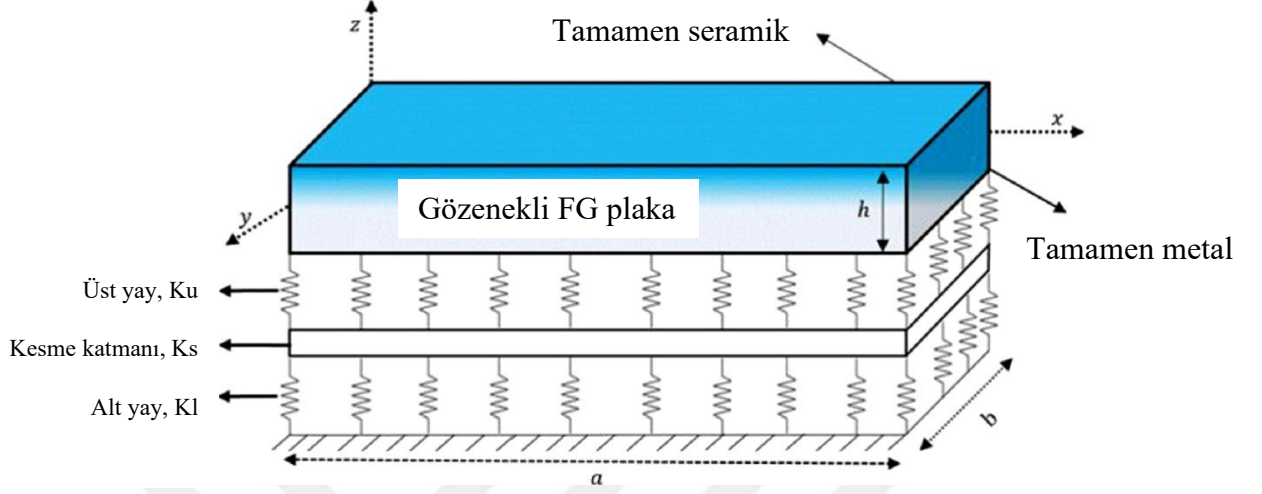


Şekil 15. Zemin modelleme şekilleri (a) eşdeğer yaylarla modellenmesi (b) kayma kırışı olarak modellenmesi (c) yarı sonsuz ortam olarak idealleştirilmesi (d) sonlu elemanlarla modellenmesi (Ala 2007)

1.3.6.1.3.2. Kerr Modeli

Kerr temel modeli kesme katmanından (K_s rijitlikli), yayılı yaylarla modellenen birbirinden bağımsız üst (K_U rijitlikli) ve alt (K_1 rijitlikli) elastik katmanlardan oluşan üç parametrelidir (Shahsavari ve diğ. 2018; Kneifati 1985; Kerr 1965). Şekil 16'da Kerr temel model örneğı görölmektedir. Kerr temel modelinin yayılı tepkisi denklem (1.45)'de verilmiştir.

$$q_{kerr} - \left(\frac{K_S}{K_1 + K_U} \right) \nabla^2 q_{kerr} = \left(\frac{K_1 K_U}{K_1 + K_U} \right) (\omega_b + \omega_s + g\varphi_z) - \left(\frac{K_S K_U}{K_1 + K_U} \right) \nabla^2 (\omega_b + \omega_s + g\varphi_z) \quad (1.45)$$



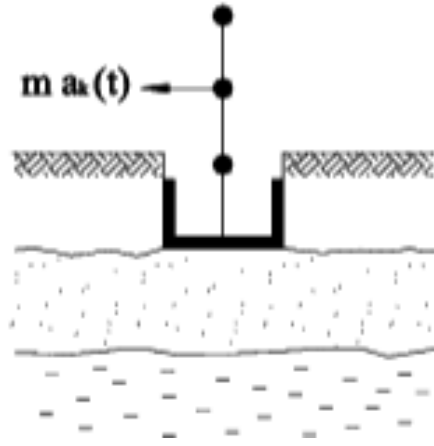
Şekil 16. Kerr temel modeli örneği (Shahsavari ve diğ. 2018)

1.3.7. Yapı-Zemin Etkileşim Türleri

1.3.7.1. Eylemsizlik Etkileşimi

Temel seviyesindeki yer değiştirmeleri, dönmeleri ve dinamik rijitlikleri temelin gömülmesine bağlı olarak titreşim ve yapısal kütlelerin atalet tepkisi ve temele geri aktarılan yüklerle kontrol edilir (Ahmadi 2019). Temel hareketi üzerindeki bu etkileşime eylemsizlik etkileşimi denir (Zogh, Motamed ve Ryan 2021; Sotiriadis ve diğ. 2020). Yüksek katlı yapılarda daha belirgindir (Scarfone, Morigi ve Conti 2020).

Eylemsizlik etkileşimi yapıda periyot uzamasına ve fazladan yer değiştirmeye neden olur. Esnek temelli yapıya uygulanan sismik yükleme için faydalı olabilir. Ancak elastik tepki spektrumuna ve yapının dinamik özelliklerine bağlı olarak belli sismik ve zemin koşulları kapsamında zararlı da olabilmektedir (Karakostas ve diğ. 2022). Kazık temellerden çok sığ temeller için uygundur (Forcellini 2022). Şekil 17’de ataletsel etkileşim görsel olarak görülmektedir.

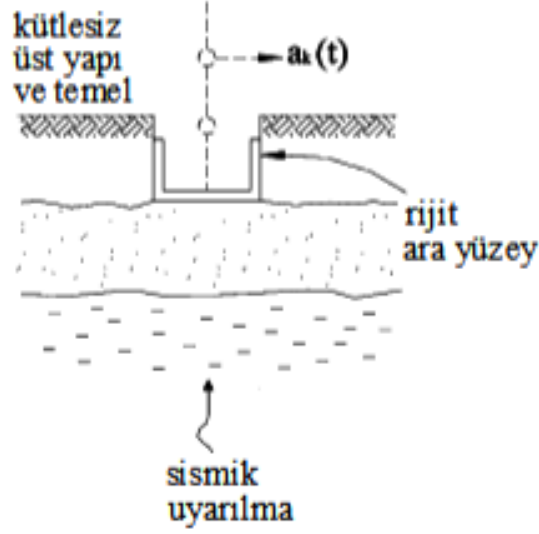


Şekil 17. Eylemsizlik Etkileşimi (Pitilakis 2006)

1.3.7.2. Kinematik Etkileşim

Kinematik etkileşim yüzeye varan deprem dalgalarının çoğunlukla zemine göre rijit kazıklı radyeli ya da sadece radye temele sahip bir yapıya rastladığında temel zeminine göre empedans farkının yüksek olmasından dolayı geçirdiği yansıma ya da kırılmadır (Siyahi, Çetin ve Bilge 2013). Temel girdi hareketleri nedeniyle yapıda ve temelde oluşan atalet kuvvetlerinden kaynaklanan zemin-temel-yapı sisteminin dinamik tepkisidir. Sadece yatay serbest alan hareketlerinin mevcut olduğu yüzey temellerinin aksine, gömülü temellerin temel girdi hareketleri yatay öteleme ve dönme sallanmasını içerir. Sallanma bileşeni, özellikle yüksek yapılar için yapıların elastik olmayan talepleri üzerinde önemli etkilere sahip olabilir (Ahmadi 2019).

Kinematik etkileşim narin yapılarda önemli olabilecek temeli döndüren taban döşemesinin yer değiştirmesinden sorumludur. Kazık temellerde düşey eksenel yükün değişimi büyük ölçüde zemin ile temel arasındaki kinematik etkileşime bağlıdır ve bu da atalet kuvvetlerinin taban döşemesinden üst yapıya aktarılmasından sorumludur. Zemin büyütmesi durumunda kazık temellerde deformasyon ne kadar fazlaysa kinematik etkileşim üstyapıda o kadar çok görülür. (Forcellini 2022). Şekil 18’de kinematik etkileşim görsel olarak görülmektedir.

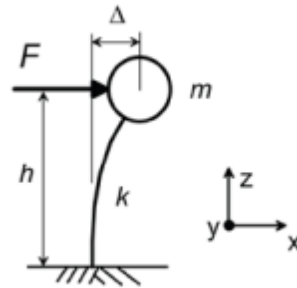


Şekil 18. Kinematik etkileşim (Pitilakis 2006)

1.3.8. Üst Yapı-Zemin Davranış Yaklaşımları

1.3.8.1. Rijit Taban Yaklaşımı

Zemin sonsuz rijit olduğu varsayılır. Bu durumda üstyapıda sadece yanal ötelenmeler olur. Sert zeminler için geçerlidir (Çetinkaya, Çelebi ve Kırtel 2017). Şekil 19’da sembolik olarak rijit taban yaklaşımı görülmektedir.

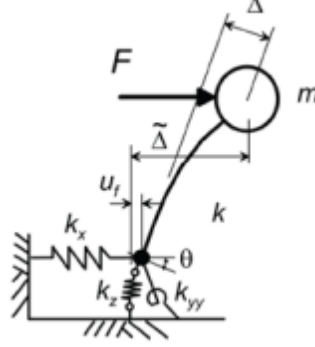


Şekil 19. Rijit taban yaklaşımı (Çetinkaya, Çelebi ve Kırtel 2017)

1.3.8.2. Esnek Taban Yaklaşımı

Zemin ötelenmeleriyle beraber üstyapının, temelin dönmesinden ve şekil değiştirmesinden etkilenecek birlikte hem yatay hem de düşey yönde hareket etmesidir

(Çetinkaya, Çelebi ve Kırtel 2015). Şekil 20’de sembolik olarak esnek taban yaklaşımı görülmektedir.



Şekil 20. Esnek taban yaklaşımı (Çetinkaya, Çelebi ve Kırtel 2017)

1.3.9. Yapı-Zemin Etkileşim Problemleri Çözümünde Kullanılabilecek Modelleme Yaklaşımları

1.3.9.1. Alt Sistem Yöntemi

Alt sistem yönteminde zemin ve yapı ayrı sistem olarak düşünülür. Temel ve zeminin davranışı dinamik rijitlik ve sönüm katsayıları ile temsil edilir ve zemin ve temel arasındaki etkileşim etkisi dashpot ve yaylarla yapıya aktarılır. Bu yöntem analiz süresini oldukça kısaltır çünkü zemin doğrudan modellenmez. Bu yüzden çok sayıda bina ile uğraşıldığında yapılarda alt sistem yöntemini kullanmak kullanışlıdır (Oz ve diğ. 2020).

1.3.9.2. Ortak Yöntem

Ortak yöntemde yapı-zemin etkileşiminde yakın bölge ve uzak bölge diye iki kısma ayrılır. Yakın bölge yapı ve yapıya bitişik sonlu sınırlı zemin bölgesi olarak tanımlanır ve uzak bölge çevreleyen sınırsız bölge olarak varsayılır (Fathi ve diğ. 2020).

1.3.10. Yapı-Zemin Etkileşiminde Doğrusal Olmayan Analizler

1.3.10.1. Statik İtme Analizi

İtme analizinde yapı, düşey yüke ve bina yüksekliği boyunca dağılan giderek artan yanal yüke maruz kalır. Eşdeğer statik yanal yükler yaklaşık olarak deprem kaynaklı kuvvetleri temsil eder. Bu analizle bir yapıdaki toplam taban kesme kuvvetlerine karşı, herhangi bir göçme veya hasar meydana getirebilecek üst yerdeğiştirmeler elde edilir. Analiz, göçmeye kadar yapılır ve göçme yükü ve süneklik kapasitesi belirlenir. Bir yapının artan yanal yükler altındaki davranışını tanımlayan kapasite (itme) eğrisi, bina için yapılan analizlerden elde edilir. Hedef yer değiştirme, kapasite eğrisine göre belirlenir. Doğrusal olmayan statik itmeyi yapılara uygulamak için birçok yöntem sunulmuştur. Bu plastik statik analiz yöntemleri, Kapasite Spektrum Yöntemi (ATC-40, 1996), Yer Değiştirme Katsayısı Yöntemi (FEMA-356, 2000) ve Sekant Yöntemi, sabit süneklik prosedürü (modal itme analizi) olarak sıralanabilir. İtme analizinde, betonarme yapıların sismik yükler altında oldukça elastik davranmaması nedeniyle elastik olmayan performansında plastik akma etkileri baskın olacaktır. Bu nedenle, itme analizinin doğruluğu, bu etkileri doğru bir şekilde temsil eden analitik modellerin yeteneğine bağlıdır (Kurt ve Tonyalı 2020). 2018 deprem yönetmeliğinde tek modlu, sabit modlu, değişken modlu ve çok modlu olmak üzere dörde ayrılır.

Seyrek olmayan deprem yüklemelerine maruz kalan çoğu yapıda elastik olmayan davranış amaçlandığından, yapıların sismik etkiler altındaki davranışını yakalamak için doğrusal olmayan analizlerin kullanılması esastır. Basitliği nedeniyle, yapı mühendisliği mesleği, FEMA-356 ve ATC-40'ta açıklanan doğrusal olmayan statik yöntemi (NSP) veya itme analizini kullanmaktadır. İtme analizinin dikkatli bir şekilde kullanıldığında, doğrusal statik veya dinamik analiz yöntemleriyle elde edilemeyen kullanışlı bilgiler sağladığı yaygın olarak kabul edilmektedir.

Statik itme analizinin, elastik analizle elde edilemeyen mukavemet ve yer değiştirme talepleri hakkında yapısal hususlar ve kullanışlı bilgiler sağladığı yaygın olarak kabul edilmektedir (Krawinkler 1996; Mwafy ve Elnashai 2001). Bununla birlikte, daha yüksek mod etkileri veya burulma düzensizlikleri olan yapılar için yanlıştır (Papanikolaou, Elnashai ve Pareja 2006; Krawinkler ve Seneviratna 1998).

Ayrıca, doğrusal olmayan statik yöntemler, yakın fay gibi belirli yer hareketi kayıtları altında yapıların davranışını yansıtmak için doğal olarak yetersizdir (Liao, Loh ve Wan 2001). Bir diğer önemli nokta, doğrusal olmayan statik analizden gözlemlenen hasar modelinin bazı durumlarda doğrusal olmayan dinamik analizden önemli ölçüde farklı olabilmesidir (Kim ve D'Amore 1999).

1.3.10.2. Zaman Tanım Alanında Doğrudan İntegrasyon Analizi

Zaman tanım alanında doğrusal olmayan hesap, deprem etkisindeki yapının hareket denklemlerini ifade eden diferansiyel denklem takımının zaman artımları ile adım adım doğrudan integrasyonudur. Bu işlem sırasında, doğrusal olmayan davranıştan dolayı sistemin rijitlik matrisinin zamanla değişimi göz önüne alınır. Bu analiz için TBDY 2018’de hem x yönü için hem de y yönü için en az on bir adet gerçek ya da yapay deprem ivme kaydı kullanılır. Aynı deprem kaydı için en fazla üç farklı istasyon kaydı kullanılabilir. Yüksek binalar için zorunludur.

Karmaşık olması ve uzun sürmesine rağmen doğrusal olmayan analizler arasında en gerçekçi olanıdır. Ayrıca yapı depreme plastik deformasyonla direndiği için elastik olmayan davranışın da analize dâhil edilmesi önemlidir (Alemdar 2004; Eren 2010). Son araştırmalar, sismik talep tahminleri için doğrusal olmayan zaman alanı analizinin iyiliğinden bahsetmekte, karmaşıklığını, uygun yer hareketi kayıt setinin seçimindeki zorlukları, gerekli hesaplama çabasını ve analizin kullanılması ve faydalı sonuçların çıkarılması için gerekli zamanı vurgulamaktadır (Fajfar 2002).

1.4. Yapı-Zemin Dinamik Etkileşimi

Depremde zemin temel üstyapı arasındaki etkileşimdir. Yapı-zemin dinamik etkileşimin üstyapının dinamik özellikleri ve türünden, zemin koşullarından, temelin rijitliğinden ve türünden, bina yüklerinin büyüklüğünden ve dağılımından ve depremin karakteristiği ve frekans içeriğinden etkilenir. Zemin özellikleri temel ve üstyapıyı, temel ve üstyapının özellikleri de zemini etkiler (Jia-Long, Ding-Hao ve Gang 2022; Liu ve diğ. 2019). Buna örnek olarak deprem mühendisliğinde bir istisna olan 1985 Michoacan depremi verilebilir. Bu depremde merkez üssüne yakın bölgede orta şiddetli hasarlar görülürken, merkez üssünden 350 km ötede yerel zemin koşullarından dolayı ağır hasarlar görülmüştür (Sharma ve Sharma 2020).

Yapı-zemin etkileşimi yapının görelî kat ötelenmesini arttırdığından yapının deplasman talebini artırır. Kayma dalgası düşük zeminlerde görelî kat ötelenmelerinin performans sınırlarını değerlerini aştığı ve yapının öngörülen performans düzeyine ya ulaşmadığı ya da aştığı tespit edilmiştir (Dok, Aktaş ve Kırtel 2015).

1.4.1. Yapı-Zemin Dinamik Etkileşimini Etkileyen Faktörler

1.4.2. Yerel Zemin Koşulları

Sismik kuvvetler altında yapılarda oluşan hasarı etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Depremde zeminler, sıvılaşma, çökme, oturma vb. durumları yaşadığı için zeminlerin dinamik özellikleri de yapının hasarını etkiler (Şahin, Toygar ve Kahyaoğlu 2022; Karşlıoğlu, Alkayış ve Onur 2021). Zemin yapıya gelen ivmeyi büyüterek zemin büyütmesi durumu da yaşanabilir (Gücek, Afacan ve Zorluer 2023; Gürbüz 2023). Yerel zemin koşullarını etkileyen etmenler üçe ayrılır.

1.4.2.1. Yerel Zemin Kalınlığı

Yerel zemin kalınlığı üstyapıda deplasman, ivme, taban kesme kuvveti ve taban devrilme momentlerini etkilemektedir.

1.4.2.2. Zemin Spektrumları

Her zeminin kendine ait bir spektrumu bulunmaktadır. Özellikle zeminin periyodu 0,5 saniyeyi aştığında spektrum eğrileri oldukça farklılaşır (Yeşil ve Ateş 2018; Serdar 2015). Yumuşak ve orta zeminlerin spektral değerleri sert zeminlerden daha büyüktür (Karaca 2021; Şelenbaş 2017). Böyle bir durumda zeminlerin frekansı küçük titreşimleri büyük oranda yer ile etkileşime girer.

Merkez üssünden uzaklaştıkça depremin şiddeti azalır (Ager ve diğ. 2020). Ancak magmatik kayalardan oluşan zeminlerde bu azalış kısa mesafelerde görülürken alüvyon zeminlerde bu azalış daha uzun mesafelerde görülmeye başlar (Uzelli ve diğ. 2021).

1.4.2.3. Zemin Periyodu ve Zemin Özelliklerinin Üstyapıya Etkisi

Hem yapı hem de zemin kendi periyotlarıyla ve deprem dalgaları ile salınım yaparlar. Eğer hem yapının hem de zeminin periyotları birbirlerine yakın olursa bu durumda rezonans oluşur (Mase, Liktlersuang ve Tobita 2021).

Genellikle sert zeminlere çok katlı yapıların yapılması, yumuşak zeminlere ise az katlı yapıların yapılması önerilir (Chaudhari ve Kadam 2013; Tipsunavee ve Arangjelovski 2021). Yapılar az katlı olsa bile yumuşak zeminde asla yapı-zemin etkileşimi ihmal edilmemelidir (Miranda ve Ruiz-Garcia 2002). Yumuşak zeminlerin üzerine inşa edilen rijit yapılar için yükseklik/genişlik oranı düşük tutulur (Zhang ve Far 2022). Yükseklik/genişlik oranı arttıkça yer değiştirme genliği ve periyot artar. Bu etki yumuşak zeminlerde sert zeminlere nazaran daha belirgindir.

1.4.3. Zemin Sönümü

Sönüm titreşen bir sistemin salınım genliklerini zamanla küçültten etkidir. Doğal olabileceği gibi yapay da olabilir. Sönüm oranının sıfır olması histeresiz eğrisinin yani τ - γ eğrisinin doğrusal olması anlamına gelir. Fakat yapılan deneysel çalışmalara göre oldukça düşük deplasman değerlerinde bile sönüm görülmektedir. Bu yüzden sönüm her zaman sıfırdan farklıdır. Bu nedenle çevrimsel yüklemeler altında zemin deprem enerjisini sönümler (Jiang ve diğ. 2021; Alver ve Eseller-Bayat 2022). Zeminde oluşan sönümler üçe ayrılır:

1.4.3.1. Malzeme Sönümü (İç Sönüm)

Doğrusal elastik davranış gösteren homojen olarak idealleştirilen zemin modellerinde deprem genliğini değiştirmeden hareket eder. Fakat sahada durum bu şekilde değildir. Çünkü deprem olduğundan zemin deprem enerjisinin bir kısmını ısıya ya da sese dönüştürerek emer. Böylece deprem dalgasının genliğinde bir düşüş yaşanır. Bu da zeminin kendi içindeki büyük malzeme sönümünden kaynaklanır.

1.4.3.2. Geometrik Sönüm

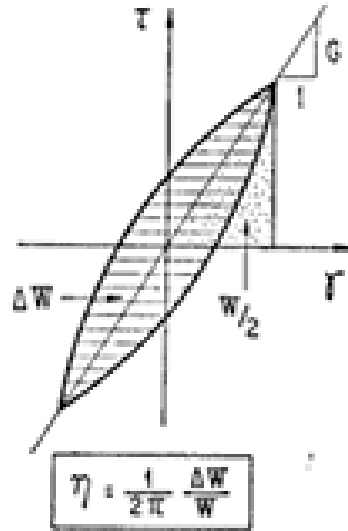
Deprem sırasında oluşan dalgalar zeminden temele, temelden üstyapıya geçer. Temel dalgaların bir kısmını zemine geri yansıtır. Bu dalgalara radyasyon dalgaları denir. Temel bu geri dönen dalgalarla beraber üstyapı yükünü de zemine aktarır.

Üstyapıya ne kadar çok dalga gelirse üstyapı o kadar çok titreşecektir. Üstyapıya gelen dalgalar titreşime ve deplasmana neden olacak ve en sonunda yapı durağanlaşacaktır. Buna geometrik sönüm ya da radyasyon sönümü denir (Doğangün 2021).

Geometrik sönüm yapı-zemin etkileşiminde önemsenmesi gereken bir parametredir. Çünkü zeminin geometrik boyutlarını etkiler. Yapılan çalışmalara göre radyasyon sönümünün frekansı yüksek yer hareketinde ve yüksek sönümlü zeminlerde temel genişliğinin 8-10 katı kadar uzatılması yeterli olur. Radyasyon sönümü sistemin hareket denkleminde yer almaz (Şahin ve diğ. 2019; Doğangün 2021).

1.4.3.3. Histeretik Sönüm (Çevrimsel Sönüm)

Çevrimsel yük başına (ΔW) zemin elemanında sönümleme enerjisinin çevrimsel yük başına (W) elastik enerji ya da depolanan enerjiye oranı olan bir sönüm oranıdır (Tatsuoka, Iwasaki ve Takagi 1978). Zemin her çevrimsel kesme yüklemesine maruz kaldığında Şekil 21’de görüldüğü gibi bir histeretik davranış gösterecektir (Brinkgreve, Kappert ve Bonnier 2007).



Şekil 21. Tipik bir histeretik eğrisi (Tatsuoka, Iwasaki ve Takagi 1978)

1.4.4. Sıvılaşma

Doygun kum zeminlerde, kil zeminlerde ve gevşek daneli zeminlerde statik ve dinamik yüklemelerden tetiklenen sıvılaşma bina temellerine ve mevcut yapılara

önemli hasara neden olabilir, böylece ani kararsızlık yapıların yıkımına, ekonomik kayba ve hatta can kaybına neden olabilir (Hazout ve diğ. 2017; Shivaprakash ve Dinesh 2017). Sıvılaşma problemleri 1964 Niigata, Japonya, 1976 Tangshan, Çin, 1999 Kocaeli, Türkiye, 2008 Wenchuan, Çin ve 2011 Tohoku Bölgesi Pasifik Kıyı Depremi, Japonya gibi depremlerden sonra sık sık rapor edilmiştir.

Sıvılaşmanın ana nedeni, boşluk suyunda artış ve zeminin efektif gerilmenin azalması nedeniyle kayma dayanımı kaybıdır ki bu da nihayet kumlu zeminin sıvı benzeri karakteristik sergilediği olguya neden olur (Lashkari ve diğ. 2017; Dobry ve Abdoun 2017). Zemin iyileştirme metotları ya da derin temeller sıvılaşma etkisini azaltmak ya ortadan kaldırmak için çoğunlukla kullanılırlar (Bao ve diğ. 2019).

Sıvılaşma kayma mukavemeti ve rijitlik kaybına, yanal yayılmaya, temelin çökmesine, zemin yumuşamasına, kum kaynamasına ve deprem sonrası oturmalara neden olabilir. Sıvılaşmadan dolayı oluşan zemin göçmesi, büyük depremlerde, özellikle doygun kumlu alanlarda, yapılarda büyük hasarlara neden olabilir. Taban uyarımının dalga boyuna göre sıvılaşan zemin tabakası zayıflama ve güçlendirme uyarımından etkilenebilir. Sıvılaşmış alt katmanlar depremin şiddetini azaltabilir ve periyodu düşük yapılar için doğal izolatör gibi davranabilir. Ancak uzun periyotlu yapılar için genellikle tepki ivme değerlerini büyütür. Sıvılaşma teyit edilmezse, bu durumda izolatör yüksek derecede risk taşıyabilir (Bouckovalas ve Tsiapas 2015; Bouckovalas ve diğ. 2016; Adampira, Derakhshandi ve Ghalandarzadeh 2021).

Yanal yayılmaya neden olan sıvılaşmış zemin bazen yapılarda birkaç metrelik kalıcı yanal yer değiştirmelere neden olabilir. Böylelikle zemin katın kolonlarında oluşan büyük deplasmanlar bina için riskli olabilir ve yapının yıkılmasına yol açabilir. Daha rijit temelli yapılarda yanal yayılma etkisi esasen binaların eğilmesi ve az yapısal hasar alıp farklı oturma yapması şeklinde görülebilir (Karafagka, Fotopoulou ve Pitilakis 2023; Cubrinovski ve diğ. 2018).

Yapılan çalışmalara göre sıvılaşmadan dolayı oluşan yapısal hasarlarda fikir birliği yoktur. Bird vd. (2006) yılında yapmış oldukları çalışmada sıvılaşmadan kaynaklı hasar deprem sarsıntısının sonuna doğru ya da sarsıntıdan sonra gerçekleşmiştir. Ancak yapılan santrifüj testlerine göre hem deprem kaynaklı hem de sıvılaşma kaynaklı yapısal hasarlar eş zamanlı bir şekilde oluşmuş, sarsıntı anında ve sarsıntı sonrasında binada hem eğim hem de kalıcı oturmalar gözlemlenmiş ve kuvvetli

yer sarsıntısı esnasında en yüksek temel eğimi görülmüştür (Olarate, Dashti ve Liel 2018; Paramasivam, Dashti ve Liel 2018).

1.4.5. Zemin Büyütmesi

Ana kayadan yayılan deprem dalgasının yumuşak zemin tabakalarına ulaşarak ve uzak bölgelerdeki tabakalı zeminlerde genlikler ve hâkim titreşim periyotları büyüdüğü için yarı rezonansa girerek dalgaların genliklerini büyümesidir. Örneğin 28 Mart 1970 tarihinde 7.1 büyüklüğündeki Gediz depreminde merkez üssünden 135 kilometre uzaktaki sağlam zeminli Bursa’da hiçbir hasar oluşmamışken, Bursa ovasındaki Tofaş otomobil fabrikası boya atölyesinde binaların yıkılışı depremin uzak mesafe etkisi ve yumuşak tabakalı zemine ulaştığı için deprem dalgası genliklerinde büyüme görülmüştür (Kaptan 2012).

1.4.6. Yüzey Topografya Etkisi

Yüzeyin şekli de yapı-zemin etkileşimini etkiler. Yapının çukur ya da şevin üzerinde bulunması yapı-zemin sisteminin dinamik davranışını etkiler. Eğer yapı şevin üst tarafındaysa alt kısmına nazaran daha üst genliklerle hareket etmektedir. Bu artışın sebebi zeminden gelen ve yansıyan dalgaların süreksizliğin olduğu yerde etkileşime girmesidir. Şevlerin üst kısmında yapının hareket ettiği genliklerin büyümesi bu bölgelerdeki yapıların daha fazla hasar almasını açıklar. Şev eğimi azaldıkça hareketin genliği de azalır.

Çukur bölgelerinde de yapının bulunduğu konuma göre genlikler değişir. Çukurun üst kısmındayken yapı çukura yaklaştıkça genlikler azalır. Genliklerin en düşük olduğu yer çukurun iç kısmıdır (Düzgün 2007; Doğangün 2021).

1.4.7. Yüzeysel Temellerde Yapı-Zemin Etkileşimi

Sallanmaya maruz kalmış yüzeysel temellerin moment dönme tepkisi çevrimsel yükleme sırasında temel ayağı kenarının ayrılmasına ve ardından yeniden eklemesinin bir sonucu olarak son derece doğrusal olmayandır. Sallanma esnasında temelin temas alanındaki azalış, üstyapının sismik performansını etkileyen üstyapıya uygulanan hareketlerin azalışına neden olabilir. Ayrıca yüzeysel temel her dönme yaptığında üstyapının periyodunu arttırır ve genellikle yapının elastik olmayan

deplasman talebini azaltır (Salimath ve diğ. 2017). Ayrıca yüzeysel temelli narın yapılar için kinematik etkileşim ve sallanma temel girdi hareketi ihmal edilebilir (Bararnia ve diğ. 2018). Radye temellerde temel zemini yumuşak kil veya gevşek kum olursa oluşacak oturmada dolayı radye ile temel arası etkileşim bölgesi kopabilir.

Yumuşak zemin sahasında nispeten yüksek yapı için yüzeysel temelin sallanma hareketleri yapının sismik tepkisinde önemli etkilere neden olabilir.

1.4.8. Derin Temellerde Zemin-Yapı Etkileşimi

Kazık temel gibi derin temellerde temel ve zemin arasında kinematik etkileşim oluşur. Ancak kazık temellerde kazık-zemin arası etkileşim üstyapıda zararlı etkilere neden olabilir (Minnucci ve diğ. 2022).

Kazık-radye temellerde temelde oluşan gerilmeler hem temel döşemesinden hem de kazık elemanlardan alt zemine aktarılabilir. Ancak sürtünme kazığı temellerde, kazıklı radye temelin aksine, temel döşemesi ve alt zemin arasında doğrudan gerilme aktarımı yoktur. Böylece temel kazık elemanlardan sadece gerekli taşıma kapasitesi ve rijitliği elde eder (Hokmabadi ve Fatahi 2016). Yönetmeliklerin birçoğunda eğimli kazığın davranışı olumsuz değerlendirilir. Mühendislik açısından ana dezavantajlar büyük çekme kuvvetlerine göre eğilme kapasitesinin azalması, oturmaya göre oluşan eğilme momentleri, kazık başlığı arayüzündeki daha büyük kuvvetler ve kazığın eğimi simetrik olmadığında istenmeyen kalıcı dönme durumudur (Escoffier 2013). Radyenin gömülmesi de kazıklı temelin sismik davranışını büyük oranda etkiler.

Kazıklar, gevşek ila orta yoğunlukta kumlu zemin veya yumuşak kil içeren sismik eğilimli bölgelerde de kullanılmaktadır. Bununla birlikte, deprem sarsıntısı sırasında kazık çevresindeki zemin sıvılaşma nedeniyle rijitliğinin ve mukavemetinin çoğunu kaybettiğinde, kazık yanal olarak desteklenmeyen uzun bir kolon gibi davranacak ve üst yapıdan gelen yüksek eksenel yük altında burkulabilecek ve temelleri etkileyecektir. Sıvılaşma nedeniyle kazık destekli yapıların çökmesi ve hasar görmesi birçok büyük depremden sonra gözlemlenmiştir (Qin ve Ma 2021; Rohollah ve diğ. 2020).

1.4.9. Yapı Yüksekliği

Esnek sistemler için yüksek katlı yapılarda, yanal doğal periyot tepki spektrum eğrisinin uzun periyot bölgesine gömülü olması beklenir. Ancak az katlı binalar için genellikle yanal periyot çok küçüktür ve tepki spektrumunun hızla artan bölgesi içinde kalabilir. Bu yüzden zemin yapı etkileşimi nedeniyle yanal doğal periyottaki bir artış spektral ivme ordinatındaki bir artışa sebep olabilir. Dahası zemin-esneklik etkisi nedeniyle çeşitli doğal frekanslar tüm sismik tepkiyi katkı sağlayan çapraz-modal bağlantı terimlerinde bir artışa neden olabilir. Bunlarla beraber az katlı bina çerçeveleri sismik taban kesme kuvvetlerini artırmak için önemli rol oynayabilir. Ancak sismik tepki genellikle orta katlı ve yüksek katlı yapılar için zemin yapı etkileşim etkisi nedeniyle azalır (Dutta, Bhattacharya ve Roy 2004).

Rijit ve sıkı zeminlerde çok katlı yapılar önerilirken, yumuşak ve gevşek zeminlerde az katlı yapıların inşa edilmesi önerilir. Yumuşak zeminin üzerine düşük katlı yapı yapılırken yapı-zemin etkileşimi ihmal edilmemelidir. Yumuşak zemine oturtulan rijit yapılar için yükseklik/genişlik oranı düşük tutulmalıdır. Çünkü yükseklik/genişlik oranı yüksek olursa deplasman genliği azalır ve periyot uzar. Yumuşak zemin rijit yapı olduğunda bu oranın etkisi sert zemin esnek yapı durumundan daha belirgindir (Kutanis 2001).

1.4.10. Yapı Ağırlığı

Nükleer güç santralleri, asma köprüler, viyadükler, barajlar, gökdelenler vb. gibi ağır yapılarda yapı-zemin etkileşimi daha belirgin olur (Van Nguyen, Kim ve Duy Nguyen 2020; Li, Chen ve Li 2022).

1.4.11. Yapı-Zemin Etkileşimi Denklemleri

1.4.11.1. Korunum Denklemleri

Hem sismik uyarım hem de dıştan uyarılmış geçici yüklemeler düşünülürse, zaman etki alanında yapının hareket denklemleri denklem (1.46)'da verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} M_{ss} & M_{sb} \\ M_{bs} & M_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_s^t \\ \ddot{u}_b^t \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{ss} & C_{sb} \\ C_{bs} & C_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_s^t \\ \dot{u}_b^t \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sb} \\ K_{bs} & K_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_s^t \\ u_b^t \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ -r_b(t) \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} P_s(t) \\ P_b(t) \end{Bmatrix} \quad (1.46)$$

[M] kütle matrisi, [C] yapının viskoz sönüm matrisi ve [K] yapının rijitlik matrisidir. $\{u\}$ ve $\{\dot{u}\}$ ve $\{\ddot{u}\}$ sırasıyla deplasman, hız ve ivme vektörleridir. $r_b(t)$ zemin etkileşim kuvvet vektörü, $p(t)$ dıştan uyarılmış kuvvet vektörüdür. b ve s alt indisleri sırasıyla zemin-yapı arayüzlerindeki ve binadaki düğüm noktalarını temsil eder. t üst indisi ise yapının toplam hareketini temsil eder.

1.4.11.2. Yer Etkileşim Kuvveti

Yer etkileşim kuvveti denklem (1.47)'de verilmiştir.

$$r_b(t) = \int_0^t M_{bb}^g(t-\tau)(\ddot{u}_b^t(\tau) - \ddot{u}_b^g(\tau))d\tau \quad (1.47)$$

Bu denklemde g üst indisi kazılmış sınırsız zemini temsil eder. $M_{bb}^g(t-\tau)$ ise ivme birim darbe matrisini, $\ddot{u}_b^t(t)$ ise ivme vektörünü temsil eder. Bu denklemdeki b alt indisi kazılmış zemine aittir. Denklem (1.47) açılı bir şekilde gelen cisim ve yüzey dalgalarından oluşan genel bir dalga kalıbını hesaplamakta kullanılır. Yer hareketi $\ddot{u}_b^g(t)$ kazıya bağlıdır böylece hesaplanacak ve serbest saha zemin analizleriyle tanımlanabilecek düğüm noktalarının konumu istisnasıyla kazıya bağlı olmayan serbest saha hareketi $\ddot{u}_b^f(t)$ ile bu genelleştirilmiş dağılmış hareketin yerini almak daha uygundur.

Serbest alan sistemi zeminin kazılmış kısmı zemin eklendiğinde ortaya çıkar. Bu özel durum için sadece zeminin kazılmış kısmından olan yapı ve denklem (1.46)'nın sağ kısmı hareket denklemi göz önüne alarak denklem (1.48)'deki gibi yeniden formülize edilir:

$$\int_0^t M_{bb}^g(t-\tau)\ddot{u}_b^g(\tau)d\tau = \int_0^t M_{bb}^f(t-\tau)\ddot{u}_b^f(\tau)d\tau \quad (1.48)$$

Bu denklemdeki M_{bb}^f zemin-yapı arayüzündeki düğüm noktalarına atfedilen serbest saha bölgesinin ivme birim-darbe tepki matrisidir. Serbest saha bölgesinin ivme birim darbe tepki matrisini hesaplamak için zeminin kazılmış alanı sonlu

elemanlarla ayrıklaştırılır. Zeminin kazılmış alanının standart sonlu elemanlar ayrıklaştırması kazılmış zeminin ivme birim darbe tepki matrisi M^e ile sonuçlanır ve denklem (1.49)'da verilmiştir.

$$M^e = -\frac{1+2\xi i}{\omega^2} K_e + M_e \quad (1.49)$$

Bu denklemde K_e kazılmış zeminin rijitlik matrisi, M_e kütle matrisi, ω açılal frekans ve ξ kazılmış zeminin histeretik sönümüdür. M^e matrisi M_{ii} , M_{ib} ve M_{bb} diye alt matrislere ayrıştırılabilir. Alt indis b yapı-zemin arayüzündeki düğüm noktalarına atfedilir ve alt indis i kalan düğüm noktalarına atfedilir. i. düğüm noktasındaki serbetlik derecesini ortadan kaldırma denklem (1.50)'deki formüle neden olur.

$$M_{bb}^e = M_{bb} - M_{bi} M_{ii}^{-1} M_{ib} \quad (1.50)$$

Bu denklemde M_{bb}^e b düğüm noktalarına atıfta bulunan kazılmış zeminin ivme birimi-darbe tepki matrisini göstermektedir. M_{bb}^e 'nin M_{bb}^g 'ye eklenmesi daha sonra yapı-zemin arayüzünde yer alan aynı b düğümlemlerinde ayrıklaştırılan sürekli zeminin (serbest alan sahası) M_{bb}^f ivme birim darbe tepki matrisiyle denklem (1.51)'deki gibi sonuçlanır.

$$M_{bb}^f = M_{bb}^e + M_{bb}^g \quad (1.51)$$

Denklem (1.51), (1.47) ve (1.48)'de yerine konulunca denklem (1.51), (1.52) ve (1.53) denklemleri elde edilir:

$$r_b(t) = r_b^{(1)}(t) + r_b^{(2)}(t) \quad (1.52)$$

$$r_b^{(1)}(t) = \int_0^t M_{bb}^g(t-\tau) \left(\ddot{u}_b^t(\tau) - \ddot{u}_b^f(\tau) \right) d\tau \quad (1.53)$$

$$r_b^{(2)}(t) = - \int_0^t M_{bb}^e(t-\tau) \ddot{u}_b^f(\tau) d\tau \quad (1.54)$$

İvme birim darbe tepki matrisi $M_{bb}^g(t)$ ölçekli sınır sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak hesaplanır. Bu da denklem (1.55)'teki gibi hesaplanır.

$$r_b^{(2)}(t) = -F^{-1}[M_{bb}^e(\omega)\ddot{u}_b^f(\omega)] \quad (1.55)$$

Burada $F^{-1}[*]$ Ters Fourier Dönüşümünü ifade eder. Eşitlik (1.55)'in sağ tarafında köşeli parantez içine alınan terim frekans alanında değerlendirilir ve ardından belirtildiği gibi zaman alanına dönüştürülür (Wegner, Yao ve Zhang 2006).

1.4.11.3. Katlar Arası İzolasyonlu Yapı-Zemin Etkileşimli Sistemin Hareket Denklemleri

Deprem uyarımı altında katlar arası izolasyonlu yapı-zemin etkileşimli bir yapının hareket denklemleri denklem (1.56)'da verilmiştir (Yanik ve Ulus 2023; Wang ve diğ. 2011).

$$[M_{ZYE,KAI}] \begin{Bmatrix} \ddot{u}_{alt} \\ \ddot{u}_{izo} \\ \ddot{u}_{üst} \end{Bmatrix} + [C_{ZYE,KAI}] \begin{Bmatrix} \dot{u}_{alt} \\ \dot{u}_{izo} \\ \dot{u}_{üst} \end{Bmatrix} + [K_{ZYE,KAI}] \begin{Bmatrix} u_{alt} \\ u_{izo} \\ u_{üst} \end{Bmatrix} = -[m_{ZYE,KAI}^*]\{r\}\ddot{u}_g(t) \quad (1.56)$$

Bu denklemde $M_{ZYE,KAI}$, $C_{ZYE,KAI}$, $K_{ZYE,KAI}$ sırasıyla katlar arası izolasyonlu yapı-zemin etkileşimli yapının kütle, sönüm ve rijitlik matrisleridir. r ise depremin etkidiği yöndeki serbestliklere tekabül eden elemanları 1'e eşit olan etki vektörüdür. Bu denklemdeki alt, izo ve üst alt indisleri ise sırasıyla altyapıyı, izolasyon katını ve üst yapıyı temsil eder. Bu matrislerin açılımı Denklem (1.57), (1.58), (1.59) ve (1.60)'da verilmektedir.

$$[M_{ZYE,KAI}] = \begin{bmatrix} M_{KAI} & M_{V,KAI} & M_{h,KAI} \\ M_{V,KAI}^T & \left(m_b + \sum_{i=1}^n m_i \right) & \sum_{i=1}^n m_i h_i \\ M_{h,KAI}^T & \sum_{i=1}^n m_i h_i & \sum_{i=1}^n m_i h_i^2 + I_b + \sum_{i=1}^n I_i \end{bmatrix}_{(n+3) \times (n+3)} \quad (1.57)$$

$$[C_{ZYE,KAİ}] = \begin{bmatrix} C_{KAİ} & 0 & 0 \\ 0 & c_s & 0 \\ 0 & 0 & c_r \end{bmatrix}_{(n+3) \times (n+3)} \quad (1.58)$$

$$[K_{ZYE,KAİ}] = \begin{bmatrix} K_{KAİ} & 0 & 0 \\ 0 & k_s & 0 \\ 0 & 0 & k_r \end{bmatrix}_{(n+3) \times (n+3)} \quad (1.59)$$

$$[m_{ZYE,KAİ}^*] = \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \vdots \\ m_{KAİ} \\ \vdots \\ m_{n-1} \\ m_n \\ m_b + \sum_{i=1}^n m_i \\ \sum_{i=1}^n m_i h_i \end{bmatrix}_{(n+3) \times 1} \quad (1.60)$$

Bu denklemlerde KAİ alt indisi katlar arası izolasyonunu, ZYE,KAİ alt indisi ise katlar arası izolasyonlu yapı-zemin etkileşimli yapıyı, c_s ve c_r sırasıyla yapının sağa sola sallanma (swaying) sönümü ve rijitliğini, c_r ve k_r sırasıyla yapının ileri geri sallanma (rocking) sönümü ve rijitliğini temsil eder. m_b ve I_b sırasıyla temelin kütlesi ve temelin kütle atalet momentidir. I_i ise i . katın kat kütle atalet momentidir. Denklemlerin sağ tarafındaki simgelerin açılımları (1.61)-(1.73) denklemlerinde verilmektedir.

$$[M_{KAİ}] = \begin{bmatrix} m_{alt} & 0 & 0 \\ m_{izo} & m_{izo} & 0 \\ m_{üst} & m_{üst} & m_{üst} \end{bmatrix}_{(n+1) \times (n+1)} \quad (1.61)$$

$$[M_{V,KAI}] = \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \vdots \\ m_{KAI} \\ \vdots \\ m_{n-1} \\ m_n \end{bmatrix}_{(n+1) \times 1} \quad (1.62)$$

$$[M_{h,KAI}] = \begin{bmatrix} m_1 h_1 \\ m_2 h_2 \\ \vdots \\ m_{KAI} h_{KAI} \\ \vdots \\ m_{n-1} h_{n-1} \\ m_n h_n \end{bmatrix}_{(n+1) \times 1} \quad (1.63)$$

$$[C_{KAI}] = \begin{bmatrix} c_{alt} & -c_{izo} & 0 \\ 0 & c_{izo} & -c_{üst} \\ 0 & 0 & c_{üst} \end{bmatrix}_{(n+1) \times (n+1)} \quad (1.64)$$

$$[K_{KAI}] = \begin{bmatrix} k_{alt} & -k_{izo} & 0 \\ 0 & k_{izo} & -k_{üst} \\ 0 & 0 & k_{üst} \end{bmatrix}_{(n+1) \times (n+1)} \quad (1.65)$$

$$k_s = \frac{8Gr}{2-v} \quad (1.66)$$

$$k_r = \frac{8Gr^3}{3(1-v)} \quad (1.67)$$

$$c_s = \frac{4,6}{2-v} \rho V_s r^2 \quad (1.68)$$

$$c_r = \frac{0,4}{1-v} \rho V_s r^4 \quad (1.69)$$

$$I_b = \frac{9\pi}{32} \rho I_r r (1-v) \left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 \quad (1.70)$$

$$I_r = \frac{\pi r^4}{4} \quad (1.71)$$

$$I_i = \frac{\pi r^2 m_i}{12} \quad (1.72)$$

$$r = \sqrt{\frac{ab}{\pi}} \quad (1.73)$$

Bu denklemde a ve b dikdörtgen radye temelin eni ve boyudur. r ise eşdeğer dairesel temelin çapıdır (Akehashi ve Takewaki 2021; Moghaddasi ve diğ. 2010).

1.4.11.4. Akışkan Viskoz Sönümleyicili Yapı-Zemin Etkileşimli Sistemin Hareket Denklemleri

Deprem uyarımı altında akışkan viskoz sönümleyicili yapı-zemin etkileşimli bir yapının hareket denklemleri denklem (1.74)-(1.78)'de verilmiştir (Hasmaden 2014).

$$[M_{ZYE}]\{\ddot{u}\} + [C_{ZYE} + C_D]\{\dot{u}\} + [K_{ZYE}]\{u\} = -[M_{ZYE}]\{r\}\ddot{u}_g(t) \quad (1.74)$$

$$[M_{ZYE}] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & m_1 & m_1 h_1 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 & m_2 & m_2 h_2 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & m_n & m_n & m_n h_n \\ m_1 & m_2 & \cdots & m_n & \sum_{i=1}^n m_i & \sum_{i=1}^n m_i h_i \\ m_1 h_1 & m_2 h_2 & \cdots & m_n h_n & \sum_{i=1}^n m_i h_i & \sum_{i=1}^n m_i h_i^2 + \sum_{i=1}^n I_i \end{bmatrix}_{(n+2) \times (n+2)} \quad (1.75)$$

$$[C_{ZYE}] = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -c_3 & c_2 + c_3 & -c_3 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -c_3 & \ddots & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & c_{n-1} + c_n & -c_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -c_n & c_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_r \end{bmatrix}_{(n+2) \times (n+2)} \quad (1.76)$$

$$[C_D] = \begin{bmatrix} c_{d1}+c_{d2} & -c_{d2} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ -c_{d2} & c_{d2}+c_{d3} & -c_{d3} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -c_{d3} & c_{d2}+c_{d3} & -c_{d3} & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -c_{d3} & \ddots & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & c_{dn-1}+c_{dn} & -c_{dn} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -c_{dn} & c_{dn} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{(n+2) \times (n+2)} \quad (1.77)$$

$$[K_{ZYE}] = \begin{bmatrix} k_1+k_2 & -k_2 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2+k_3 & -k_3 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -k_3 & k_2+k_3 & -k_3 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -k_3 & \ddots & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & k_{n-1}+k_n & -k_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -k_n & k_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_r \end{bmatrix}_{(n+2) \times (n+2)} \quad (1.78)$$

Bu denklemlerde C_D viskoz sönümleyicili yapının sönüm matrisidir.

1.5. Sönümleyiciler

Deprem öngörülemeyen ve gerekli şartlar oluştuğunda oldukça yıkıcı olabilen bir doğa olayıdır. Bu yıkıcı etkiyi azaltabilmek için yapıların depreme karşı dayanıklı olması gerekir. Geleneksel olarak yapılar plastik mafsallaşma yaparak deprem enerjisini sönümleyerler. Ancak kamu binaları, hastane gibi deprem sonrasında hizmet verebilecek yapıların depremde ayakta kalması gerekir. Bunun için sönümleyiciler kilit rol oynar (Naimi ve Waheb 2019). Bu sebepten dolayı ülkemizde T.C. Sağlık Bakanlığı 2013 yılında 1. ve 2. Deprem bölgelerinde en az 100 odalı hastanelerde taban izolasyonunu zorunlu kılmıştır (Ekinci ve IPEK 2023; Akyüz ve diğ. 2017).

Yapılar deprem, rüzgâr ve makine titreşimlerinden dolayı göçebilirler. Yapılar gelen titreşimleri azaltmak ve yapısal güvenliği sağlamak için birtakım kontrol cihazları geliştirilmiştir. Bu cihazlar deprem enerjisini dağıtma özelliğine sahiptirler. Bu kontrol sistemleri pasif, aktif, yarı aktif ve karma olacak şekilde dörde ayrılır.

1.5.1. Pasif Kontrol Sistemleri

Bu sistemler yapının hareketinden faydalanarak cihazın olduğu yerlerde kuvvetler geliştirir. Bu kuvvetler enerjinin bir kısmını emer. Böylece yapının enerji talebi azalır. Ayrıca pasif kontrol sistemleri herhangi bir eyleyiciye ihtiyaç duymaz. Düşük maliyetli ve hesaplanması kolay olduğu için en çok tercih edilen sistemdir. Ayarlı kütle sönümleyici, ayarlı sıvı sönümleyici, metalik akma sönümleyici, viskoz akışkan sönümleyici bu cihazlara örnektir (Soysal 2006; Shanmuga Priya ve diğ. 2014; Lavasani ve Doroudi 2020).

1.5.1.1. Taban İzolasyon Sistemleri

Taban izolasyonlu yapılarda, depremde kaynaklanan enerji, yapı boyunca tabandan çatıya doğru ilerlemeden önce izolatörler tarafından dağıtılır. Bu nedenle, yapısal olmayan elemanlar da dahil olmak üzere yapısal elemanlara uygulanan deprem sonucu oluşan yanal kuvvet, geleneksel inşaat sistemine kıyasla taban izolasyon sisteminde daha düşüktür. Taban izolasyonu, bir üst yapıyı alt yapısından ayırması gereken yapısal elemanlar olarak tanımlanır. Sönümleme de depreme dayanıklı tasarımda hayati bir rol oynar ve yanal kuvvete maruz kaldıklarında binanın tepkisini azaltır (Abraham ve diğ. 2021; Bahekar ve Manchalwar 2019).

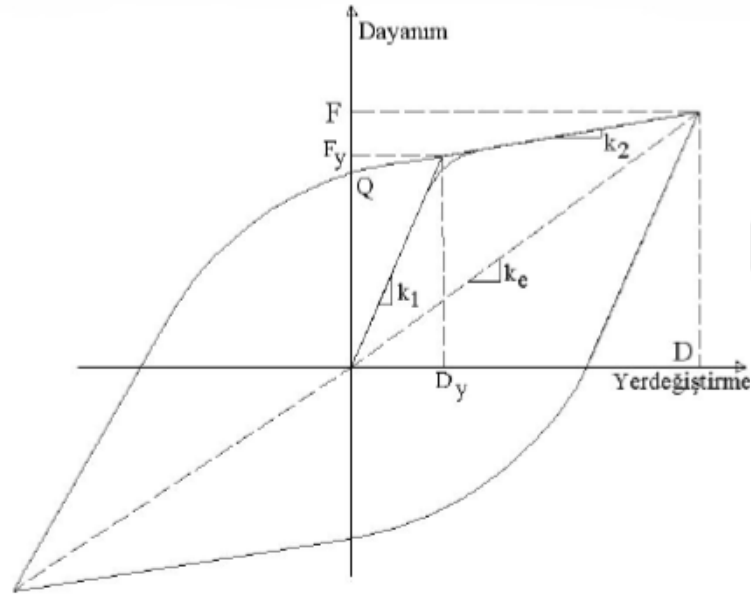
Depremden dolayı oluşan atalet kuvvetleri, yapının kütlesi ve yer ivmesi ile doğru orantılıdır. Bu nedenle binanın sünekliliğini veya elastik mukavemetini artırmak geleneksel bir yöntemdir. Ancak taban izolasyonunda kapasiteyi artırmak yerine sismik talep azaltılır. Çok katlı binalar, nükleer reaktörler, köprüler ve sıvı depolama tankları gibi yapıların sismik taban izolasyonu, yapısal bütünlüğü korumak ve üst yapıdaki deprem kaynaklı kuvvetleri ve deformasyonları azaltarak bina sakinlerinin yaralanmasını ve içeriğin hasar görmesini önlemek için tasarlanmıştır. Bu bir tür pasif titreşim kontrolüdür (Bahekar ve Manchalwar 2019).

Taban izolasyonu sert zeminlerde en iyi sonucu verirken gevşek zeminlerde performansı düşmektedir (Chaudhary, Devkota ve Singh 2019). Anwar ve diğerleri (2016) yılında yapmış oldukları çalışmada kireçtaşı, sert kil ve gevşek kum zeminler üzerine oturan 14 ve 18 katlı hem simetrik hem de asimetrik taban izolasyonlu yapıların sismik performansını incelemişlerdir. Çalışmada taban izolasyonunun en çok sert zemin için uygun olduğunu hem orta sıkı hem de yumuşak zeminler için önemli

olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca burulmayı kireçtaşı üzerinde %81, sert kil üzerinde %76 ve gevşek kum üzerinde %75 oranında azalttığı sonucuna ulaşmışlardır.

1.5.1.1.1. Kauçuk Mesnetler

Kauçuk mesnetler destek olarak çelik takozlara bağlı doğal kauçuk katmanlardan oluşur (Dezfuli ve Alam 2013). Mekanik özelliklerini artıran çeşitli katkıları eklenmesiyle üretilirler. Kauçuğun yapısı, içine konulan malzemelerin farkı, üretildiği ortam farkı gibi sebeplerden dolayı çeşitlere ayrılırlar. İzolatörün yanal rijitliğini kauçuğun rijitliği oluşturur. Deprem enerjisini ya içine eklenen kurşun çekirdek sönümler ya da yüksek sönümlü kauçuk mesnetler sönümler. Şekil 22’de kauçuk mesnetlere ait tipik bir histeresiz eğrisi görülmektedir.



Şekil 22. Kauçuk mesnetler için idealleştirilmiş (histeresiz) eğrisi (Arguc, Avsar ve Ozdemir 2017)

Kauçuk mesnetler genellikle yapının yanal sismik tepkisini yaklaşık %60 düşürebilen yatay izolasyon mesnetlerdir. Ancak düşey sismik etkisini azaltamayacağı gibi büyütemezler de. Bu kauçuk mesnetin yatay rijitliğinin binlerce katına eşdeğer düşey rijitliğe sahip olması gerçeğiyle açıklanabilir, ki bu da yaklaşık 0,1 s’lik daha küçük düşey temel periyot elde etmenin olası olduğu anlamına gelir ve düşey ivme spektrumunun can alıcı kısmında yer almasından sorumludur ve bu yüzden düşük

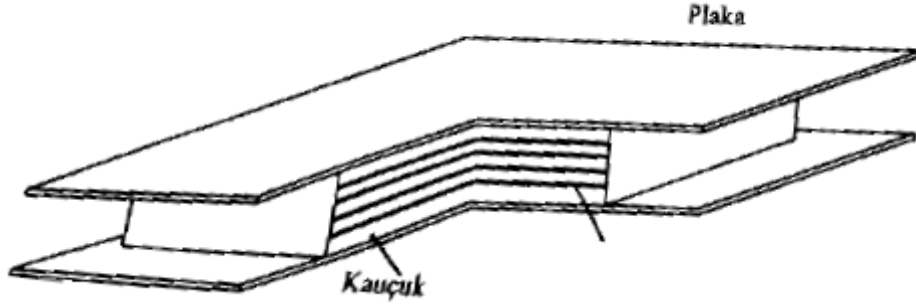
izolasyon özelliğiyle sonuçlanır. Ancak yaşanan son büyük depremlerde yüksek depremelliğe sahip bölgelerde oluşan güçlü düşey yer hareketlerinde, özellikle yakın fay alanlarında, yatay sismik davranış bileşenini bile aştığı görülmüştür. Yatay sismik davranış azaltıldıktan sonra yüksek tepe değerlere sahip düşey yer hareketinin özellikle hastane binaları ve sanayi tesisleri için yapısal yıkımın ana sebebi olacaktır. Zarar görür görmez bu binaların işlevi kalmayacaktır bu da toplumun psikolojisini mahvedecektir (Gu ve diğ. 2021).

1.5.1.1.1. Tabakalı kauçuk mesnetler

Tabakalı kauçuk mesnetler basit üretim, uygun kurulumu, nispeten düşük ücret ve yüksek taşıma kapasitesi nedeniyle küçük ve orta açıklıklı karayolu köprülerinde yaygın bir şekilde kullanılmıştır. Üstyapıyı ve altyapıyı birbirine bağlayan ana yapısal eleman olarak, tabakalı kauçuk mesnetler iletim bileşeni olarak önceden tanımlanmış güvenilir yol boyunca üstyapının taşıdığı araç yükü, rüzgâr yükü, sıcaklık yükü, deprem yükü ve diğer yükler tarafında oluşan kuvvetleri ve deformasyonları altyapıya aktarır (He ve diğ. 2023).

İç içe geçmiş çelik şimlere bağlı birkaç kauçuk tabakasından oluşur. Bu çelik şimlerin amacı mesnete düşey yük bindiğinde kauçuk katmanlarının büyük yanıl deplasman yapmasını önlemektir. Bu yüzden mesnetler büyük düşey rijitliğe sahiptir. Ayrıca bu sistemin en önemli özelliği sönümün ve rijitliğin paralel etkileri olmasıdır (Chang 2002; Uludağ 2005).

Tabakalı kauçuk mesnetler yakın fay hareketlerinden dolayı mesnet yer değiştirmeleri önemli olur ve bu da sistemin kararsız hale gelmesine neden olur (Jouneghani, Hosseini, Rohanimanesh ve Dehkordi 2023). Özuygur ve Noroozinejad Farsangi (2021) yılında yapmış oldukları çalışmada tabakalı kauçuk mesnet sisteminin belirli özelliklere sahip performansı, yakın fay hareketleri için uygun olmadığını bulmuştur. Şekil 23'te bir tabakalı kauçuk mesnet örneği görülmektedir.



Şekil 23. Tabakalı kauçuk mesnet örneği (Sun ve Zhufu 2022)

1.5.1.1.2. Kurşun Kauçuk Mesnetler

Yeni Zelandalı William Robinson tarafından icat edilmiştir. Dünya çapında en yaygın kullanılan sismik izolasyon sistemlerinden biri kurşun kauçuk mesnettir. Her biri, merkezinde yerleşmiş kurşun çekirdeğe sahiptir, üst üste bağlanmış kauçuk katmanlardan ve çelik plakalardan oluşur. Bu sistemde kauçuk düşük yanal rijitlikten sorumluyken kurşun çekirdek artan enerji dağıtma kapasitesi sağlar. Çelik plakalar izolatörün düşey rijitliğini artırır. İzolatörün yanal rijitliği ve dayanımı, sismik olarak izole edilmiş yapıların tasarımında iki temel parametredir (Yasar ve diğ. 2023; Çerçevik 2019). Şekil 24’te tipik bir kurşun çekirdekli kauçuk örneği görülmektedir.



Şekil 24. Kurşun çekirdekli kauçuk örneği (Yasar ve diğ. 2023)

1.5.1.1.1.3. Düşük Sönümlü Kauçuk Mesnet

Kauçuk tek seferde belirlenmiş sıcaklık ve basınç altında preslenerek üstte ve altta çelik levhaya bağlanır. Bu üst üste bindirilen levhalarla tabakanın şişmesi önlenir. Malzemenin kayma davranışı doğrusala yakındır. Sönüm oranı %2 ila %5 arasında değişir. Malzemede sünme görülmez. Uzun süreli elastisite modülü stabilitesi oldukça iyidir. Kolayca imal edilebilmeleri, kurulumun basit olması, ortamdan fazla etkilenmemeleri, yüklemeye anında cevap vermesi bu izolatörlerin başlıca avantajlarıdır (Aldemir ve Aydın 2005; Serino, Spizzuoco ve MR 2008). Ancak dezavantajları olarak sönüm oranının düşük olması, kayma modülünün 50 ila 200 psi arasında olması verilebilir (Ahmadzai 2022; Pianese, Milani ve Formisano 2022). Şekil 25'te tipik bir düşük sönümlü kauçuk mesnet örneği görülmektedir.



Şekil 25. Düşük sönümlü kauçuk mesnet örneği (Aldemir ve Aydın 2005)

1.5.1.1.1.4. Yüksek Sönümlü Kauçuk Mesnet

Sismik izolasyon cihazlarından biri olan yüksek sönümlü kauçuk mesnet, Japonya'daki 1995 Hyogo-ken-Nanbu depreminden sonra uygulamaya konulmuştur. Yüksek sönümlü kauçuk mesnetler doğal kauçuğun ve siyah karbon dolgu malzemesinin birleştirilmesiyle yüksek sönüm performansına sahip olurlar. Bu mesnetler ek sönüm veya cihaz olmadan mesnet ve sismik izolatör olarak davranabilmesi için tasarlanır. Ayrıca kurulumları basittir ve inşaat ve bakım maliyetleri düşüktür (Park ve diğ. 2020).

%10-%20 arasında eşdeğer viskoz sönüme sahiptirler. Yüksek başlangıç kayma modülüne sahiptir ve yaklaşık %400 gibi büyük kesme şekil değiştirmesi geçirebilir. Ancak sayısal modellemesi karmaşıktır ve büyük kesme deformasyonları altında doğrusal olmayan davranış gösterebilir (Aghaeidoost ve Billah 2022; Yoshida,

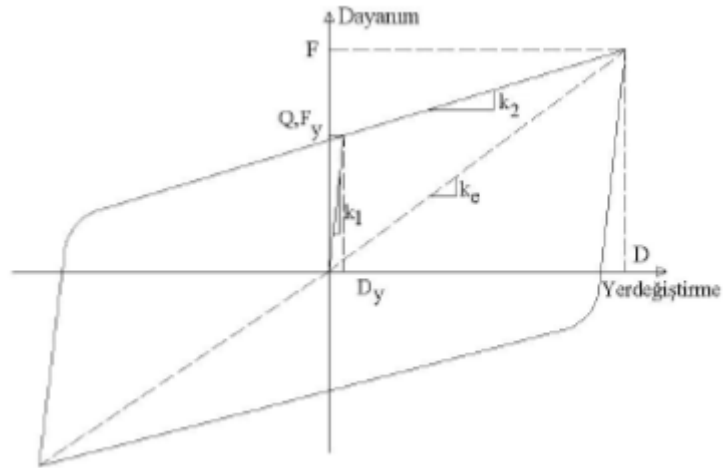
Abe ve Fujino 2004). Şekil 26’da yüksek sönümlü kauçuk mesnet örneği görülmektedir.



Şekil 26. Yüksek sönümlü kauçuk mesnet örneği (Çavdar ve Yıldız 2023)

1.5.1.1.2. Sürtünmeli Sarkaç Sistemler

Sürtünmeli sarkaç sistemler kaydırıcılar paslanmaz çelik ya da PTFE malzemeden oluşan içbükey bir küresel tava yüzey parçasında kayar bilyeden oluşurlar. Bu sistemler çelik malzeme arasındaki sürtünmeyle deprem enerjisini sönümler. İzolatörün rijitliği ve yapı periyodu sürtünen eğrisel yüzeydeki eğimlerle kontrol edilir (Yücesoy 2005; Sheikh, Van Engelen ve Ruparathna 2022). Sürtünmeli sarkaç sistemler için tipik histerezis eğrisi Şekil 27’de gösterilmektedir.



Şekil 27. Sürtünmeli sarkaç sistemler için idealleştirilmiş (histerezis) eğrisi (Ayhan 2006)

Sürtünmeli sarkaç sistem ilk kez Victor A. Zayas tarafından sunulmuş, modellenmiş ve test edilmiştir, 1987’de bir raporunda yayınlamış ve daha sonra 1990 yılında bir araştırma makalesinde yayınlamıştır. Bundan sonra Mokha ve diğerleri (1991) yılında büyük moment dirençli ve destekli çerçevelerde sürtünmeli sarkaç sistemin deneysel bir araştırmasını sunmuştur. Mokha ve diğerleri bu çalışmada azalmış ölçekli modelde sürtünmeli sarkaç sisteminin kurulumunun deneysel bir araştırmasını sunmuştur. Bu çalışma sırasında en büyük sürtünme katsayısı 0,075 ve 0,095 olan iki farklı mesnet malzemesine kullanılmıştır ve yapı farklı frekans içeriklerine sahip çeşitli güçlü yer hareketine maruz bırakılmıştır. Deneysel sonuçlardan mesnet deplasmanının düşük olduğu görülmüştür ve kalkma olmamıştır, ve ayrıca serbest titreşiminin sonunda, kalıcı mesnet deplasmanı tasarım mesnet deplasmanının %6’sından daha az olduğu bulunmuştur (Zhang ve Ali 2021).

1.5.1.1.2.1. Saf Sürtünmeli Sistem

Sürtünmeli sarkaç sistemlerin en çekici gelen özelliği çok çeşitli frekans girdileri için etkili olmasıdır. Diğer avantajı da en büyük sınırlayıcı sürtünme kuvvetine eşit olan maksimum ivmeyi iletebilmesidir. Bu sürtünmeli sarkaç sistemlerden birisi saf sürtünmeli sarkaç sistemdir (Shakib ve Fuladgar 2003b).

En basit sürtünme tipi izolatördür. Bu izolatör tipinde kayıcılar temel ve üst yapının tabanında bulundurulur (Etedali, Hasankhoie ve Sohrabi 2020).

Ancak eğer kütle merkezi saf sürtünmeli sistemli yapının rijitlik merkezi çakışmazsa, yanal depremler altında yapıda yanal ve burulma hareketleri görülecektir. Ayrıca, deprem sırasında yapı depremin düşey bileşenine de maruz kalacaktır, bu da saf sürtünmeli sistemli yapının hem yanal hem de burulma tepkilerini etkileyecektir (Shakib ve Fuladgar 2003a). Şekil 28’de tipik bir saf sürtünmeli sistem örneği gösterilmiştir.



Şekil 28. Tipik bir saf sürtünmeli sistem örneği (Polycarpou 2009)

1.5.1.1.2.2. Tek Eğrilikli Sürtünmeli Sarkaç Mesnet

Bu sistemde kayıcı elamanın bulunduğu bir tarafı düzken diğer tarafı iç bükey çelik elamandan oluşur. Temel olarak bir muhafaza plakası, bir içbükey plaka ve bir kaydırıcıdan oluşur. Deprem sırasında kaydırıcı esas olarak dikey basınca, yapı tarafından iletilen yatay kuvvete, destek kuvvetine ve içbükey yüzeydeki sürtünmeye maruz kalır. İzolatörün elastik rijitliğini iç bükey çelik elemanın eğrilik yarıçapı sağlar. Ancak izolatörün sönümünü teflon kaplamaları kayıcı birim ve paslanmaz çelik kayma yüzeyi arasında sürtünmenin sebep olduğu enerji kaybı sağlar. Şekil 29’da tek eğrilikli sürtünmeli sarkaç mesnet örneği gösterilmiştir (Chen ve Jia 2021; Dicleli 2013).

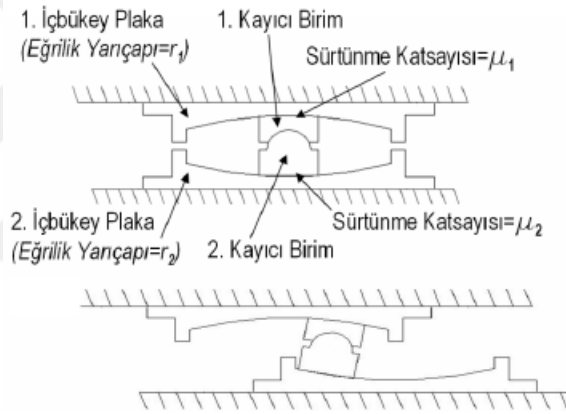


Şekil 29. Tek eğrilikli sürtünmeli sarkaç mesnet örneği (Dicleli 2013)

1.5.1.1.2.3. İki Eğrilikli Sürtünmeli Sarkaç Mesnet

İki eğrilikli sürtünmeli sarkaç mesnet dört ana elementten oluşur: içbükey plaka, kayıcı plaka, kayıcı birim ve kayma malzemesi. Kayıcı plaka paslanmaz çelikten yapılır ve içbükey plakalar denilen diğer çelik plakalara bağlanır. İçbükey

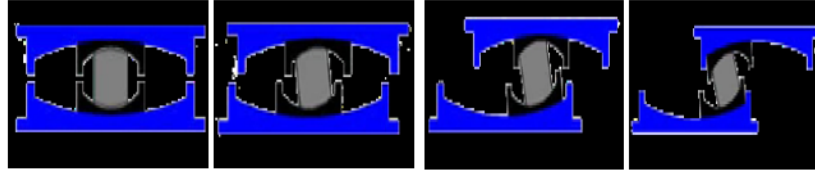
küresel kayıcı plakalar kayıcının üstüne ve altına yerleştirilir ve küresel bir şekil haline getirilir. Kayıcı hem üst hem de alt yüzeylere yerleştirilmiş bir kayma malzemesine sahiptir ve bu kayma plakası olarak aynı küresel yarıçapa sahip olması için işlenmiştir. Kayma malzemesi politetrafloroetilen doku ve yapışkanlığı artırılmış yüksek dayanımlı fiberden oluşan iki dokudan oluşmuştur. Bu kombinasyon yüksek mesnet gerilmesi altında dengeli bir sürtünme kuvveti verir ve izolatöre 60 MPa referans mesnet dayanımına ulaşmasını sağlar ve bu geleneksel mesnetin referans mesnet gerilmesinden yaklaşık üç kat daha yüksektir. Bu ayrıca iki eğrilikli sürtünmeli sarkaç mesnetin geleneksel mesnet kadar yoğun dış düzlem boyutlarına sahip olmasını sağlar (Imran, Siringoringo ve Michael 2021; Zhang ve Ali 2021). Şekil 30’da iki eğrilikli sürtünmeli sarkaç mesnet örneği gösterilmiştir.



Şekil 30. İki eğrilikli sürtünmeli sarkaç mesnetlerin basitleştirilmiş kesiti (TBDY 2018)

1.5.1.1.2.4. Üç Eğrilikli Sürtünmeli Sarkaç Mesnet

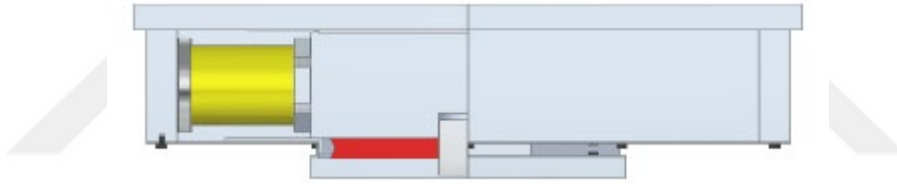
Bu mesnet dört içbükey yüzey ve üç bağımsız sarkaç sistemden oluşur. Farklı sürtünme katsayılarına sahip çoklu yüzeyleri uygulamak farklı tehlike seviyelerinde karmaşık sismik davranışa neden olur. Üç eğrilikli sürtünmeli sarkaç mesnetin deneysel doğrulamalı uygun bir döngüsel model dahil analitik davranışı Constantinou ve Fenz tarafından (2008)’de rapor edilmiştir (Loghman, Khoshnoudian ve Banazadeh 2013). Tipik bir üç eğrilikli sürtünmeli sarkaç mesnetin çalışma prensibi Şekil 31’de gösterilmiştir.



Şekil 31. Üç eğrilikli sürtünmeli sarkaç mesnetin çalışma prensibi (Dicleli 2013)

1.5.1.1.3. EradiQuake İzolatör

Bu sismik izolasyonun diğerlerine kıyasla tek avantajı izolatörün esnekliğinin sismik uyarımlar altında izolasyonlu yapıda arzu edilen performansa ulaşmak için farklı yönlerde değişebilmesidir. Kayıcı yüzey gereken deplasman kapasitesini sağlar ve sürtünmeyle girdi enerjisini dağıtır. Dönel kapasite poliüretan disk ile sağlanır ve merkezi mil üstyapıdan altyapıya uyarılmış yanıl kuvvetleri aktarır (Fatemi ve Conklin 2019). Şekil 32’de tipik bir EradiQuake izolatörünün bir örneği gösterilmiştir.

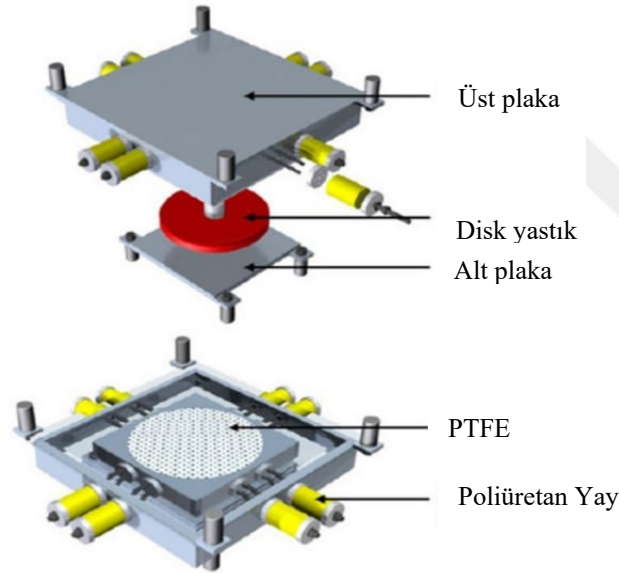


Şekil 32. Tipik çok yönlü EradiQuake sismik izolatörünün bileşenleri (Lee ve Cho 2013)

1.5.1.1.4. Esnek-Sürtünmeli Taban İzolasyon Sistemi

Monstaghel ve Khodaverdian’ın önerdiği bir sistemdir. Temel olarak sırasıyla köprünün üst yapısına ve alt yapısına sabitlenen üst ve alt plakalardan oluşur. Alt plakada, birincil sertliğe (K_u) sahip bir politetrafloroetilen sürtünme plakası sürtünme sönümlemesi yapar ve kayma esnek sürtünmesinin neden olduğu direnç kuvveti ile sismik enerjiyi dağıtır. Geri çağırıcı kuvvetleri üreten yanıl poliüretan yaylar, yer değıştirme tepkilerini tamamladıktan sonra politetrafloroetilen plakayı ilk konumuna geri getirir. İki plaka arasında bulunan poliüretan disk ped, üst yapıdan gelen dikey yüke maruz kalan ve dönmeye izin veren yüksek mukavemetli sert kauçuk bir diskler (Bang 2011). Önceki çalışmalardan sürtünme hızı arttıkça politetrafloroetilen plakanın yüzey sürtünme katsayısı artar. Ancak sürtünme hızı 150 m/s’nin üzerinde

olduğunda atmosferik sıcaklıktan ve sürtünme plakasının üzerine uygulanan normal kuvvetin büyüklüğünden etkilenmez. Ayrıca, politetrafloroetilen katsayısı ile temas basıncı arasındaki ilişkinin ters orantılı olduğu ve kayma hızı ile ortam sıcaklığının sürtünme katsayısının yoğunluğunu azalttığı ortaya çıkmıştır. Merkezde bulunan kauçuk çekirdek kısım izolatörün deplasmanı sırasında hızın izolatör yüksekliğince dağılmasını sağlar. Esnek sürtünmeli taban izolasyon sistemi, merkezi kauçuk çekirdeklerle birbirinin üzerinde kayabilen kayıcı halkalardan oluştuğu için kayıcı tipli izolasyon sistemleri grubuna girmektedir. Etkililiği yapılan deneylerle kanıtlanan sistem son yıllarda çok daha sık kullanılır hale gelmiştir (Ürkmezyel 2023; Döker 2020; Gil ve diğ. 2020). Şekil 33’te esnek-sürtünmeli taban-izolasyon sisteminin tipik bir örneği gösterilmiştir.

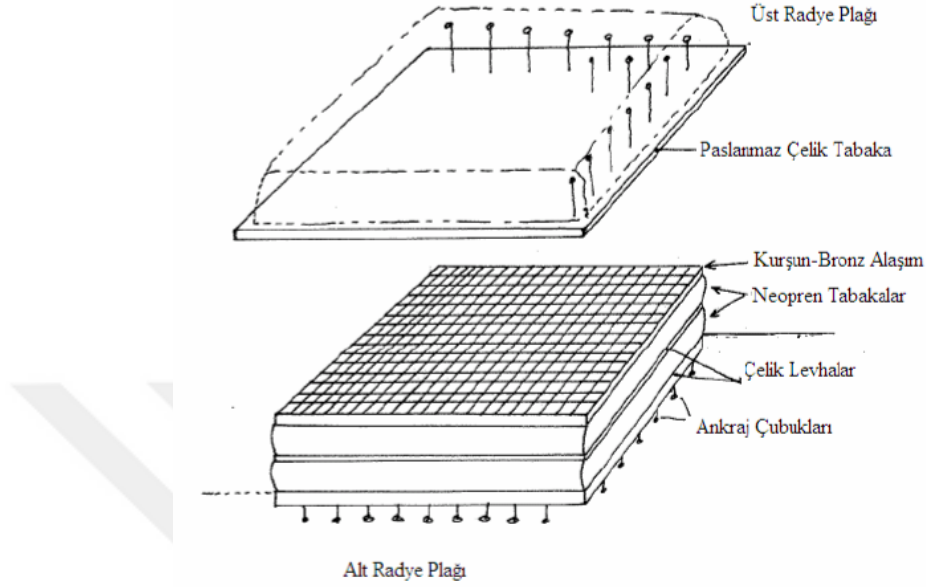


Şekil 33. Esnek-sürtünmeli taban-izolasyon sisteminin tipik bir örneği (Gil ve diğ. 2020)

1.5.1.1.5. Fransız Elektrik Sistemi

Bir dizi nükleer elektrik santrallerini ve fabrika tesislerini korumak için Fransa’da ilk uygulaması 1970’lerde yapılmıştır. İşe yararlılığı 0,2g ivme için nitelendirilmiş güvenlik sınıfı ekipmanlı bir standart nükleer elektrik santralini geliştirdi. Sistem paslanmaz çelik, elastomerik mesnet üzerine kurulmuş olan kayıcı yüzey ile temas halinde kurşun-bronz alaşımlı tabakalı neopren mesnetten oluşur.

Kayma yüzeyinin sürtünme katsayısı izolatörün servis ömrü boyunca 0,2 olduğu kabul edilir (Failla 2021). Şekil 34’te tipik bir Fransız elektrik sistemi örneği gösterilmiştir.

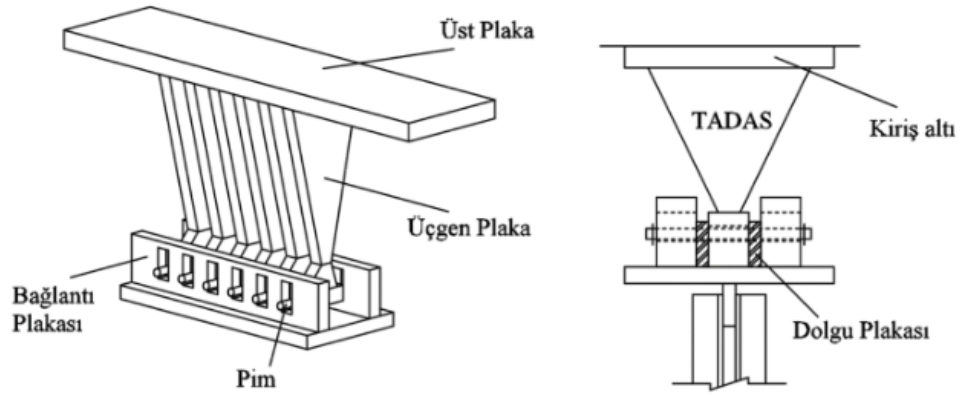


Şekil 34. Fransız elektrik sistemi detayı (Ürkmezyel 2023)

1.5.1.2. Pasif Enerji Sönümleyiciler

1.5.1.2.1. Metalik Sönümleyiciler

Kararlı histeretik davranışa sahip sönümleyicilerdir. Sıcaklıktan ve yükleme hızından etkilenmezler. Maliyet açısından diğer sönümleyici tiplerinden daha tercih edilebilir sistemdir (Yurteri ve Dügenci 2022). Şekil 35’te tipik bir metalik sönümleyici örneği gösterilmiştir.



Şekil 35. Bir metalik sönümleyici örneği (Ocak, Niğdeli ve Bekdaş 2023)

1.5.1.2.2. Visko-Elastik Sönümleyiciler

Çoğunlukla titreşimden kaynaklanan etkileri azaltmada kullanılırlar. Daha çok yüksek katlı binalarda rüzgârın etkilerini düşürmede kullanılırlar. Karbon polimeri vb. malzemelerden oluşur. Visko-elastik çelik levhalar arasına yerleştirilir ve kayma deformasyonu ile enerjiyi sönümler. Visko-elastik malzeme şekil değiştirmeye maruz kaldığında hem elastik hem de viskoz davranış gösteren malzemedir (Kaliyaperumal 2022; Khajehsaeid ve diğ. 2014).

Çelik yapılara uyumluluğu diğer tür yapılardan daha iyidir. Yapılan çalışmalara göre çelik yapılarda sönüm oranı daha fazla olmuştur. Fakat deplasman kapasitesi ve çevresel etkilere dayanıklılığı zayıftır. Bu yüzden sönümleyicide yırtılma oluşabilir (Şadan 2016; Lim ve Matsumoto 2006; Eskandari Nasab ve Kim 2022).

1.5.1.2.3. Akışkan Viskoz Sönümleyiciler

İlk kez askeriyede fırlatıcının yer değiştirmesini azaltmak amacıyla topların fırlatıcısına yerleştirilirdi. Daha sonra yavaş yavaş sivil hayatta kullanıma geçti ve çoğunlukla yapısal mühendislikte kullanıldı (Thomson 1965; Zhang, Zhang, Su, Zheng, ve diğ. 2023). 1990'lardan itibaren Makris, Constantinou ve Lee vd. akışkan viskoz sönümleyiciyi geliştirip enerji dağıtma mekanizmasını, akışkan malzemelerini ve akışkan viskoz sönümleyicinin termodinamik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmalarda su sonuçlara ulaşmışlardır: Viskoz akışkanın tamamen viskoz olduğu düşünüldüğünde, sönümleme kuvveti piston kolunun hızının bir gücüyle orantılıdır; piston geniş bir frekans aralığında hareket ederse, sönümleyicideki tüm akışkan visko-

elastik özelliklere sahip olacaktır. Ancak piston küçük bir frekansta hareket ederse, sönümleme katsayısı piston hareket frekansından neredeyse bağımsızdır ve sönümleyici içindeki akışkan viskoz özelliklere sahip olacaktır (Lee ve Taylor 2001; Zhang, Zhang, Su, Zheng, ve diğ. 2023).

Bu sönümleyiciler birkaç farklı şekilde uygulanabilirler. İlki viskoz akışkanlar içi boş olan çelik duvara doldurulur ve ardından üst döşemeye bağlanarak akışkanın içine metal levha eklenir. Depremde levha akışkan içerisinde enerjiyi dağıtır. İkincisi, içi pistonlu silindirin içine viskoz akışkanlar doldurulur. Viskoz akışkan içerisinde pistonun hareket etmesiyle oluşan mekanik enerjiyi ısı enerjisine dönüştürerek titreşim enerjisini sönümler. Üçüncüsü, viskoz akışkanlar çelik kafes gibi belirli bazı kanalların içerisinden geçirilerek enerjiyi sönümler (Arvind ve Santhi 2022; Zhang, Zhang, Su, Chen, ve diğ. 2023).

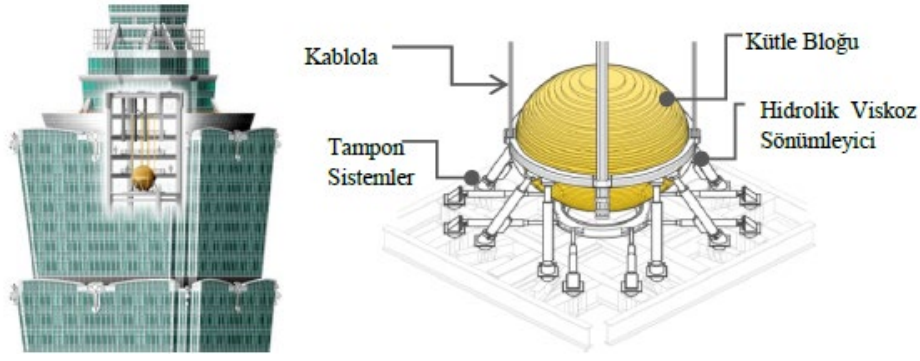
Akışkan viskoz sönümleyicilerin yağ sızıntısı, sınırlı servis ömrü, viskoz özelliğinin yüksek sıcaklığa duyarlı olması, kurulum ve bakım zorluğu gibi bazı kusurları mevcuttur (Liu ve diğ. 2020).

1.5.1.2.4. Ayarlı Kütle Sönümleyici

Ayarlı kütle sönümleyiciler en eski sönümleyicidir. Bir kütle, bir yay ve bir sönümleyiciden oluşur, deprem ve rüzgârdan dolayı oluşan binaların tepkilerini kontrol etmek amacıyla binaların en üst katlarına eklenir. Pasif, aktif, karma ve yarı aktif olacak şekilde dörde ayrılırlar. Pasif ayarlı kütle sönümleyiciler, enerji kaynağına ihtiyaç duymadan titreşimi azaltabildikleri için kullanımı diğerlerinden daha yaygındır (Naimi ve Waheb 2019).

Bu sistemi ilk kez Frahm ortaya atmıştır (Frahm 1909). Ancak onun tasarladığı sistemde sönümleyici bulunmamaktadır. Bu sebepten sönümleyicinin frekansı ile yükün frekansı yaklaşık eşit olursa etkili olur (Kahya ve Onur 2020).

Ayarlı kütle sönümleyiciler ya da yapının doğal frekansında oluşabilecek hatalarda ayarlı kütle sönümleyiciler sisteminin kontrol performansını olumsuz etkiler. Buna frekans kayması denilir (Kahya ve Onur 2020). Şekil 36'da bir ayarlı kütle sönümleyici örneği görülmektedir.



Şekil 36. Ayarlı kütle sönümleyici (Naimi ve Waheb 2019)

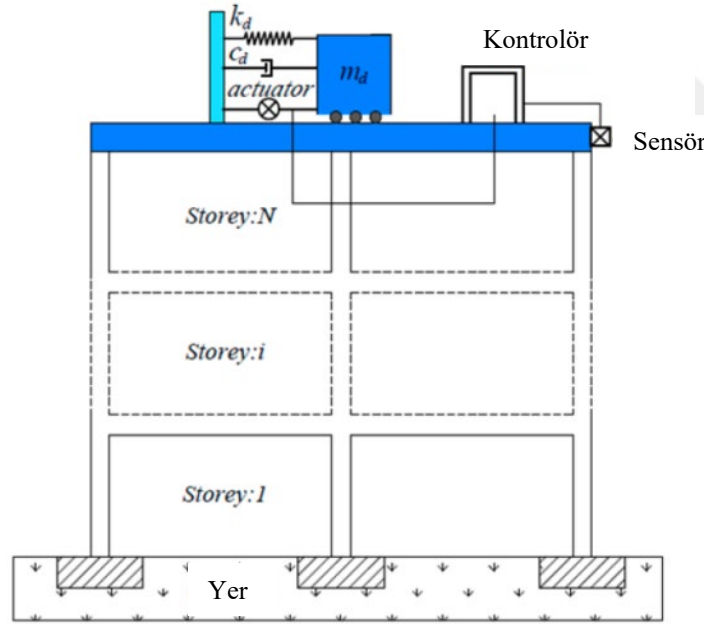
1.5.2. Aktif Kontrol Sistemleri

Aktif kontrol sistemlerde harici bir enerji kaynağı analog ya da dijital sinyaller sayesinde aktifleşir. Bu sinyalleri yapının hareketini ölçen kontrol algoritmasına sahip bilgisayar oluşturur. Aktif kütle sönümleyici (AMD), aktif ayarlı kütle sönümleyici (ATMD), aktif tendon sistemleri, aktif destek sistemleri, çapraz sistemler ve darbe üretme sistemleri gibi pek çok aktif kontrol sistemleri mevcuttur (Abdel-Rohman ve Leipholz 1983; Kavyashree, Patil ve Rao 2021). İlk aktif kontrol sistemleri Japonya’da 1989’da 11 katlı bir bina olan Kyobashi Seiwa için gerçek bir uygulamada kullanıldı. Bu sistem Kajima şirketi tarafından kuruldu (Pastia ve diğ. 2005; Kavyashree, Patil ve Rao 2021). Binanın analizi farklı frekanslar ve farklı hareket türleriyle binanın farklı mod şekilleri gösterdi, böylece iki aktif kütle sönümleyici enine ve burulma hareketini kontrol etmede kullanılmıştır (Lavasani ve Doroudi 2020; Naimi ve Waheb 2019; Yanık ve Aldemir 2019).

Pek çok çalışmada yapısal tepkiyi düşürmek için bu cihazı kullandığı gibi sönümle ilgilenen ve titreşimi azaltan değişken rijitlik sönümleyici isimli rijitliği değiştiren bir kontrol algoritması vardır. Doğrusal optimal kontrol, kutup atama tekniği, bağımsız modal alan kontrolü, ani optimal kontrol, sınırlandırılmış durum kontrolü, doğrusal olmayan kontrol, genelleştirilmiş tepki kontrolü, kayan kipli denetim, zaman gecikme telafisi, sinirsel ağ kullanarak aktif kontrol ve bulanık mantık yapıyı kontrol eden aktif kontrol algoritmalarından bazılarıdır (Kavyashree, Patil ve Rao 2021).

1.5.2.1. Aktif Ayarlı Kütle Sönümleyiciler

Bir aktif sistem türü olan aktif ayarlı kütle sönümleyiciler, değişken frekanslarda uygulanabilirliğini artırmak için TMD sistemine aktif bir kontrol mekanizması (sensör, kontrolör ve aktüatör) eklenerek türetilmiş bir sistem olarak tanımlanabilir. Üst katın tepkisi, zamanla değişen kontrol kuvveti doğrusal dinamik aktüatörleri oluşturmak için kontrolörün geri beslemesi olarak kullanılır. Uygulamalarda, sensörler ve farklı aktüatör türleri için farklı ve çoklu geri bildirimler de kullanılabilir. Tokyo, Japonya'daki Shinjuku Park Kulesi (227 m), Incheon, Kore'deki Incheon Uluslararası Havaalanı Kontrol Kulesi (100,4 m), Edinburgh, İngiltere'deki Hava Trafik Kontrol Kulesi (57 m) ve Şangay, Çin'deki Şangay Dünya Finans Merkezi (492 m) gibi ATMD'lerin birkaç pratik örneği vardır (Gutierrez Soto ve Adeli 2013; Kayabekir ve diğ. 2020). Şekil 37'de aktif ayarlı kütle sönümleyici şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 37. Aktif ayarlı kütle sönümleyicileri (ATMD) sistemine sahip yapının genel bileşeni (Kayabekir ve diğ. 2020)

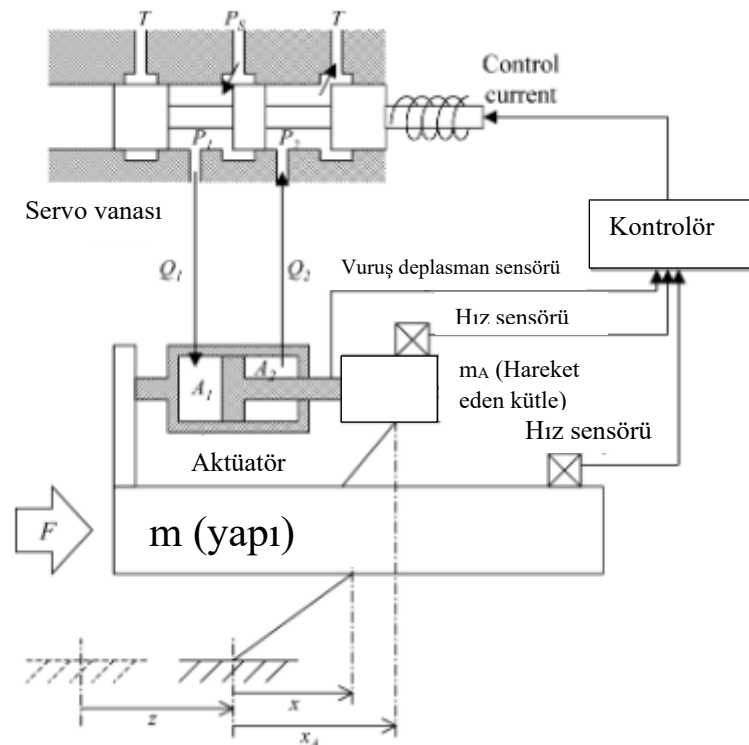
1.5.2.2. Aktif Kütle Sönümleyiciler

Aktif kütle sönümleyiciler kontrol kuvveti oluşturmak için elektromekanik ya da elektrohidrolik çalıştırıcı ile hareket ettirilen bir atalet kütlesinden oluşur. Ayarlı

kütle sönümleyiciler 1980'lerden beri çalışılmış olsa da onlar çok küçük sayıda yapıda uygulanmıştır (Yamamoto ve diğ. 2001).

Büyük inşaat yapılarında titreşim bastırma için diğer geleneksel teknolojilere kıyasla aktif kütle sönümleyicilerin avantajı kısaca yinelenmesidir. İzolasyon sistemleri ya da yapısal çelik gibi diğer pasif sistemlere kıyasla ayarlı kütle sönümleyici mevcut yapılara istilacı bir müdahale ve ilişkili zorluklar gerek duymadan kurulabilir (Rosti ve diğ. 2022).

Literatürde, ayarlı kütle sönümleyicinin mevcut bir yapıya ilk uygulamalarından biri 2001 yılına dayanmaktadır (Ikeda ve diğ. 2001). Ikeda ve ark. çalışmalarında 11 katlı bir binaya iki adet hidrolik aktif kütle sönümleyici uygulamışlardır. Cihaz, bina üzerinde hem rüzgâr hem de sismik etkilerden kaynaklanan titreşimleri azaltsın diye kullanılmıştır. Saha içi veriler örneklenmiş ve cihazın güçlü rüzgâr durumunda konforu artırmadaki etkinliğini göstermiştir (salınım genliğini azaltarak). Ayarlı kütle sönümleyicinin kurulduğu dönemde meydana gelen bazı depremler de sistemin kontrol edilen yapının yapısal sönümlemesini artırmadaki etkinliğini göstermiştir (Rosti ve diğ. 2022). Şekil 38'de aktif kütle sönümleyici şematik olarak gösterilmiştir.



Ancak binayı kontrol etmede güçlü olmaması ve yüksek derecede doğrusal olmayan olması gibi bazı dezavantajları da mevcuttur (Kavyashree, Patil ve Rao 2021).

Aktif kontrol sistemin avantajı onu pasif kontrol cihazında görülen gerçek zamanlı uygulamada gerekli frekansa ayarlamaktır. Ancak bazı dezavantajlar, inşaat mühendisliği sanayilerinde aktif kontrol sistemin sınırlı uygulamasını meydana getirmiştir. Ana dezavantajı kontrol kuvvetin üretimi için dış kuvvet kaynağının kullanımıdır. Maliyet ve büyük dış kaynak tedariki, binanın tepkisini azaltmak için tahrik düzeneği tarafından büyük kontrol kuvvetini çıkarmak için gerekir. Bir diğer dezavantajı deprem gibi herhangi bir belirsizlik esnasında eğer güç kaynağı bina ile bağlantısı kesilirse kontrol kuvvetin en büyük gereksiniminde inaktif olması muhtemeldir ki bu da onu bozuk cihaz yapar (Kavyashree, Patil ve Rao 2021).

1.5.2.5. Aktif Ayarlı Sıvı Kolon Sönümleyiciler

Aktif ayarlı sıvı kolon sönümleyiciler rüzgâr kaynaklı titreşimleri önemli ölçüde azaltabilirler. Balendra ve diğerleri 2001’de yapmış oldukları çalışmada kulelerin rüzgâr kaynaklı ivme tepkilerini azaltmada etkili olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca aktif ayarlı sıvı kolon sönümleyicilerin ivme sensör türünün hız sensör türü ve yer değiştirme sensörü türünden daha etkili olduğunu bulmuşlardır (Balendra, Wang ve Yan 2001).

1.5.3. Yarı-Aktif Kontrol Sistemleri

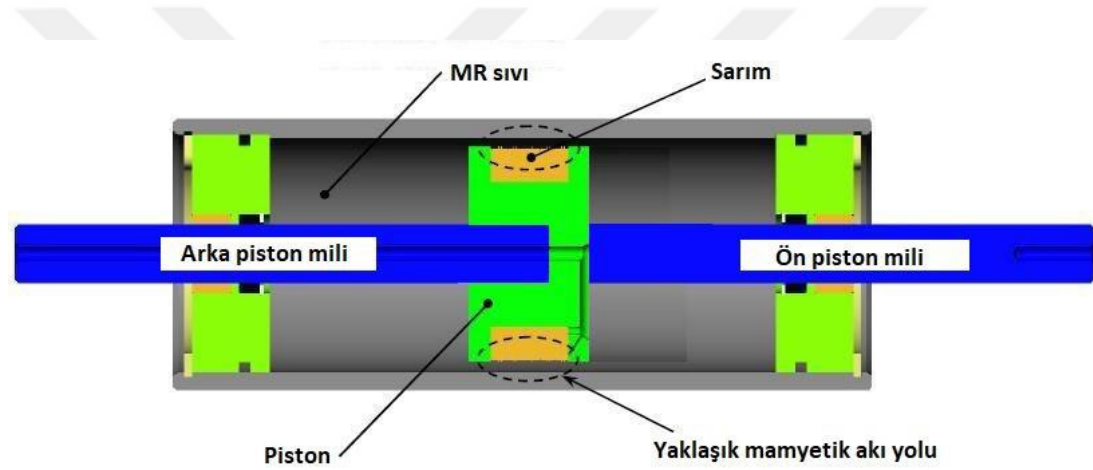
Hem pasif hem de aktif cihazların olumlu taraflarıdır. Maliyet ve karmaşıklık açısından aktif kontrol sistemleri ile pasif kontrol sistemlerinin arasında yer alır (Gorantiwar ve diğ. 2020). Aslında pasif kontrol sisteminin geliştirilmiş bir versiyonudur. Temel fark, yarı-aktif kontrol sisteminin parametrelerinin giriş uyarımına bağlı olarak değiştirilebilmesidir. Avantajları yüksek düzeyde sağlam olması, sınırlı olmasa da küçük güç kaynağı sayılabilir (Hojat Jalali ve diğ. 2023). Bu cihazlar, yapısal sisteme enerji ekleyemeyen yapının hareketi sonucunda kuvvet üretir. Bu sistemlerin çalışması dış güç kaynağına bağlıdır.

Yarı aktif sistemler talebi karşılar şekilde tasarlandığında sismik uyarımın neden olduğu hasarları düşürmede etkili olabilir. Yarı aktif kontrollere sadece pasif kontrollere kadar güvenilir değillerdir, aynı zamanda aktif kontrollere kadar ayarlanabilir

ve uyum sağlayabilir. Hal böyle olunca da son yıllarda önem kazanmıştır (Lavasanı ve Doroudi 2020; Cheng, Jiang ve Lou 2008).

1.5.3.1. Manyeto-Reolojik Sönümleyici

Bir yarı aktif kontrol sistem türüdür. Manyeto-Reolojik akışkanlarını içeren hidrolik silindiri dâhil eder. Manyetik alanı uygulayarak Manyeto-Reolojik akışkanın viskozitesi artar ve bir yarı katıya dönüşür. Manyeto-Reolojik sönümleyiciler karma sistem olarak kullanabilmek için ayarlı kütle sönümleyicilerle birleştirilebilir (Lavasanı ve Doroudi 2020; Hojat Jalali ve diğ. 2023; Jung ve diğ. 2004). Şekil 39’de Manyeto-Reolojik sönümleyici örneği gösterilmiştir.

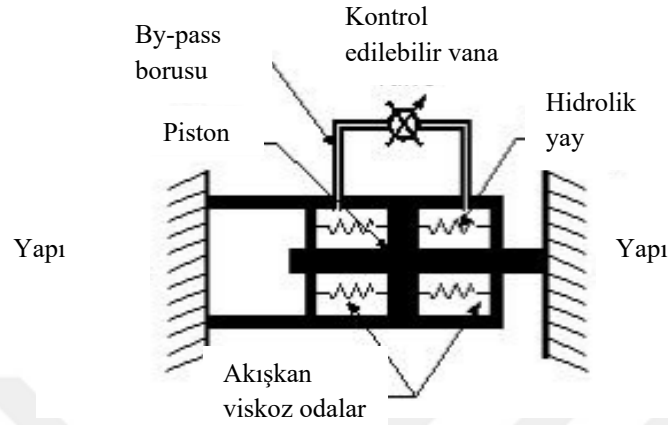


Şekil 39. Manyeto-reolojik sönümleyici örneği (Engin ve diğ. 2021)

1.5.3.2. Değişken Orifis Sönümleyici

Ekstra güç ya da sensör olmadan sönümlemesini yer hareketini frekansına göre uyarlayabilen yarı-aktif kontrol sistemi sınıfına giren bir sönümleyicidir (Li ve diğ. 2022). Yapının yanal desteği içinde ya da sismik izolasyon sisteminin bir parçası olarak kullanabilen yaygın bir yarı-aktif hidrolik cihazdır. Cihaz tepki kuvvetini kontrol etmek için bir vana içeren yan geçit borusu üzerinde değişken orifisle birleşen bir akışkan viskoz sönümleyiciden oluşur. Cihazın sönüm özellikleri pistonun bir odacığından diğerine yan geçit borusuyla arasında geçen değişken sıvı miktarıyla (vana tamamen açıldığında düşük sönüm, vana tamamen kapatıldığında yüksek sönüm) iki sönüm değeri arasında kontrol edilebilir. Vana açılma sürecinin orta konumunda cihaz belirli sönüm dağıtımı üretir. Vananın kurulumu genellikle

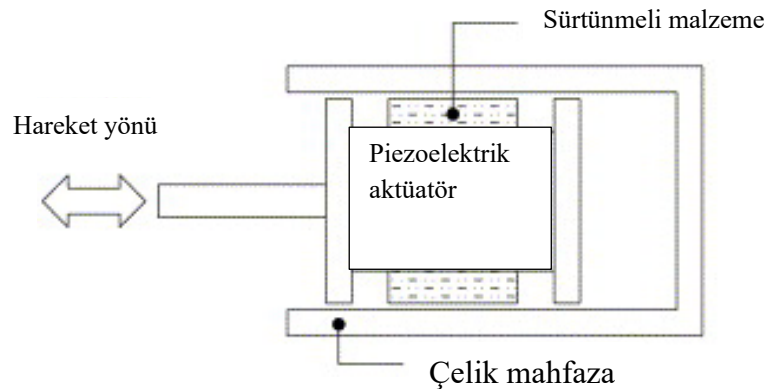
elektromekanik olarak kullanılabilir (örneğin servo vanası ya da elektromanyetik supap) (Luca ve Pastia 2009). Şekil 40'ta bir değişken orifis sönümleyici örneği gösterilmiştir.



Şekil 40. Değişken orifis sönümleyici örneği (Luca ve Pastia 2009)

1.5.3.3. Değişken Sürtünme Sönümleyici

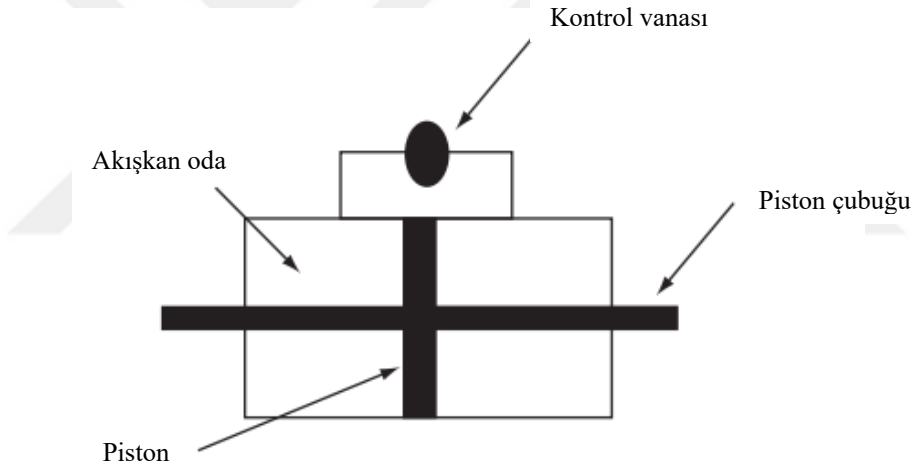
Sürtünme kuvvetini daha sonra ayarlamak için sıkıştırma kuvveti düzenleyicisi olarak piezoelektrik aktüatör kullanan değişken sürtünme sönümleyici, son yıllarda tatmin edici performansla vurgulanan en çok çalışılan şemadır. Piezo tipi değişken sürtünme sönümleyicinin çalışması için sürtünme malzemeleri üzerindeki sıkıştırma kuvveti büyüklüğünü kontrol etmek için piezoelektrik aktüatöre giriş voltajı seviyesini manipüle edilmelidir. Normalde, sıkıştırma kuvveti voltaj seviyesi ile orantılıdır. (Ng ve Xu 2007). Şekil 41'de bir değişken sürtünmeli sönümleyici örneği gösterilmiştir.



Şekil 41. Değişken sürtünmeli sönümleyici şematik diyagramı (Ng ve Xu 2007)

1.5.3.4. Değişken Rijitlikli Sönümleyiciler

Yarı aktif değişken rijitlikli sönümleyici sistemler sönümün kontrol vanasını dinamik olarak değiştirebilirler, böylece yapıda enerji giderme gerçekleşir. Yapısal tepkilerde tepki bilgisine dayanarak kontrol cihazı yapının çapraz desteğine bağlanan enerji yayma cihazlarının kontrol vanasını devre dışı bırakabilir veya çalıştırabilir. Yapı maksimum deplasman konumuna ulaştığında ve zıt yönde hareket etmeye başladığında, enerji sönümleme cihazları kontrol sistemiyle açılır ve desteklerin rijitliği sıfır olur. Destekler tarafından emilen sismik enerji, enerji sönümleme cihazlarına bırakılır ve enerji sönümleme cihazları kapatıldığında, yapısal bileşenlerin destekleri sismik enerjiyi emen belirli bir rijitlik sağlar. (Kori ve Jangid 2007; Walsh, Sallar ve Steinberg 2019). Şekil 42’de bir değişken rijitlik sönümleyici örneği gösterilmiştir.



Şekil 42. Değişken rijitlik sönümleyici sistemin şematik gösterimi (Kori ve Jangid 2007)

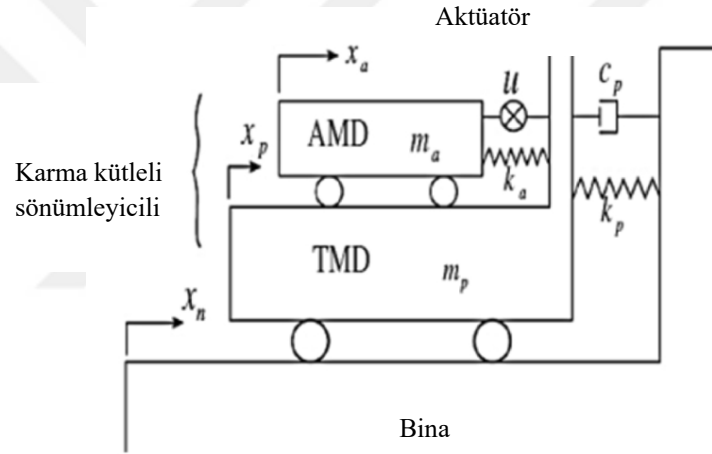
1.5.4. Karma Kontrol Sistemleri

Bu sistemler pasif ve aktif veya yarı-aktif cihazların bir birleşiminden oluşur (Fisco ve Adeli 2011). Bu sistemler umut verici çözüm olmuşlardır çünkü onlar pasif, aktif ve yarı-aktif kontrol sistemlerin avantajlarına sahiptirler. Pasif kısmı yapısal tepki azaltmaya çalışır ve arzu edilebilir sınırlar içerisinde yapının performansını tutar. Aktif kısmı tepkiyi ayarlamak ve düzenlemek için uygulanır. Karma kontrol sistemleri farklı yoğunluklu ve frekans aralığına sahip farklı uyarım tiplerine maruz bırakılmış yapıları korumak için etkilidirler. Karma kontrol sistemleri birleşik aktif ve pasif kontrol

sistemlerini kullanır (Rahimi, Aghayari ve Samali 2020). Karma kontrol sistemlerinden bazıları aşağıda verilmiştir.

1.5.4.1. Karma Kütle Sönümleyiciler

Optimum TMD ve aktif sönümleme cihazlarının davranışlarını birleştirerek aynı anda çeşitli hedefleri gerçekleştirmeye çalışır. Bu uygulamaya dayanarak, amaçlar değişebilir. Karma kütle sönümleyici performansı artırabilir, güç tüketimini azaltabilir, hareket eden kütle vuruşunu azaltabilir, gömülü kütleyi azaltabilir ve bozulmaya karşı koruma mekanizmasını sağlayabilir. Yani, bu sönümleyici kapatıldığında bile hala etkilidir (Chesné ve diğ. 2019). Şekil 43'te karma kütle sönümleyici örneği gösterilmiştir.



Şekil 43. Karma kütle sönümleyici (Kavyashree, Patil ve Rao 2021)

1.5.4.2. Taban İzolasyonlu Ayarlı Kütle Sönümleyiciler

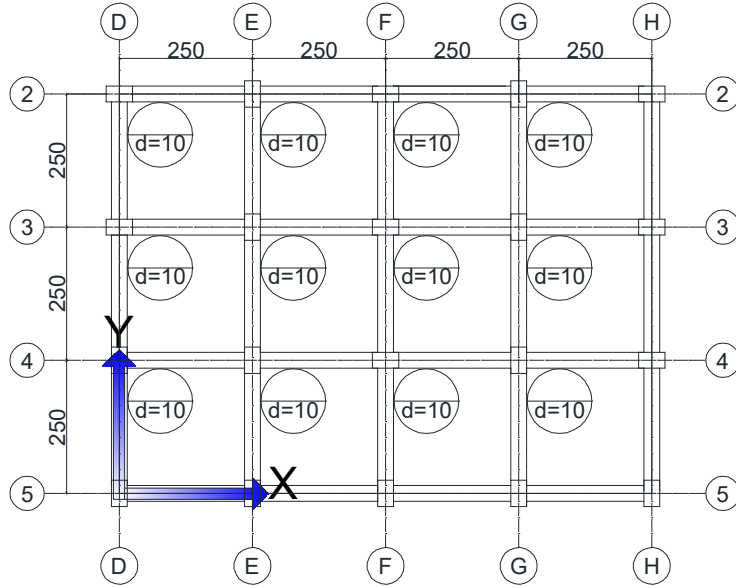
Çeşitli araştırma çabaları, taban izolasyonu alt sisteminin yer değiştirme talebi düşünün diye birçok farklı stratejiye başvurmuştur. Önceki araştırmalar, taban izolasyonlu yapıların pasif, aktif veya yarı aktif cihazlarla birleştirilmesinin taban izolatörünü daha da etkili hale getirebildiğini göstermiştir (Salaas ve diğ. 2023). Barbat ve diğ. (1995)'de, pasif doğrusal olmayan taban izolatörlerini aktif bir kontrol sistemiyle birleştirerek toplam taban yer değiştirmesini düşürmeyi amaçlamıştır. Bunun ötesinde, diğer araştırmacılar bir taban izolatörü ve ayarlı kütle sönümleyicisinin (TMD) birleşiminden oluşan pasif bir hibrit kontrol önermişlerdir (Tsai 1995).

1.5.4.3. Manyeto-Reolojik Sönümleyici ve Ayarlı Kütle Sönümleyici

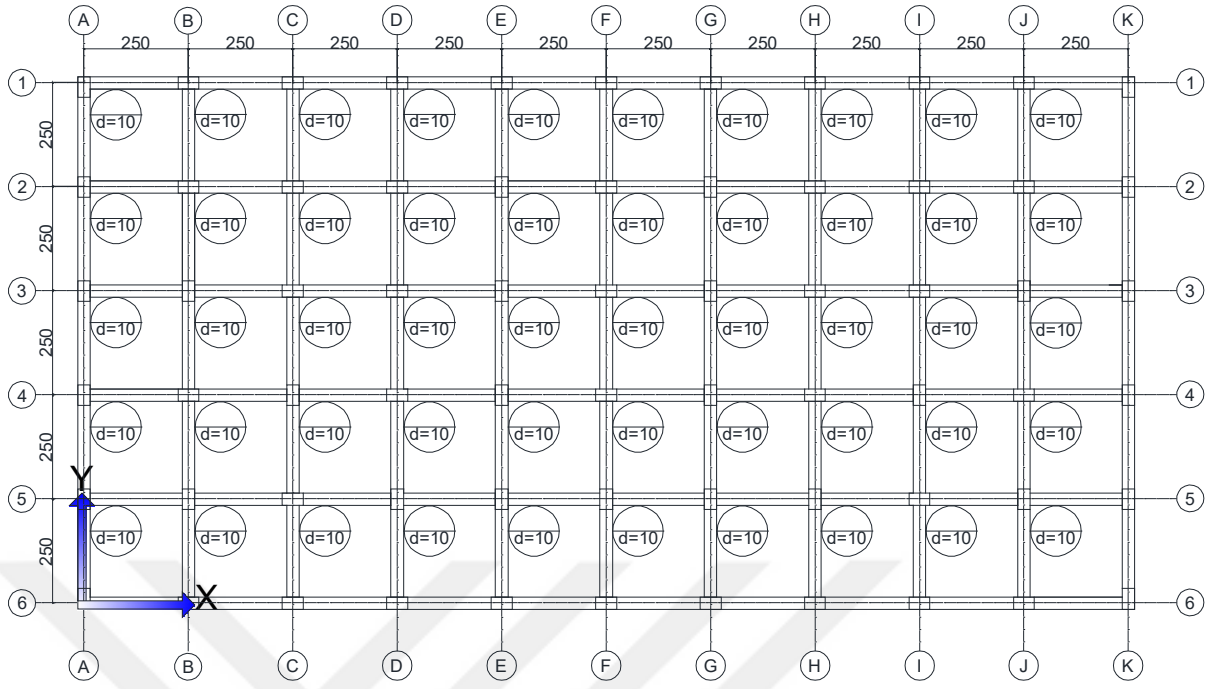
Manyeto-reolojik sönümleyiciyi ayarlı kütle sönümleyici gibi pasif cihazlarla birleştirerek, birçok araştırmacının gösterdiği gibi mükemmel sonuçlara ulaşabilen hibrit bir kontrol sistemi oluşturulur. Amini ve Doroudi (2010) yılındaki yapmış oldukları vaka çalışmasında 14 katlı bir ana bina ve 8 katlı bir podyum yapılı bir bina kompleksini çalışmışlardır. Performans değerlendirmesi üç farklı kategoriye ayrılmıştır: bunlardan birincisi, yarı aktif kontrol stratejilerinin analizi; ikincisi hem ayarlı kütle sönümleyici hem de manyeto-reolojik sönümleyici içeren hibrit yarı aktif kontrolün incelenmesi ve son olarak üçüncüsü, sadece ayarlı kütle sönümleyici kullanımıyla pasif kontrolün değerlendirilmesi. Etkili kontrol güçlerini kolaylaştırmak için, manyeto-reolojik sönümleyici uygun voltajı belirleyebilen ve uygulayabilen bir kontrolör tasarlasın diye bulanık mantık kabul edilmiştir. Sayısal bulgular, yarı aktif kontrol ve hibrit yarı aktif kontrol uygulandığında her iki binanın sismik tepkilerini büyük oranda azalttığını göstermiştir (Brandão ve Miguel 2023).

2. SAYISAL ÖRNEK

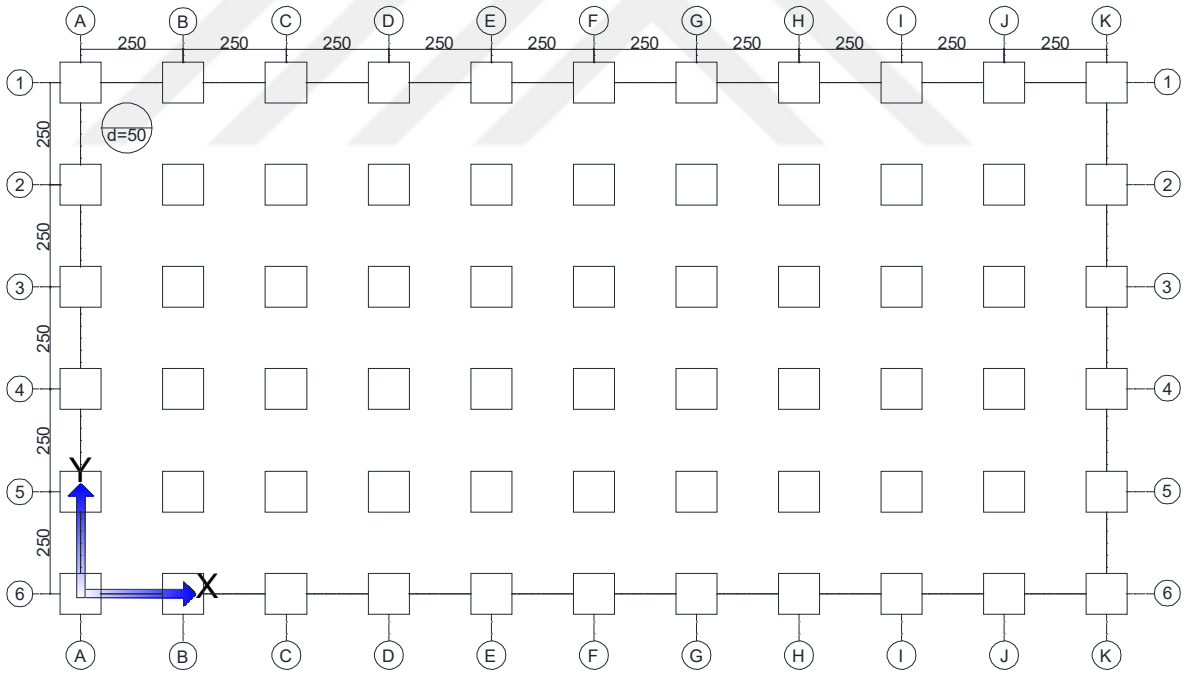
Bu çalışma kapsamında 3 boyutlu geleneksel yöntemle Z+5 katlı bir hastane binasının İDECAD v10.94 paket programında kontrollü hasar performans seviyesinde olduğu görülmüştür. Bunu kesintisiz kullanım seviyesine çekmek için katlar arası izolasyonu ve akışkan viskoz sönümleyiciden yararlanılacaktır. Bunun için Sİ'suz, KAİ'li, AVS'li ve KAİ+AVS 1'li ve KAİ+AVS 2'li olacak şekilde 5 farklı bina modeli yapı-zemin etkileşimi de dikkate alınarak analiz edilmiştir. Bina SAP2000 V23.0.0 paket programında modellenmiştir. Sadece zemin katının yüksekliği 4,5 metredir. Diğer katlar 3 metre yüksekliğindedir. Yapı x yönüne paralel 6 aksa, y yönüne paralel 11 aksa sahiptir. Her bir aksın aralığı 2,5 metredir. Yapıda kullanılan beton C30/37, donatı B420C'dir. Kirişlerin boyutları 30x40 cm, kolonların boyutları ise 50x30 cm'dir. Döşeme kalınlıkları 10 cm'dir. Yapı çerçeve sistemidir. Yapı radye temelin üzerine oturtulmuştur. Radye temelin kalınlığı ise 100 cm'dir. Döşemelere gelen sabit yük $1,6 \text{ kN/m}^2$, hareketli yük 2 kN/m^2 'dir (TS498). Binanın kat kalıp planları, önden görünüşleri ve soldan görünüşleri plan Şekil 44. ile Şekil 50'de görülmektedir. Planlarda görülen açıklıklar cm cinsinden verilmiştir.



Şekil 44. Çatı katı kat planı

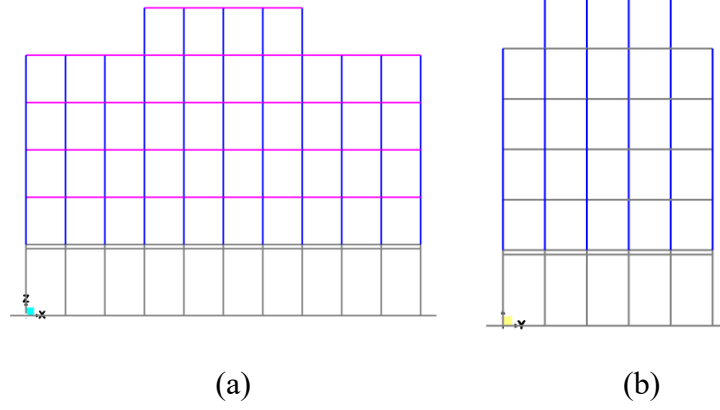


(a)

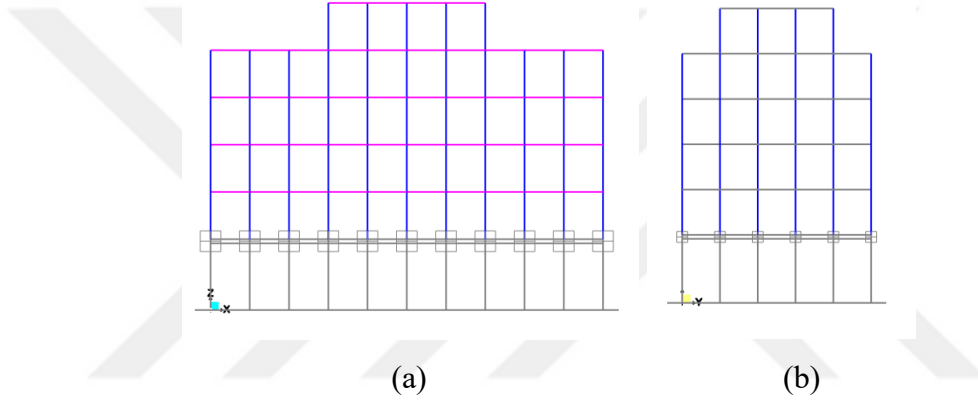


(b)

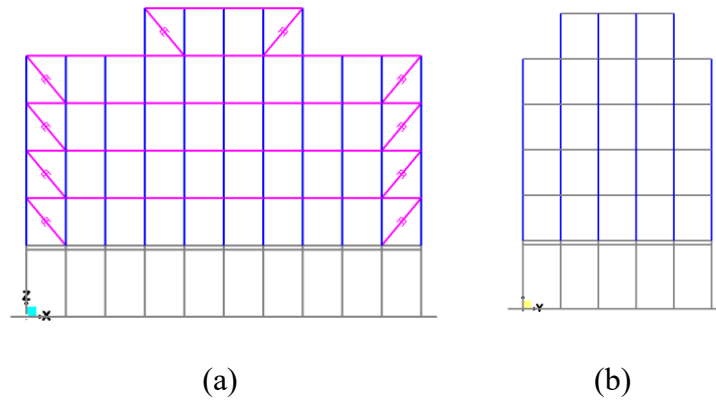
Şekil 45. (a) Normal kat planı (b) Yalıtım katı kat planı



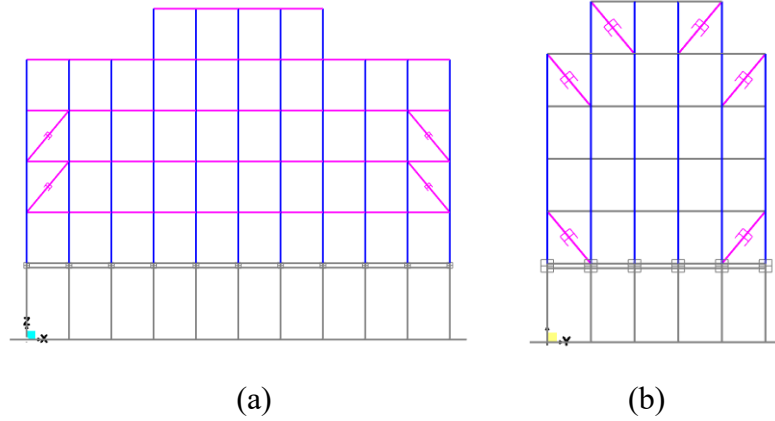
Şekil 46. Yalın yapının (a) önden görünümü (b) soldan görünümü



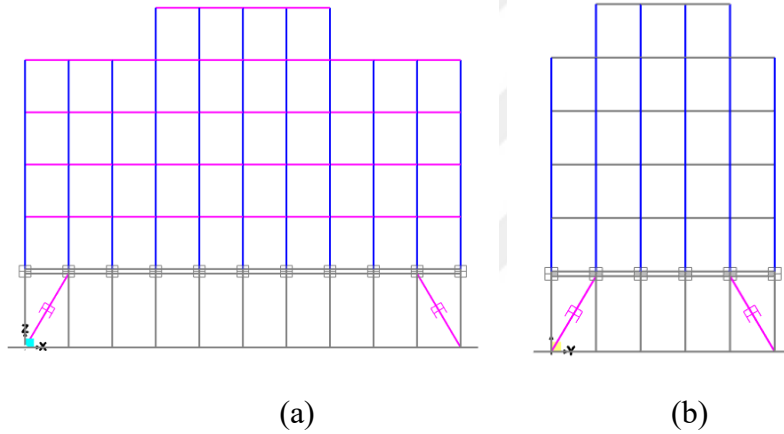
Şekil 47. Katlar arası izolasyonlu yapının (a) önden görünümü (b) soldan görünümü



Şekil 48. Akışkan viskoz sönümleyicili yapının (a) önden görünümü (b) soldan görünümü



Şekil 49. Üstyapıya akışkan viskoz sönümleyicinin eklendiği katlar arası izolasyonlu karma yapının (a) önden görünümü (b) soldan görünümü



Şekil 50. Altyapıya akışkan viskoz sönümleyicinin eklendiği katlar arası izolasyonlu karma yapının (a) önden görünümü (b) soldan görünümü

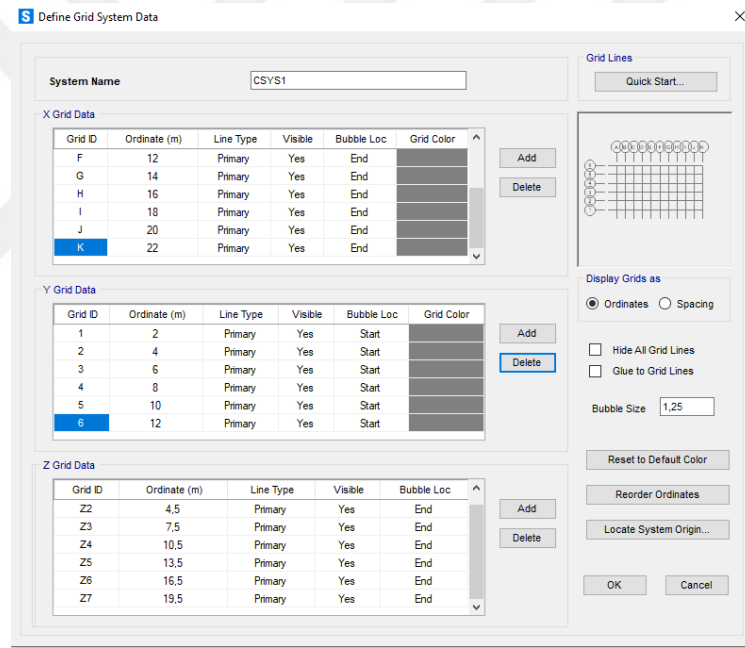
2.1. Bina Modelleme Süreci

İlk önce New Model komutundan 3DFrames seçilir. İlgili parametreler seçilerek binanın aksları oluşturulur. Programa tanıtılan akslar Şekil 51’de görülmektedir. Ardından malzemeler programa girilir. Kullanılan malzemelerin özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Malzemeler programa tanıtıldıktan sonra kesit boyutları tanımlanır. Bunun için Define→Section Properties→Frame Sections komutuna tıklayarak Frame Properties penceresi açılır. Açılır pencereden Add New Property konutuna tıklanır ve Add Frame Sections Property penceresi açılır. Pencerede üstte Frame Section Property Type bölümünden Other bölümüne tıklanır. Click to Add a Section kısmında Section

Designer seçilir. Burada projeye göre kiriş ve kolon kesitleri boyutları, donatıları, malzemeleri ile tanımlanır. Bunlar Şekil 52’de görülmektedir. Kolon boyuna donatıları normal katlarda ve çatı katında 10Ø14 etriyeleri açıklıkta Ø8/15 sarılma bölgesinde Ø8/8, yalıtım katı kolon boyuna donatıları 32Ø20 etriyeleri açıklık ve sarılma bölgesinde Ø8/10’dur. Kiriş boyuna donatıları üstte 3Ø12, altta 2Ø14 etriyeleri ise açıklıkta Ø8/18, sarılma bölgesinde Ø8/9’dur.

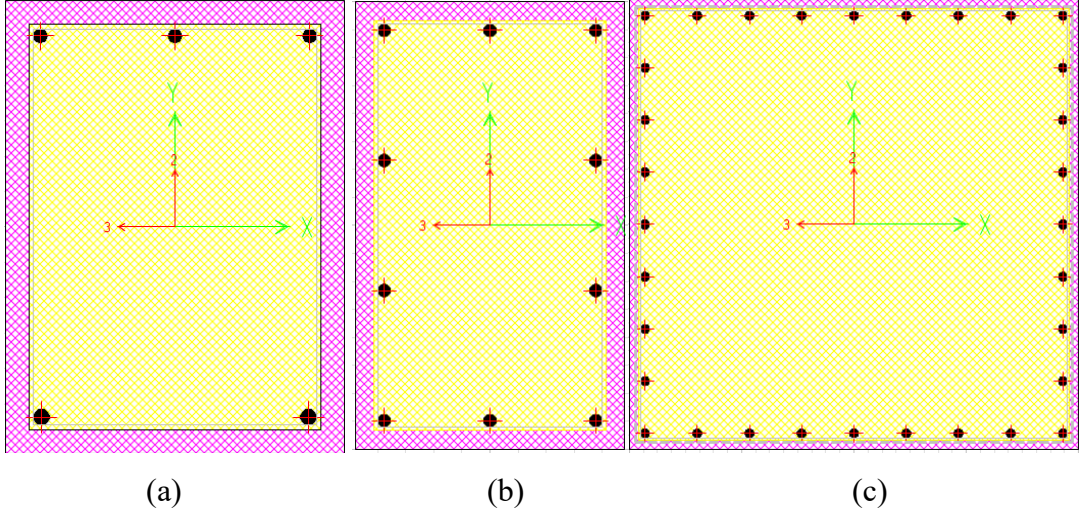
Projedeki bilgilerden yararlanarak döşeme ve temeller modellenir. Bunun için Define→ Section Properties→Area Sections komutu tıklanır. Açılan pencereden Select Section Type to Add bölümünden radye temel ve döşeme için Shell seçilir. Açılan pencereden gerekli parametreler girilir. Sadece döşeme için Shell-Thin seçilirken radye temel için Shell-Thick seçilir.



Şekil 51. Aksların oluşturulması

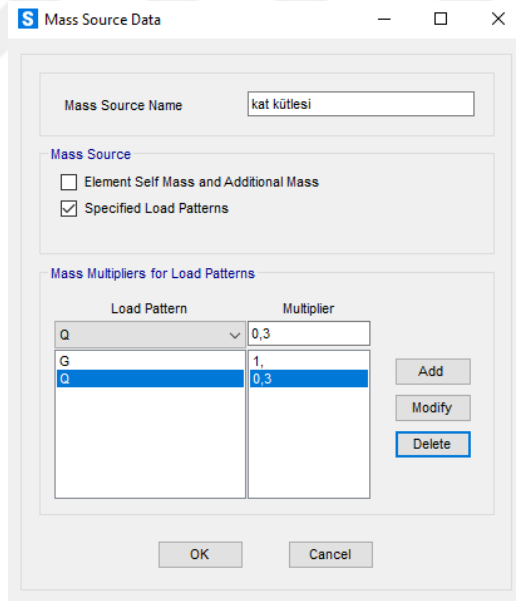
Tablo 1. Malzeme özellikleri

Malzeme	Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	Elastisite Modülü (kN/m ²)	Kayma Modülü (kN/m ²)	Poisson oranı	Akma Dayanımı (kN/m ²)	Kopma Dayanımı (kN/m ²)
Beton	25	33000000	13750000	0,2	-	-
Donatı	78,5	200000000	-	-	420000	483000



Şekil 52. (a) Kiriş enkesiti (b) normal kat ve çatı katı kolonu (c) yalıtım katı kolonu

Define→Mass Source komutundan kütleler tanımlanabilir. Bunun için TBDY 2018 4.5.9 Kütlelerin Modellenmesi bölümünden faydalanabilir. Belirlenen kütle kaynağı Şekil 53'te görülmektedir.



Şekil 53. SAP2000'de tanımlanan kütle kaynağı

Ardından Define→Load Patterns komutundan sabit yük, hareketli yük, rüzgâr yükü, deprem yükü gibi yük tipleri belirlenir. Deprem yüklerini tanımlayabilmek için bazı parametreler gereklidir. Bunlar Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Binaya ait deprem verileri

Enlem	36,19117			
Boylam	36,1343			
	Sönümleyicisiz		Sönümleyicili	
	DD-1	DD-2	DD-1	DD-2
Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı (R)	8	8	1	1,2
Dayanım Fazlalığı Katsayısı (D)	3	3	1	1,2
Bina Önem Katsayısı	1,5	1,5	1	1
Bina Kullanım Sınıfı (BKS)	1	1	1	1
Deprem Tasarım Sınıfı (DTS)	1a	1a	1a	1a
Bina Yükseklik Sınıfı (BYS)	5	5	5	5
Performans Hedefleri	ve	-	KH-DGT	KK-DGT
Değerlendirme/Tasarım Yaklaşımları				ŞDGT-DGT
	DD-1		DD-2	
S _s (Kısa periyot harita spektral ivme katsayısı)	2,172		1,064	
S ₁ (1 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı)	0,591		0,276	
S _{DS} (Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı)	2,6064		1,2768	
S _{D1} (1 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayısı)	0,8327		0,414	
T _A	0,0639		0,0648	
T _B	0,3195		0,3242	

Etkin kesit rijitlik çarpanları TBDY 2018'e göre deprem yalıtımlı binalarda 14.3.9'a göre Tablo 13.1'e göre yapılacaktır. Bu tabloya göre kirişlerde eğilme için etkin kesit rijitlik çarpanı 0,7, kolonlar için 0,9'dur. Döşemeler için ise düzlem içi etkin kesit rijitlik çarpanı eğilme için 0,5, kesme için 0,8'dir. Döşemelerin düzlem dışı etkin kesit rijitlik çarpanı eğilme için 0,5, kesme için 1'dir. Şekil 54'te bu çarpanların programa girilmesi görülmektedir. Düğüm noktalarına yarı rijit diyafram ataması yapılmıştır. Çünkü yapı yanal yüklere maruz kaldığında yarı rijit diyafram yanal yük taşıyıcı sistemine yanal yüklerin daha doğru bir dağılımını oluşturacaktır (Vaishali ve Shaikh 2022). Bu diyaframın tanıtılması da Şekil 55'te görülmektedir.

S Frame Property/Stiffness Modification Factors

Property/Stiffness Modifiers for Analysis

Cross-section (axial) Area	1
Shear Area in 2 direction	1
Shear Area in 3 direction	1
Torsional Constant	1
Moment of Inertia about 2 axis	0,7
Moment of Inertia about 3 axis	0,7
Mass	1
Weight	1

OK Cancel

S Frame Property/Stiffness Modification Factors

Property/Stiffness Modifiers for Analysis

Cross-section (axial) Area	1
Shear Area in 2 direction	1
Shear Area in 3 direction	1
Torsional Constant	1
Moment of Inertia about 2 axis	0,9
Moment of Inertia about 3 axis	0,9
Mass	1
Weight	1

OK Cancel

(a)

(b)

S Property/Stiffness Modification Factors

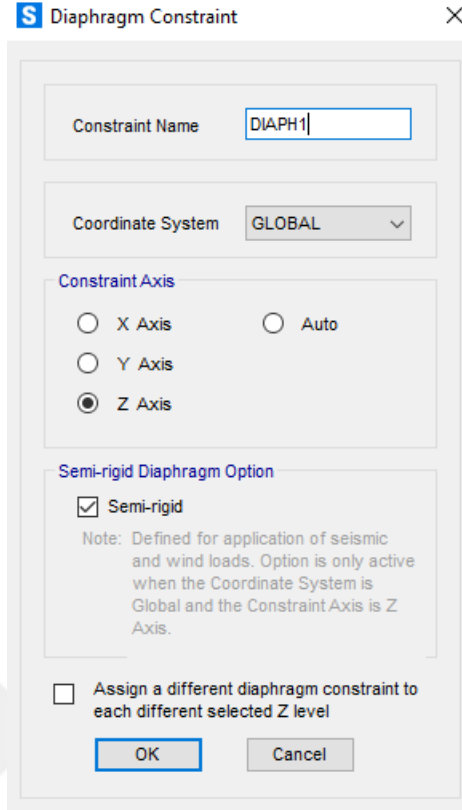
Property/Stiffness Modifiers for Analysis

Membrane f11 Modifier	0,5
Membrane f22 Modifier	0,5
Membrane f12 Modifier	0,8
Bending m11 Modifier	0,5
Bending m22 Modifier	0,5
Bending m12 Modifier	1
Shear v13 Modifier	1
Shear v23 Modifier	1
Mass Modifier	1
Weight Modifier	1

OK Cancel

(c)

Şekil 54. (a) Kirişler için etkin kesit rijitlik çarpanları (b) Kolonlar için etkin kesit rijitlik çarpanları (c) Döşemeler için etkin kesit rijitlik çarpanları



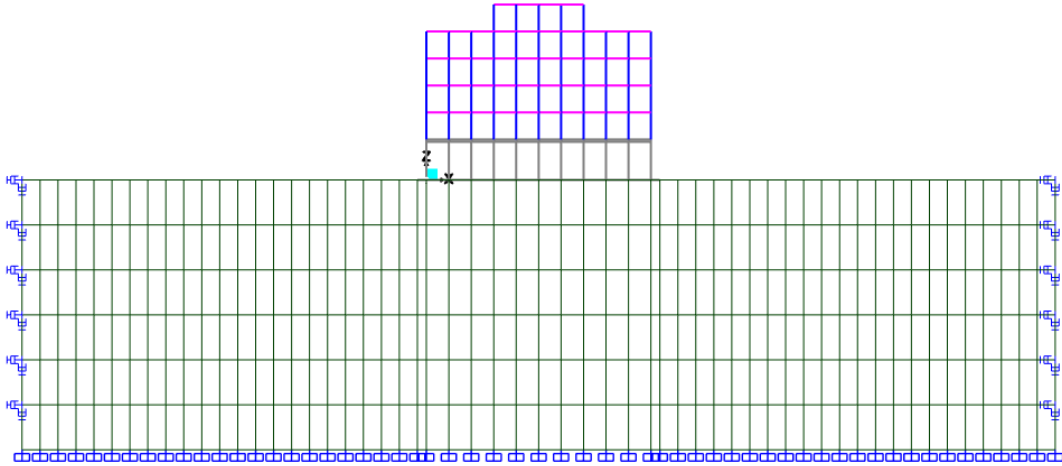
Şekil 55. Yarı rijit diyafram

2.2. Zemin Modelleme Süreci

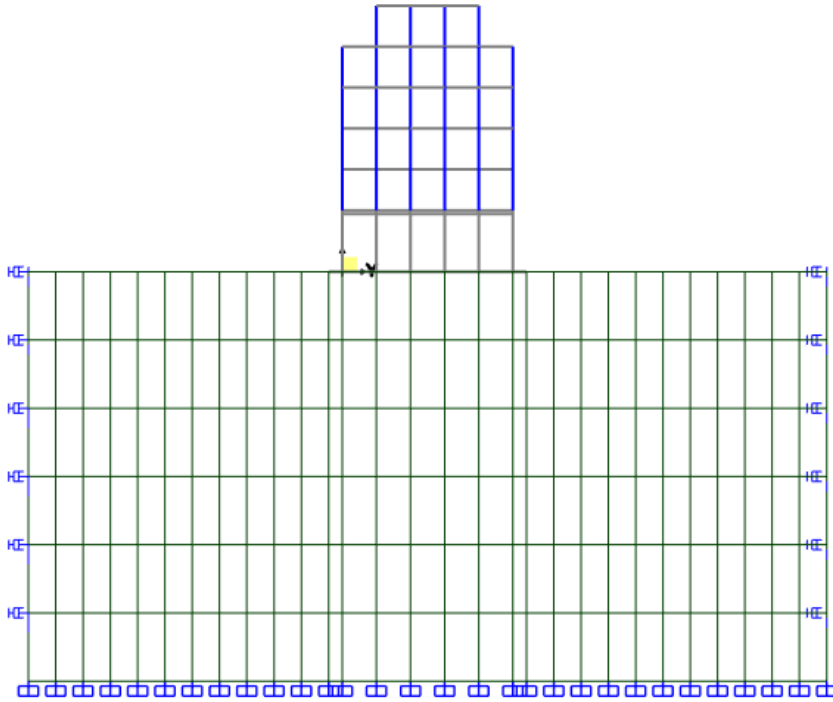
Yapı-zemin etkileşimini modellemek için ortak yöntemden faydalanılmıştır. Zemin 8 düğüm noktalı katı elemanlı sonlu elemanlarla modellenmiştir. Sınır şartları olarak viskoz sınır şartlarından yararlanılmıştır. Zemin 115 metre boyunda 58,5 metre eninde ve 30 metre derinliğinde modellenmiştir. Zemin sınıfı ZD seçilmiştir. Zeminin tabanının ana kayaya oturduğu varsayılp en alt yüzeyine ankastre mesnet atanmıştır. Daha sonra Define→Solid Properties’den solid tanımlaması yaparak zemin malzemesi oluşturulur. Ardından yapı ile zeminin birleştiği kotta bazı alanlar Extrude→Extrude Areas to Solids komutuyla solid elemanlara dönüştürülür. En son Define→Section Properties→Solid Properties komutuyla solid elemanlara oluşturulan zemin malzemesi atanır. Zemin tamamen modellendikten sonra sınır şartları ataması işlemi yapılır. Bunu ilgili detaylar bölüm 1.3.5.2’de ayrıntısıyla anlatılmıştır. Yapı-zemin etkileşimli modelin önden ve yandan görünüşleri Şekil 56 ve Şekil 57’de verilmiştir. Zeminin dinamik karakteristik özellikleri Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3. Zeminin dinamik karakteristik özellikleri

Malzeme	Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	Elastisite Modülü (kN/m ²)	Kayma Modülü (kN/m ²)	Poisson oranı	Kayma Dalgası Hızı (m/s)	Kohezyon (kN/m ²)
Zemin	21	390000	150000	0,3	264,66	30



Şekil 56. Yapının zemin-yapı etkileşimli modelinin önden görünüşü

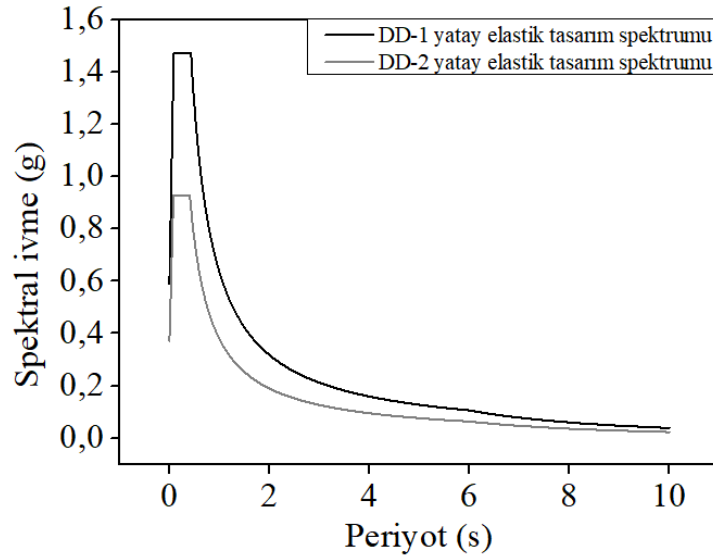


Şekil 57. Yapının zemin-yapı etkileşimli modelinin yandan görünüşü

2.3. Doğrusal Olmayan Zaman Tanım Alanında Deprem Analizinde Kullanılan Parametrelerin Elde Edilme Süreci

2.3.1. Spektrumların Elde Edilmesi

AFAD'ın Türkiye deprem tehlike haritasından alınan verilere göre DD-1 ve DD-2'ye göre oluşturulan yatay elastik tasarım spektrumları Şekil 58'de görülmektedir. TBDY 2018'de 14.3.3' de altyapıyı DD-1 deprem yer hareketi düzeyine göre, üstyapıyı ise DD-2 deprem yer hareketi düzeyine göre incelenmesini istediği için analizlerde kullanılacak deprem kayıtları AFAD'ın Türkiye Deprem Tehlike Haritasından alınan verilerle oluşturulan DD-1 ve DD-2 düzeyindeki spektrumlara göre ölçeklendirilmiştir. DD-1 düzeyindeki spektruma göre ölçeklenen deprem yer hareketleri Durum 1 diye, DD-2 düzeyindeki spektruma göre ölçeklenen deprem yer hareketleri Durum 2 diye isimlendirilmiştir.



Şekil 58. Yatay elastik tasarım spektrumları

2.3.2. Deprem Kayıtlarının Elde Edilmesi ve Ölçeklendirilmesi İşlemi

Deprem kayıtlarını elde etmek için <https://ngawest2.berkeley.edu> sitesinden yararlanılmıştır. Bu deprem kayıtlarını elde etmek için zeminin üst 30 metredeki kayma dalgası hızı ve sismografin fay hattına olan uzaklıkları (R_{rup}) kullanılmıştır.

Rup mesafesi sismografin fay zonuna olan uzaklığıdır. Deprem kayıtlarını elde etmede kullanılan girdiler Şekil 59’da verilmiştir.

The image shows a software interface with two main sections: 'Search' and 'Suite'. At the top, there are buttons for 'Load Sample Input Values' and 'Clear Input Values'. The 'Search' section on the left contains a blue header with a 'Search' button and a note: 'These characteristics are defined in the NGA-West2 Flatfile. You need to re-run Search when any of these parameters are updated.' Below this, there are input fields for 'Record Characteristics': 'RSN(s)' (with a hint 'RSN1,...RSNn'), 'Event Name', and 'Station Name'. Under 'Search Parameters:', there are dropdowns for 'Fault Type' (set to 'All Types') and 'Pulse' (set to 'Any Record'), and text input fields for 'Magnitude', 'R_IB(km)', 'R_rup(km)' (set to '0,20'), 'Vs30(m/s)' (set to '260,270'), and 'D5-95(sec)'. Each of these fields has a 'min,max' label. At the bottom of the 'Search' section is 'Additional Characteristics:' with a 'Max No. Records' field (set to '<=100'). The 'Suite' section on the right has a blue header with a 'Suite' button and three dropdowns: 'Spectral Ordinate' (set to 'SRSS'), 'Damping Ratio' (set to '5%'), and 'Suite Average' (set to 'Arithmetic').

Şekil 59. Deprem kayıtlarını elde etmede girilen parametreler

Bu girdilerden 1044, 4895, 6927 ve 8102 RSN numaralı kayıtlar seçilmiştir. Bu kayıtlar TBDY 2018’e göre basit ölçeklendirilmesi yapılmıştır. Bunun için her bir bina modelinin periyotlarından yararlanılmıştır. YSKM’nin olduğu bina modellerinde basit ölçeklendirme madde 14.14.4.2’ye göre yapılırken, YSKM’nin olmadığı bina modellerinde ise basit ölçeklendirme madde 2.5.2’ye göre yapılmıştır. Bu bina modellerinin periyotları Tablo 4’te verilmiştir. Bu ölçeklendirme yapılırken tasarım spektrumunun aynı periyot aralığındaki genliklerine oranının 1,3’ten daha küçük olmaması istendiği için basit ölçeklendirmede kullanılan tasarım spektrumlarının genlikleri 1,3 ile çarpılmıştır.

Tablo 4. Basit ölçeklendirme için kullanılan bina periyotları

Bina modeli	T_P/T_M (s)	0,2 $T_P/0,5 T_M$ (s)	1,5 $T_P/1,25 T_M$ (s)
SI'suz	0,38	0,076	0,57
KAI	0,82	0,41	1,54
AVS	0,41	0,083	0,62
KAI+AVS 1	0,88	0,44	1,66
KAI+AVS 2	0,82	0,41	1,54

Bu tabloda T_P binanın hâkim doğal titreşim periyodunu, T_M en büyük yerdeğiştirme altında deprem yalıtımlı binanın etkin titreşim periyodunu gösterir. Bu değerler modal analysis sonucu kütle katılım oranı en fazla olan periyotlardır.

Ölçeklendirmek için Excel de oluşturulan spektrumlar öncelikle siteye aktarılır. Aşağıdaki şekil 60'ta görülmektedir. Bu görselde DD-1 spektrumu gösterilmiştir ama benzer işlem DD-2 spektrumu için de yapılabilir.

Target Spectrum

Select Spectrum Model

Select models to generate target spectrum :
User Defined Spectrum

[Show/Hide GMM Notation](#)
[Show/Hide GMM Regions](#)
[Show/Hide GMM Figures](#)

User-Defined Spectrum

As shown in the sample file, start spectra data at row 4 of input file. Spectra data consists of rows of T,pSa comma-separated values.

Filename: example_spectra+DD-1.csv#x#a9 Upload File

Download Example file(.csv)

Submit

Şekil 60. Elastik tasarım spektrumunu siteye gönderme sayfası

Daha sonra submit düğmesine basılarak edit spectrum sayfası açılır. Buradan search records düğmesine basılır. Aşağıdaki şekil 61'de görülmektedir.

Edit Spectra

Select Spectrum Model

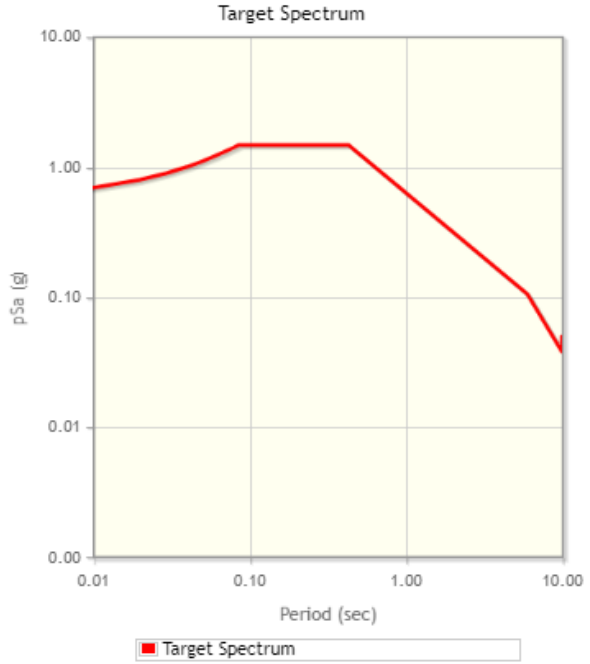
Select models to generate target spectrum:

User-Defined Spectrum

As shown in the sample file, start spectra data at row 4 of input file. Spectra data consists of rows of T,pSa comma-separated values.

Filename: Upload File

[Download Example file\(.csv\)](#)



[Recalculate Spectrum](#)

[Download Target Spectra](#)

[Search Records](#)

Şekil 61. Spektrum edit sayfası

Daha sonra search records komutuna basılarak kayıt arama sayfasına giriş yapılır. Gerekli kutucuklara gerekli girdiler girilir. Ardından sayfanın en aşağısında bulunan search records düğmesine basılır. Aşağıdaki şekil 62’de görülmektedir. Bu görselde örnek olarak Sİ’suz binanın periyotları girilmiştir. Ancak benzer işlemler diğer bina modellerinin periyotları da girilerek yapılabilir.

New Search

Load Sample Input Values

Clear Input Values

Search

These characteristics are defined in the NGA-West2 Flatfile. You need to re-run Search when any of these parameters are updated.

Record Characteristics:

RSN(s) : 8102,4895,6927,1) *RSN1,...RSNn*

Event Name :

Station Name :

Search Parameters:

Fault Type : All Types

Magnitude :

min,max

RJB(km) :

min,max

Rrup(km) :

min,max

Vs30(m/s) :

min,max

D5-95(sec) :

min,max

Pulse : Any Record

Additional Characteristics:

Max No. Records :

(≤ 100)

Initial ScaleFactor :

min,max

Suite

Spectral Ordinate : SRSS

Damping Ratio : 5%

Suite Average : Arithmetic

Scaling

Scaling Method : Minimize MSE

MSE = Computed Weighted Mean Squared Error of record, and suite average, wrt target spectrum.

Weight Function

Used in both search and scaling when computing MSE. Values can be updated for rescaling. Intermediate points are interpolated with $W = \text{fxn}(\log(T))$

Period Points : 0.078,0.57 ($T1, T2, \dots Tn$)

Weights : 1,1,1 ($W1, W2, \dots Wn$)

Controls

Search Records

Şekil 62. Web sayfası üzerinde ölçeklendirme yapılması için gereken parametreler

Bu işlemlerle deprem kayıtları ölçeklendirilmiş olur. Ayrıyeten deprem kayıtları g cinsinden kaydedildikleri için bu deprem kayıtları bir de 9,81 katsayısıyla çarpılmışlardır.

Deprem analizlerinde kullanılacak deprem ivme kayıtları ve basit ölçeklendirme sonucu oluşan ölçek katsayıları Tablo 5’te verilmiştir. Bu depremlerde KAI’li ve KAI+AVS 2’li binanın doğal hâkim titreşim periyotları birbirine yakın çıktıkları için ölçek katsayıları da aynı çıkmıştır. Bu depremlere ait bazı bilgiler Tablo 6’da verilmiştir. Bu depremlerin iki yatay bir düşey olmak üzere üç bileşeniyle beraber ivme kayıtları Şekil 63-66’de verilmiştir.

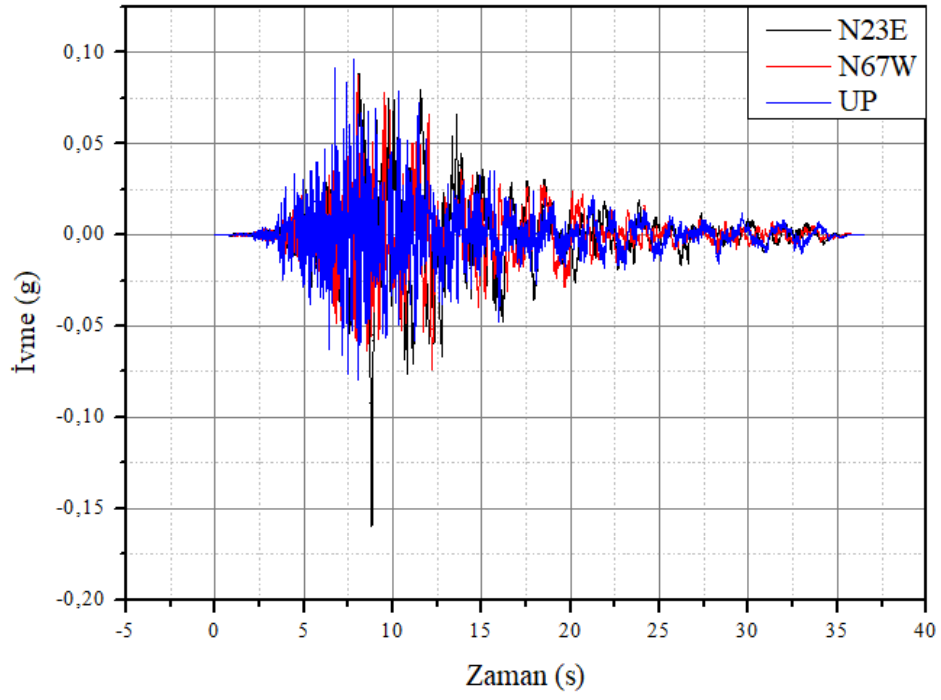
Tablo 5. Deprem ölçek katsayıları

Deprem	Durum 1			
	SI'suz	KAI/KAI+AVS 2	AVS	KAI+AVS 1
Christchurch New Zealand	4,7823	3,1043	4,7241	2,9749
Chuetsu-oki	0,4369	0,4861	0,4825	0,4964
Darfield New Zealand	1,3019	0,9994	0,9626	1,0311
Northridge-01	0,7352	0,5083	0,7164	0,4961

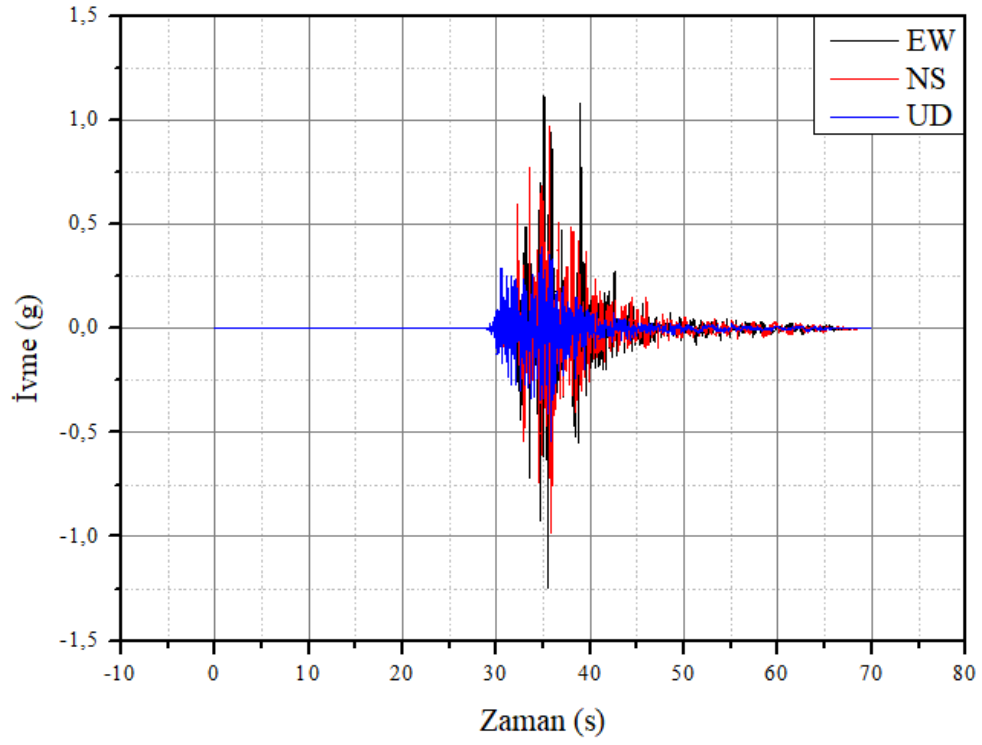
Deprem	Durum 2			
	SI'suz	KAI/KAI+AVS 2	AVS	KAI+AVS 1
Christchurch New Zealand	2,9895	1,8543	2,9459	1,7749
Chuetsu-oki	0,2731	0,2904	0,2708	0,2879
Darfield New Zealand	0,8138	0,597	0,8202	0,5743
Northridge-01	0,4596	0,3036	0,4468	0,296

Tablo 6. Deprem ivme kayıtlarına ait bilgiler

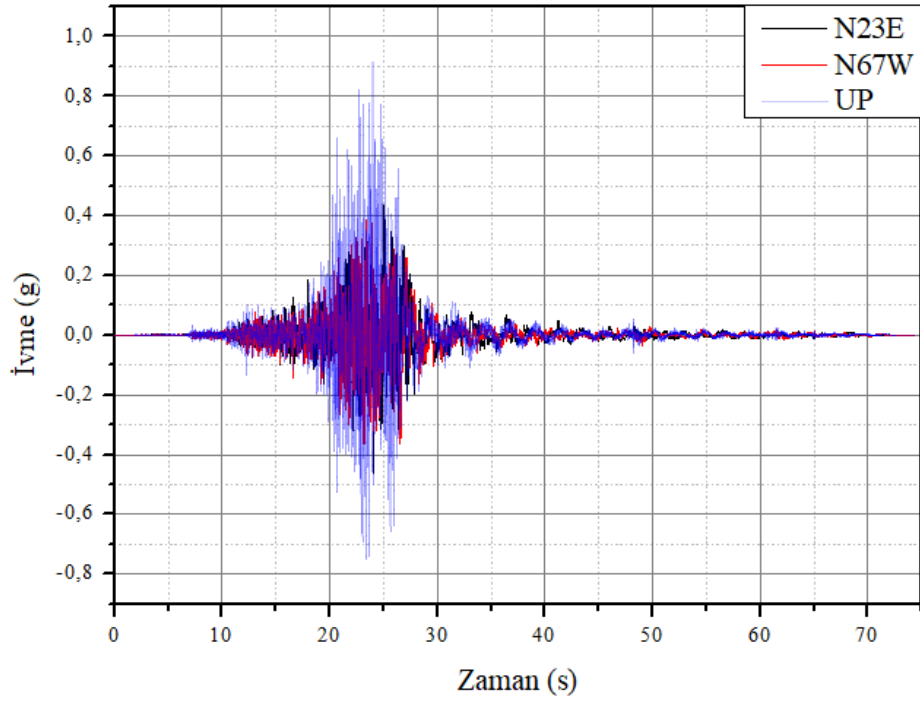
RSN	Deprem	İstasyon	Büyüklik	Bileşenler	PGA (g)
8102	Christchurch	LINC	6,2	N23E	0,160458
				N67W	0,087705
				UP	0,09618
				EW	1,249487
4895	Chuetsu-oki	Kashiwazaki NPP, Unit 5: ground surface	6,8	NS	0,983961
				UD	0,544417
6927	Darfield	LINC	7,0	N23E	0,461347
				N67W	0,387577
				UP	0,914513
1044	Northridge- 01	Newhall - Fire Sta	6,69	90	0,582989
				360	0,590411
				UP	0,54821



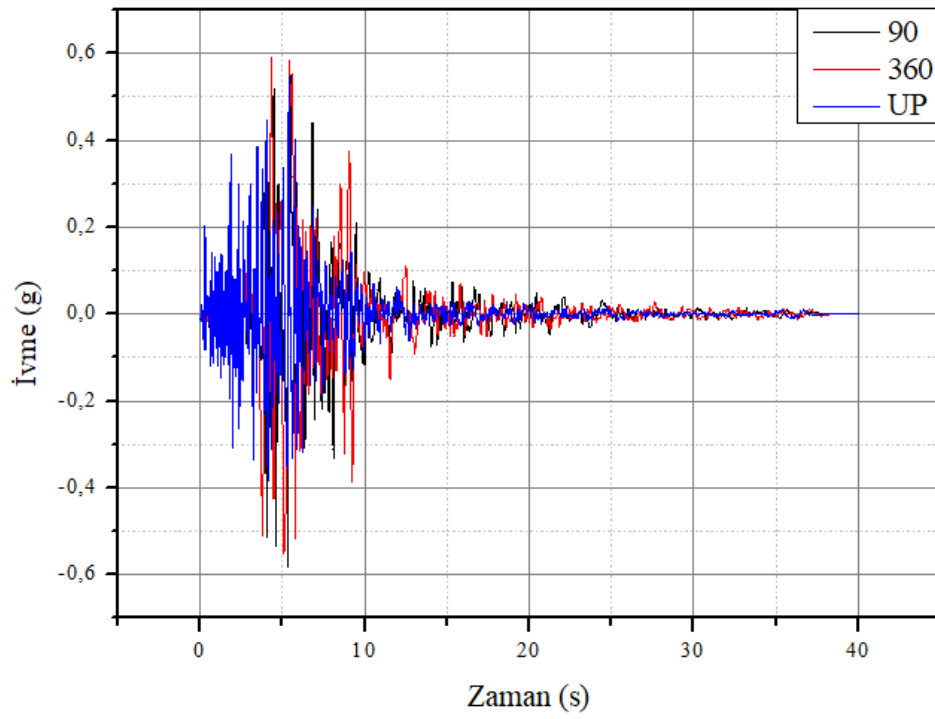
Şekil 63. 21 Şubat 2011 tarihli Christchurch New Zealand deprem ivme kayıtları



Şekil 64. 16 Temmuz 2007 tarihli Chuetsu-oki deprem ivme kayıtları



Şekil 65. 3 Ekim 2010 tarihli Darfield New Zealand depreminin ivme kayıtları



Şekil 66. 17 Ocak 1994 tarihli Northridge depreminin ivme kayıtları

Deprem kayıtları kaydedilirken her gün kullandığımız dereceden farklı olarak ufuk açısı da denilen azimuth açılarıyla kaydedilirler. SAP2000 programına deprem kayıtları eksenlere açılı olacak şekilde girilebilir. Ancak SAP2000 programı dereceyi kullandığı için bu açılar öncelikle dereceye çevrilmelidir. Bu açılar Tablo 7’de verilmelidir.

Tablo 7. Depremlerin kaydedildikleri açılar

Deprem kaydının ismi		Kaydedildiği azimuth açısı	Programa girilen deprem açısı
Christchurch	N23E	23	67
	N67W	293	157
Chuetsu-oki	EW	90	0
	NS	0	90
Darfield	N23E	23	67
	N67W	293	157
Northridge	90	90	0
	360	0	90

SAP2000 programında 1 yönü X ekseninin açılışı, 2 yönü de Y ekseninin açılışıdır. Fakat varsayılan olarak bu açılar 0 olduğu için 1 yönü X eksenine paralel, 2 yönü de Y eksenine paraleldir. Bu yüzden programa açılar girilirken eksen olarak 1 seçilmiştir. Ancak 90° girilecek depremler için 2 yönü de seçilebilir. Fakat bu durumda açı olarak 0 yazılması gerekir.

Zaman tanım alanında deprem analizlerini yapmak için SAP2000 programına bazı Load Case’lar tanımlanmalıdır. Bunun için Define→Load Case menüsüne gelinir. Açılan pencereden Add New Load Case düğmesine basılır. Buradan sonra gerekli düzenlemeler yapılarak her deprem kaydının zaman tanım alanında analizleri yapılabilir. Ayrıca bu çalışmada KAI’lı binanın düşey periyodu 0,1 saniyeden büyük çıktığı için tüm yatay deprem bileşenlerinde başlangıç adımı olarak Load Case’e eklenmiştir. Fakat zaman tanım alanında deprem analizlerinde düşey deprem bileşenlerin etkisini tek bir modelde görmemek için tüm modellemelerde düşey bileşen başlangıç adımı olarak tüm yatay bileşenlere eklenmiştir.

Deprem analizlerinde sönüm modeli olarak Rayleigh sönüm modeli seçilmiştir. Rayleigh sönüm modelinde sönüm kütle ve rijitliğin belli bir oranlarının toplamıdır.

Rayleigh sönüm modelinde kullanılan denklemler denklem (2.1)-(2.3)'lerde verilmektedir.

$$C=\alpha M+\beta K \quad (2.1)$$

$$\alpha=2\omega_1\omega_2\frac{\xi_1\omega_2-\xi_2\omega_1}{\omega_2^2-\omega_1^2} \quad (2.2)$$

$$\beta=2\frac{\xi_2\omega_2-\xi_1\omega_1}{\omega_2^2-\omega_1^2} \quad (2.3)$$

Bu denklemde C, M ve K sırasıyla sönümü, kütle ve rijitliği temsil eder. ω_1 ve ω_2 sırasıyla 1. modun ve 2. modun açısal frekanslarıdır. ξ_1 ve ξ_2 sönüm oranlarını temsil eder. Aksi belirtilmedikçe sönüm oranları birbirlerine eşittirler. Analizlerde kullanılacak Rayleigh sönüm katsayıları Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8. Rayleigh Sönüm Katsayıları

Yapı Modeli	α	β
SI'suz	0,8393	0,003
KAI'li bina	0,9817	0,0294
AVS'li bina	3,928	0,016
KAI+AVS 1'li bina	2,26	0,078
KAI+AVS 2'li bina	2,4252	0,073

2.4. Yüksek Sönümlü Kauçuk Mesnet Tasarım Süreci

Bridgestone kataloğundan seçilen HM080X3R yüksek sönümlü kauçuk mesnetin (YSKM) yapıya uygun olup olmadığı araştırılmıştır. Bunun için yapıya gelen yüklerden yararlanılmıştır. Ayrıca bir de tasarım yer değiştirmesi belirlenmiştir. Tablo 9'da yüksek sönümlü kauçuk mesnet boyutları, Tablo 10'da yüksek sönümlü kauçuk mesnette depremsiz durumda oluşan şekil değiştirmeler ve kontrolleri, Tablo 11'de ise yüksek sönümlü kauçuk mesnette depremlili durumda oluşan şekil değiştirmeler ve kontrolleri, Tablo 12'de ise burkulma yükleri ve eksenel yük kapasiteleri verilmiştir. Bu şekil değiştirmeler ve kontroller için gerekli denklemler aşağıda Denklem (2.4)-(2.17) 'de verilmiştir. Bu denklemlerin hepsi Türk Bina Deprem Yönetmeliği Bölüm 14'de mevcuttur (TBDY 2018).

Basınçtan meydana gelen açısal şekildeğiştirme:

$$\gamma_{c,st} = \frac{6SP_{K1}}{A_r E_r} \quad (2.4)$$

Tek bir elastomer katmanının çelik plaka ile yapışmış, yüke maruz yüzey alanı:

$$A_r = \frac{\pi}{4} * (B^2 - B_L^2) \quad (2.5)$$

Şekil Katsayısı:

$$S = \frac{B^2 - B_L^2}{4Bt} \quad (2.6)$$

Elastomer yalıtım biriminin basınç modülü:

$$E_c = E_0(1 + 2kS^2) \quad (2.7)$$

Kauçuk malzemenin esneklik modülü:

$$E_0 = 4G_V \quad (2.8)$$

Basınçtan meydana gelen açısal şekildeğiştirme:

$$\gamma_{c,st} = \frac{\Delta_s}{T_r} \quad (2.9)$$

Görelî dönmeden oluşan birim şekildeğiştirme:

$$\gamma_{r,st} = \frac{B^2 \theta_s}{2tT_r} \quad (2.10)$$

Deprem etkisi altında basınçtan meydana gelen açısal şekildeğiştirme:

$$\gamma_{c,E} = \frac{6S_{K2}}{A_r E_c} \quad (2.11)$$

Deprem yer hareketi etkisi altında oluşan yatay yer değiştirmeden meydana gelen birim şekildeğiştirme:

$$\gamma_{s,E} = \frac{D}{T_r} \quad (2.12)$$

Kurşun çekirdeksiz kauçuk mesnetin yatay yerdeğiştirmenin olmadığı durum için burkulma yükü:

$$P_{cr} = 0,218 * \frac{G_v * B^4}{t * T_r} \quad (2.13)$$

Yatay yerdeğiştirmenin olduğu durum için burkulma yükü:

$$P'_{cr} = P_{cr} * \frac{A_{re}}{A_r} \quad (2.14)$$

$$A_{re} = A_r * \frac{\delta - \sin \delta}{\pi} \quad (2.15)$$

$$\delta = 2 \cos^{-1} \left(\frac{D}{B} \right) \quad (2.16)$$

Kauçuk Mesnetin Birim Şekil Değiştirmeye Bağlı Eksenel Yük Kapasitesi:

$$P_{str} = \frac{3,5 A_{re} E_c}{6S} \quad (2.17)$$

(2.16) denkleminde D_{TM} kullanılabilir. D_{TM} en büyük deprem yer hareketi seviyesinde, göz önüne alınan doğrultuda yalıtım sistemi etkin rijitlik merkezinde oluşacak toplam yer değiştirmedir.

Tablo 9. YSKM boyutları

B (İzolatör iç çapı) (mm)	800
B_L (İzolatör dış çapı) (mm)	20
t (kauçuk katman kalınlığı) (mm)	6,8
k	0,6
Gv (Kauçuk malzemenin kayma modülü) (Mpa)	0,3
Tr (Toplam kauçuk kalınlığı) (mm)	156,4
θ_s (Tasarım dönme açısı) (radyan)	0,005

Tablo 10. YSKM’de depremsiz durumda oluşan şekil değiştirmeler ve kontrolleri

P_{k1} (1,4G+1,6Q yük birleşiminden elde edilen kuvvet) (kN)	510,12
A_r (Tek bir elastomer katmanının çelik plaka ile yapışmış, yüke maruz yüzey alanı) (mm ²)	502340,66
S (Şekil Katsayısı)	29,39
E_0 (kauçuk malzemenin esneklik modülü) (Mpa)	1,2
E_c (Elastomer yalıtım biriminin basınç modülü) (Mpa)	1245,32
$\gamma_{c,st}$ (Basınçtan meydana gelen açısallıkta şekil değiştirme)	0,144
Δ_s (Genleşme, rüzgâr vb. oluşan yatay yer değiştirme) (m)	0,0034
$\gamma_{s,st}$ (Basınçtan meydana gelen açısallıkta şekil değiştirme)	0,022
$\gamma_{r,st}$ (Görelî dönmeden oluşan birim şekil değiştirme)	1,5
$\gamma_{c,st} \leq 3,5$	EVET
$\gamma_{c,st} + \gamma_{s,st} + \gamma_{r,st} \leq 5$	EVET

Tablo 11. YSKM’de depremli durumda oluşan şekil değiştirmeler ve kontrolleri

P_{K2} (1,2G+Q±E _d yük birleşiminden elde edilen kuvvet) (kN)	1369,15
A_r (Tek bir elastomer katmanının çelik plaka ile yapışmış, yüke maruz yüzey alanı) (mm ²)	502340,66
S (Şekil Katsayısı)	29,39
E_0 (Kauçuk malzemenin esneklik modülü) (Mpa)	1,2
E_c (Elastomer yalıtım biriminin basınç modülü) (Mpa)	1245,32
$\gamma_{c,E}$ (Deprem etkisi altında basınçtan meydana gelen açısal şekildeğiştirme)	0,39
D (Depremden dolayı oluşan yatay yer değiştirme) (m)	0,077
$\gamma_{s,E}$ (Deprem yer hareketi etkisi altında oluşan yatay yer değiştirmeden meydana gelen birim şekildeğiştirme)	0,49
$\gamma_{s,E} \leq 2$	EVET
$\gamma_{c,E} + \gamma_{s,E} + 0,5\gamma_{r,st} \leq 5$	EVET

Tablo 12. YSKM’de burkulma yükleri ve eksenel yük kapasiteleri

P_{cr} (Yatay Yerdeğiştirmenin Olmadığı Durumda Burkulma Yüğü) (kN)	25187,90
D (m)	0,105
δ	2,88
A_{re} (mm ²)	418889,02
P'_{cr} (Yatay Yerdeğiştirmenin Olduğu Durumda Burkulma Yüğü) (kN)	21003,55
P_{str} (Kauçuk Mesnetlerin Birim Şekil Değiştirmeye Bağlı Eksenel Yük Kapasitesi) (kN)	10352,53
$\min(P_{cr}, P_{str})/P_{kl} \geq 2$ (Yatay yer değiştirmenin olmadığı durumda burkulma yük sınırı)	EVET
$\min(P'_{cr}, P_{str})/P_{kl} \geq 1,1$ (Yatay yer değiştirmenin olduğu durumda burkulma yük sınırı)	EVET

Tablo 12’de verilen D değeri Tablo 14’te verilen D_{TM-x} ve D_{TM-y} ’nin değerlerinden en büyük olanıdır.

Yönetmelikte verilen kauçuk mesnetlerin çevresel etkilerden dolayı rijitliklerinin artıp ya da azalması durumunu hesaba katmada kullanılan $\lambda_{üst}$ ve λ_{alt} katsayılarının formülleri denklem (2.18) ve (2.19)'da görülmektedir.

$$\lambda_{üst} = [1 + 0,75(\lambda_{ae,üst} - 1)]\lambda_{deney,üst}\lambda_{spek,üst} \quad (2.18)$$

$$\lambda_{alt} = [1 - 0,75(1 - \lambda_{ae,alt})]\lambda_{deney,alt}\lambda_{spek,alt} \quad (2.19)$$

Bu formülde verilen $\lambda_{ae,üst}$, $\lambda_{deney,üst}$, $\lambda_{spek,üst}$ TBDY 2018 tablo 14.2'de YSE bölümünden F_Q ve k_2 sütunundan alınıp her ikisi için ayrı iki değer bulunmuştur. $\lambda_{üst}$ ve λ_{alt} değerlerini bulmak için yönetmelikteki ilgili tablodan alınan değerler Tablo 13'te verilmiştir.

Tablo 13. $\lambda_{üst}$ ve λ_{alt} değerleri

Semboller	F_Q	k_2
$\lambda_{ae,üst}$	1,3	1,4
$\lambda_{deney,üst}$	1,3	1,3
$\lambda_{spek,üst}$	1,15	1,15
$\lambda_{üst}$	1,83	1,94
$\lambda_{ae,alt}$	1	1
$\lambda_{deney,alt}$	0,7	0,9
$\lambda_{spek,alt}$	0,85	0,85
λ_{alt}	0,60	0,77

Tablo 13'teki F_Q değerleri ile karakteristik dayanım, k_2 değerleri ile başlangıç rijitliği, akma sonrası rijitlik ve kesme rijitliği çarpılır. Tablo 14'te DD-1 yer hareketi düzeyine ait tasarım yer değiştirmesi için yararlanılan parametreler verilmiştir. Tablo 15'te ise DD-1 yer hareketi düzeyine ait tasarım yer değiştirmesinin kontrolü yapılmıştır. Tablo 16'da DD-2 yer hareketi düzeyine ait tasarım yer değiştirmesi için yararlanılan parametreler verilmiştir. Tablo 17'de ise DD-2 yer hareketi düzeyine ait tasarım yer değiştirmesinin kontrolü yapılmıştır. Tablolardaki değerleri bulmada kullanılan formüller denklem (2.20)-(2.36)'da verilmiştir (TBDY 2018; Deringöl ve Güneyisi 2020; Bandyopadhyay ve diğ. 2021).

$$D_D = 1,3 \left(\frac{g}{4\pi^2} \right) T_D^2 \eta_D S_{ae}^{(DD-2)}(T_D) \quad (2.20)$$

$$T_D = 2\pi \sqrt{\frac{W}{gK_D}} \quad (2.21)$$

$$D_M = 1,3 \left(\frac{g}{4\pi^2} \right) T_M^2 \eta_M S_{ae}^{(DD-1)}(T_M) \quad (2.22)$$

$$T_M = 2\pi \sqrt{\frac{W}{gK_M}} \quad (2.23)$$

$$\eta = \sqrt{\frac{10}{5 + \xi}} \quad (2.24)$$

$$D_{TD} = D_D \left[1 + y \frac{12e}{b^2 + d^2} \right] \quad (2.25)$$

$$D_{TM} = D_M \left[1 + y \frac{12e}{b^2 + d^2} \right] \quad (2.26)$$

$$V_D = \frac{S_{ae}^{(DD-2)}(T_D) W \eta_D}{R} \quad (2.27)$$

$$V_M = \frac{S_{ae}^{(DD-1)}(T_M) W \eta_M}{R} \quad (2.28)$$

$$\beta_M = \frac{4F_Q(D_M - D_y)}{2\pi K_M D_M^2} \quad (2.29)$$

$$W_M = 2\pi K_M \beta_M D_M^2 = 4F_Q(D_M - D_y) \quad (2.30)$$

$$\beta_D = \frac{4F_Q(D_D - D_y)}{2\pi K_D D_D^2} \quad (2.31)$$

$$W_D = 2\pi K_D \beta_D D_D^2 = 4F_Q(D_D - D_y) \quad (2.32)$$

$$F = \frac{F_Q}{1 - \frac{K_2}{K_1}} \quad (2.33)$$

$$D_y = \frac{F_y}{K_1} = \frac{F_Q}{K_1 - K_2} \quad (2.34)$$

$$D = \frac{F_Q}{K_{\text{eff}} - K_2} \quad (2.35)$$

$$c_b = 2m_t \omega_b \beta \quad (2.36)$$

Denklem (2.21) ve (2.23)'de verilen periyot denklemlerindeki K_M ve K_D değerleri yapıya yerleştirilen tüm yalıtım sistemlerinin etkin rijitliklerinin toplamıdır.

Tablo 14. DD-1 yer hareketi düzeyinin tasarım yer değiştirmesini bulmada kullanılan değerler

Semboller	Değerler	
K_M (En büyük deprem yer hareketi yerdeğiştirmesi seviyesinde yalıtım sisteminin nominal etkin rijitliği) (kN/m)	110000	
T_M (En büyük yerdeğiştirme altında deprem yalıtımlı binanın etkin titreşim periyodu) (s)	0,80	
$S_{ae}(DD-1)$ (g)	0,61	
β	0,17	
η_M	0,6742	
Taban izolasyonu rijitlik merkezi	x (m)	y (m)
	12,92	6,24
Üstyapı ağırlık merkezi	x (m)	y (m)
	12,5	6,25
e_x	1,04	
e_y	1,26	
y_x (m)	6,25	
y_y (m)	12,09	
D_M (m)	0,085	
D_{TM-x} (m)	0,093	
D_{TM-y} (m)	0,105	
V_M (kN)	7181,21	

Tablo 15. Bulunan DD-1 yer hareketi düzeyindeki tasarım yer değiştirmesinin kontrolü

Semboller	ALT	NOM	ÜST
F_Q (Karakteristik dayanım) (kN)	24,99	42	76,91775
F_y (Akma dayanımı) (kN)	27,77	46,67	85,46
D_y (Akma deplasmanı) (m)	0,0052	0,0067	0,0063
K_1 (Başlangıç rijitliği) (kN/m)	5316,75	6950	13507,33
K_2 (Akma sonrası rijitlik) (kN/m)	531,68	695	1350,73
F (kN) (D yerdeğiştirmesine karşılık gelen yatay kuvvet)	84,16	141,45	259,04
K_{eff} (kN/m) (Eşdeğer kesme rijitliği)	991,67	1666,67	3052,29
ΣK_{eff}	65450	110000	201451,25
W_d (kNm)	7,96	13,13	24,16
β	0,1774	0,1741	0,1749
η_M	0,66	0,67	0,67
T_M (s)	1,03	0,80	0,59
D_M (m)	0,14	0,084	0,046

Tablo 16. DD-2 yer hareketi düzeyinin tasarım yer değiştirmesini bulmada kullanılan değerler

Semboller	Değerler	
K_D (En büyük deprem yer hareketi yerdeğiştirmesi seviyesinde yalıtım sisteminin nominal etkin rijitliği) (kN/m)	100000	
T_D (En büyük yerdeğiştirme altında deprem yalıtımlı binanın etkin titreşim periyodu) (s)	0,35	
$S_{ae}(DD-2)$ (g)	0,61	
β	0,17	
η_D	0,6742	
Taban izolasyonu rijitlik merkezi	x (m)	y (m)
	12,92	6,24
Üstyapı ağırlık merkezi	x (m)	y (m)
	12,5	6,25
e_x	1,04	
e_y	1,26	
y_x (m)	6,25	
y_y (m)	12,09	
D_D (m)	0,053	
D_{TD-x} (m)	0,058	
D_{TD-y} (m)	0,066	
V_D (kN)	3404,24	

Tablo 17. Bulunan DD-2 yer hareketi düzeyindeki tasarım yer değiştirmesinin kontrolü

Semboller	ALT	NOM	ÜST
F_Q (Karakteristik dayanım) (kN)	24,99	42	76,91775
F_y (Akma dayanımı) (kN)	27,77	46,67	85,46
D_y (Akma deplasmanı) (m)	0,0052	0,0067	0,0063
K_1 (Başlangıç rijitliği) (kN/m)	5316,75	6950	13507,33
K_2 (Akma sonrası rijitlik) (kN/m)	531,68	695	1350,73
F (kN) (D yerdeğiştirmesine karşılık gelen yatay kuvvet)	47,88	80,46	147,36
K_{eff} (kN/m) (Eşdeğer kesme rijitliği)	901,52	1515,15	2774,81
ΣK_{eff}	59500	100000	183137,50
W_d (kNm)	4,79	7,79	14,39
β	0,30	0,29	0,29
η_D	0,53	0,54	0,54
T_D (s)	1,08	0,84	0,62
D_D (m)	0,071	0,043	0,023

Bu tablolarda ve denklemlerde verilen c_b sönüm katsayısını, W üstyapı ile izolatörlerin ağırlıklarının toplamı, β izolatörün sönüm oranını, η_M en büyük deprem yer hareketi düzeyi için sönüm ölçeklendirme katsayısını, η_D tasarım deprem yer hareketi düzeyi için sönüm ölçeklendirme katsayısını, T_M en büyük yerdeğiştirme altında deprem yalıtımlı binanın etkin titreşim periyodunu, T_D deprem yalıtımlı binanın tasarım yerdeğiştirmesi seviyesinde etkin titreşim periyodunu, D_M en büyük deprem yer hareketi seviyesinde göz önüne alınan doğrultuda yalıtım sistemi etkin rijitlik merkezinde oluşacak yerdeğiştirmeyi, D_D tasarım deprem yer hareketi seviyesinde göz önüne alınan doğrultuda yalıtım sistemi etkin rijitlik merkezinde oluşacak yerdeğiştirmeyi, W_D ve W_M tüketilen enerjiyi, e_x x yönü için üstyapı ağırlık merkezi ile yalıtım sistemi rijitlik merkezi arasında ölçülen dış merkezlik ile deprem yüklemesine dik doğrultudaki plan boyutunun %5'i olarak hesaplanan ek dış merkezliğin toplamını, e_y y yönü için üstyapı ağırlık merkezi ile yalıtım sistemi rijitlik merkezi arasında ölçülen dış merkezlik ile deprem yüklemesine dik doğrultudaki plan boyutunun %5'i olarak hesaplanan ek dış merkezliğin toplamını, y_x x yönü için yalıtım sistemi rijitlik merkezi ile ilgili eleman arasındaki deprem yüklemesine dik doğrultudaki uzaklığı, y_y y yönü için yalıtım sistemi rijitlik merkezi ile ilgili eleman arasındaki deprem yüklemesine dik doğrultudaki uzaklığı, D_{TM} en büyük deprem yer hareketi seviyesinde göz önüne alınan doğrultuda yalıtım sistemi etkin rijitlik merkezinde oluşacak toplam yerdeğiştirmeyi, D_{TD} tasarım deprem yer hareketi seviyesinde göz önüne alınan doğrultuda yalıtım sistemi etkin rijitlik merkezinde oluşacak toplam yerdeğiştirmeyi, V_M en büyük deprem yer hareketi düzeyi DD-1 için hesaplanan üstyapıya etkiyen kuvveti, V_D tasarım deprem yer hareketi düzeyi DD-2 için hesaplanan üstyapıya etkiyen kuvveti gösterir.

SAP2000 programına YSKM ataması için Define→Section Properties→Link/Support Properties menüsünden açılan Link/Support Properties ekranından Add New Property denilerek Link/Support Type Rubber Isolator seçilir. Daha sonra ilgili parametreler ilgili kutucuklara girilir. Tablo 18'de YSKM ile ilgili SAP2000 programına girilen parametrelerin değerleri verilmiştir.

Tablo 18. Analizlerde kullanılan YSKM'nin mekanik özellikleri

Kütle (kN*s ² /m)	Ağırlık (kN)	Serbestlik Derecesi	Düşey Rijitlik (kN/m)	Sönüm katsayısı (kN*s/m)	Birinci Rijitlik (kN/m)	Akma dayanımı (kN)	Akma Sonrası Rijitlik Oranı
0,64	6,276	U1	3140000	3610,14			
0,64	6,276	U2	964	3610,14	6950	46,667	0,1
0,64	6,276	U3	964	3610,14	6950	46,667	0,1

2.5. Akışkan Viskoz Sönümleyici Optimizasyon Süreci

Akışkan viskoz sönümleyicinin (AVS) optimizasyonunda Taylor devices kataloğunda seçilen 17120 numaralı cihaz seçilmiştir. Bunu seçilmesinin nedeni katalogta mevcut olan en verimli cihaz olmasıdır (Arora 2019). Tüm akışkan viskoz sönümleyicili bina modelinde optimizasyon için basitleştirilmiş sıralı arama algoritmasından yararlanılmıştır. Bu algorithmada hedef fonksiyonu olarak katlar arası bağıl hız ya da katlar arası bağıl deplasman seçilebilir. Bu çalışmada katlar arası hızları azaltmak hedeflenmiştir.

2.5.1. AVS'li Bina Optimizasyon Süreci

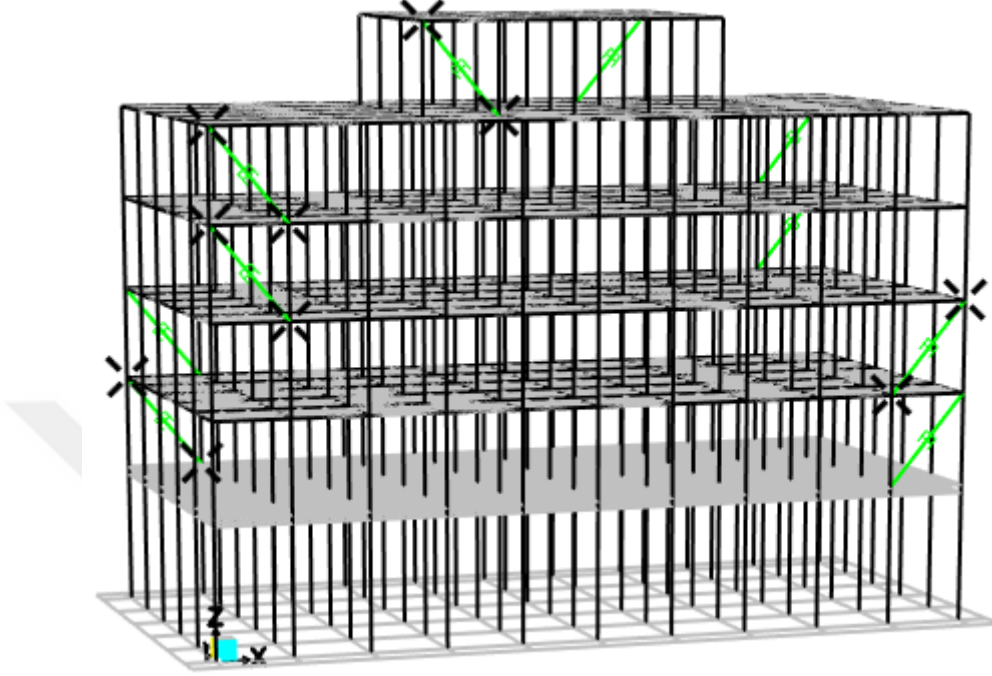
Optimizasyon için şu adımlardan yararlanılmıştır:

- 1) Ölçeklendirilmiş yer ivmesi altında sönümleyicisiz binanın doğrusal dinamik analizi yapılır.
- 2) En büyük katlar arası bağıl hızının görüldüğü ilk kata sönümleyici yerleştirilir.
- 3) İlk sönümleyici yerleştirildikten sonra ikinci sönümleyicinin yerini belirleyebilmek için doğrusal deprem analizi bir kez daha yapılır.
- 4) Bütün katlarda birer adet sönümleyici yerleştirilene kadar doğrusal deprem analizi tekrarlanır (Hiçyılmaz, Doğan ve Gönen 2018).

Bu optimizasyon algoritmasının seçilmesinin nedeni sade ve basit olması ve diğer karmaşık algoritmalarla benzer sonuçlar vermesidir (Hiçyılmaz, Doğan ve Gönen 2018).

Ancak çalışılan binada optimizasyon sonucu elde edilen sönümleyicili yapı, yapıda burulmaya sebep olduğu için her kata, o katın simetriğine göre bir sönümleyici daha eklenmiştir. Şekil 67'de AVS'li bina görülmektedir. Seçili noktalar arasında

kalan sönümleyiciler optimizasyon algoritması sonucu yerleştirilenler, diğer sönümleyiciler ise burulmayı ortadan kaldırmak için eklenen sönümleyicilerdir.



Şekil 67. Optimizasyon sonucu ve meydana gelen burulmayı engellemek için yerleştirilen sönümleyiciler

2.5.2. AVS'li Binanın Sönümleme Katsayısının Bulunması

Sönümleme katsayısını bulmak için 1. modal genliklerinden yararlanılan formül kullanılmıştır. Bu formül denklem (2.20)'de gösterilmektedir (Chan 2023).

$$c = \frac{(2\pi)^{3-\alpha} \xi_d A^{1-\alpha} \sum_i m_i \varphi_i^2}{T^{2-\alpha} \sum_i \lambda_i \varphi_{ri}^{1+\alpha} \cos^{1+\alpha} \theta_i} \quad (2.37)$$

$$\lambda = 2^{2+\alpha} \frac{\Gamma^2\left(1 + \frac{\alpha}{2}\right)}{\Gamma(2 + \alpha)} \quad (2.38)$$

Burada ξ_d damperin sönüm oranı, A maksimum çatı yer değiştirmesi, m_i i. katın kütlelerini, φ_i i. kattaki birinci mod genliğini, T ilk titreşim modunun periyodu, φ_{ri} yatay yönde j damper uçları arasındaki birinci mod göreli deplasman, θ_i i. kattaki sönümleyicinin yatayla yaptığı açıyı, α hız üstelini gösterir. AVS'li yapının

sönümleme katsayısını bulmak için bulunması gereken birtakım değerler vardır. Bunlar Tablo 19’da görülmektedir.

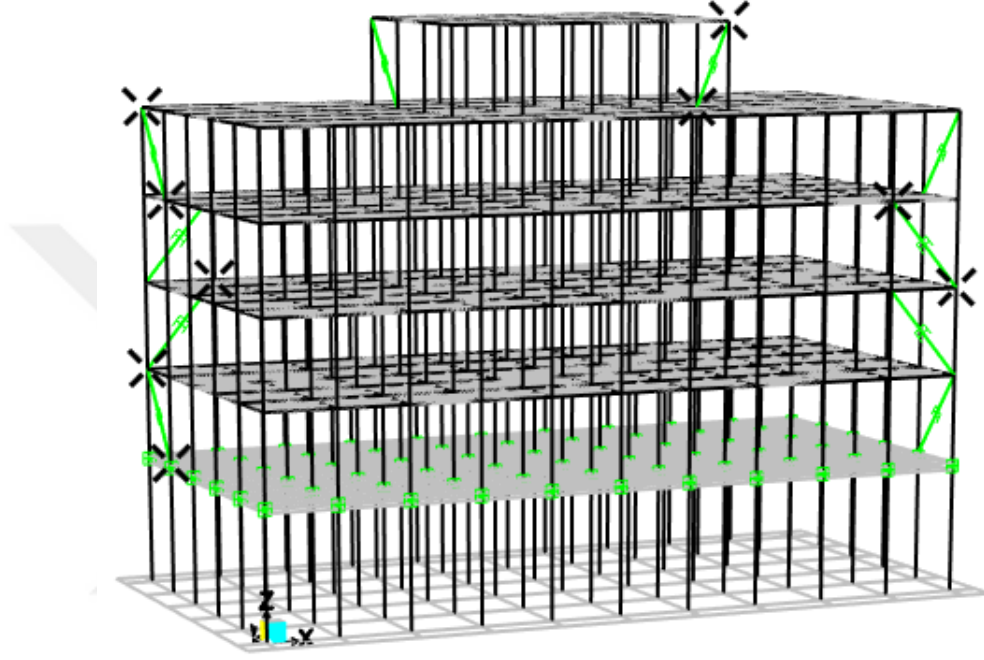
Tablo 19. Sönümleme katsayısını bulmak için kullanılan değerler

Sönümleyici verileri	Değerler	
Sönümleyicinin rijitliği (kN/m)	109454,28	
α	0,6	
ξ_d	0,2	
A (m)	0,035	
λ	3,42	
$\cos\theta_i$	0,64	
T(s)	0,41	
φ_i (kotlara göre)	6. kat	1
	5. kat	0,90
	4. kat	0,78
	3. kat	0,58
	2. kat	0,34
	1. kat	0,11
	Zemin kat	0,10
φ_{ij}	6. kat	0,096
	5. kat	0,128
	4. kat	0,194
	3. kat	0,244
	2. kat	0,230
	1. kat	0,006
	Zemin kat	0,102
Kat kütleleri (ton)	6. kat	92,01
	5. kat	337,97
	4. kat	364,35
	3. kat	364,35
	2. kat	364,35
	1. kat	483,63
	Zemin kat	752,31
c (kN*s/m)	19736,26	

Bu tablodaki φ_i 1. moddaki kat kütle merkezlerinin yer değiştirmesinin en üst katın yer değiştirmesine oranlanarak bulunur. Formülde en üst katın 1. mod genliğinin 1 çıkması gerekir. φ_{ij} ’ler ise üst katın 1. modal genliği ile alt katın 1. modal genliğinin farkının alınmasıyla bulunur (Balkanlou ve diğ. 2013). Bu sönümleyici katsayısı daha sonra bütün katlara eşit olacak şekilde dağıtılmıştır.

2.5.3. KAİ+AVS 1’li Binanın Optimizasyon Süreci

Optimizasyon süreci AVS’li binanın optimizasyon süreciyle aynı olduğu için burada tekrardan bahsedilmeyecektir. Şekil 68’de KAİ+AVS 1’li bina görülmektedir. Seçili noktalar arasında kalanlar optimizasyon algoritması sonucu yerleştirilenler, diğer sönümleyiciler ise burulmayı ortadan kaldırmak için eklenen sönümleyicilerdir.



Şekil 68. Optimizasyon sonucu ve meydana gelen burulmayı engellemek için yerleştirilen sönümleyiciler

2.5.4. KAİ+AVS 1’li Binanın Sönümleme Katsayısının Bulunması

KAİ+AVS 1’li binanın sönümleme katsayısını bulmada kullanılacak değerler Tablo 20’de verilmiştir. Yapıda kullanılan periyot KAİ’li binanın periyodudur.

Tablo 20. Sönümleme katsayısını bulmak için kullanılan değerler

Sönümleyici verileri	Değerler	
Sönümleyicinin rijitliği (kN/m)	109454,28	
α	0,6	
ξ_d	0,2	
A (m)	0,024	
λ	3,42	
$\cos\theta_i$	0,64	
T(s)	1,10	
φ_i	6. kat	1
	5. kat	0,99
	4. kat	0,97
	3. kat	0,94
	2. kat	0,90
	1. kat	0,86
	Zemin kat	0,02
	6. kat	0,01
Φ_{rj}	5. kat	0,02
	4. kat	0,03
	3. kat	0,04
	2. kat	0,04
	1. kat	0,84
	Zemin kat	0,02
	6. kat	92,01
	5. kat	337,97
Kat kütleleri (ton)	4. kat	364,35
	3. kat	364,35
	2. kat	364,35
	1. kat	483,63
	Zemin kat	752,31
	c (kN*s/m)	4360,13

2.5.5. KAİ+AVS 2'li Binanın Sönümleme Katsayısının Bulunması

KAİ+AVS 2'li binada optimizasyon yapılmamış, onun yerine KAİ+AVS 1'li binaya alternatif olsun diye yapının altyapısına eklenmiştir. Bu yapıda sadece sönümleme katsayısı bulunmuştur. Sönümleme katsayısını bulmada yararlanılan parametreler Tablo 21'de verilmiştir.

Tablo 21. Sönümleme katsayını bulmak için kullanılan değerler

Sönümleyici verileri	Değerler	
Sönümleyicinin rijitliği (kN/m)	109454,28	
α	0,6	
ξ_d	0,2	
A (m)	0,026	
λ	3,42	
$\cos\theta_i$	0,64	
T(s)	1,10	
φ_i	6. kat	1
	5. kat	0,99
	4. kat	0,97
	3. kat	0,94
	2. kat	0,90
	1. kat	0,86
	Zemin kat	0,02
φ_{rj}	6. kat	0,01
	5. kat	0,02
	4. kat	0,03
	3. kat	0,04
	2. kat	0,04
	1. kat	0,85
	Zemin kat	0,02
Kat kütleleri (ton)	6. kat	66,52
	5. kat	286,99
	4. kat	313,36
	3. kat	313,36
	2. kat	313,36
	1. kat	457,17
	Zemin kat	877,67
c (kN*s/m)	3884,36	

SAP2000 programına AVS ataması için Define→Section Properties→Link/Support Properties menüsünden açılan Link/Support Properties ekranından Add New Property denilerek Link/Support Type kutucuğundan Damper-Exponential seçilir. Daha sonra ilgili parametreler ilgili kutucuklara girilir. Tablo 22’de AVS ile ilgili SAP2000 programına girilen parametrelerin değerleri verilmiştir.

Tablo 22. Analizlerde kullanılan AVS'nin mekanik özellikleri

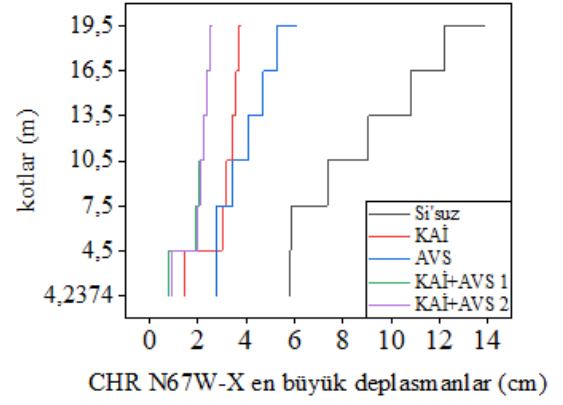
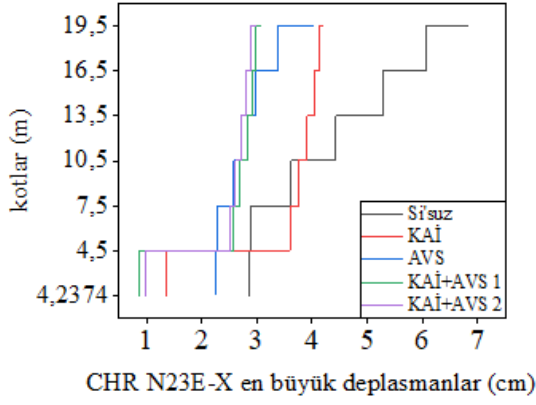
Kütle (kN*s ² / m)	Ağırlık (kN)	Serbes tlik Derece si	Rijitlik (kN/m)	Sönüm katsayısı (kN*s/m)			Hız üsteli
				AVS	KAI+A VS 1	KAI+A VS 2	
25,493	250	U1	109454,2815	19736,26	4360,13	3884,36	0,6

3. BULGULAR

Zaman tanım alanında analizleri yapılan 5 farklı bina modelinin sonuçları grafikler halinde sunulmuştur. Her analizde Sİ'suz binanın, KAİ'li binanın, AVS'li binanın, KAİ+AVS 1'li binanın, KAİ+AVS 2'li binanın verileri tek bir grafik altında verilmiştir. Ayrıca açılı kaydedilmiş olan depremlerin her iki yöndeki değerleri oldukça büyük olduğu için her iki yönün değerleri grafikler halinde verilmiştir. Ancak bir yönde kaydedilmiş olan depremlerin dik yöndeki değerleri oldukça küçük olduğu için sadece depreme paralel yöndeki değerlerin grafikleri sunulmuştur. Her ne kadar y yönü zayıf yön olsa da AVS'lerin konumundan ve açılı şekilde analiz edilen depremler oldukları için her iki yön analiz edilmiştir.

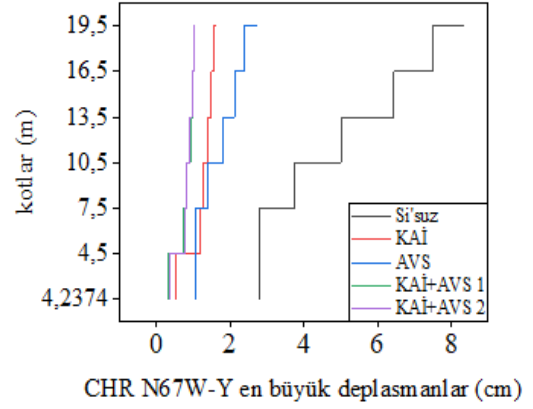
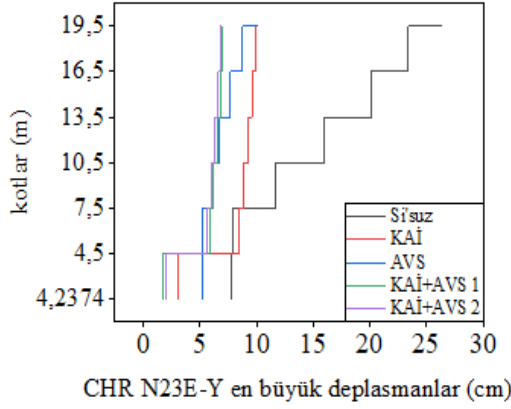
3.1. En Büyük Deplasmanların İncelenmesi

Christchurch New Zealand depremi uygulandığında katlarda oluşan en büyük deplasmanlar aşağıda Şekil 69 ve Şekil 70'te verilmiştir. Şekil 71 ve Şekil 72'de ise bu titreşim kontrol sistemlerinin Sİ'suz binanın deplasmanlarını yüzde kaç değiştirdiğini gösteren grafikler verilmiştir. Grafiklerden görüleceği gibi bina yalın halde daha çok deplasman yaptığı görülmüştür. Depremin N23E bileşeninde KAİ'li binanın yalıtım katındaki deplasmanı Sİ'suz binadan daha büyük olduğu görülmüştür. N23E bileşeninde AVS'li binanın deplasmanları ise KAİ'li binadan daha küçük olduğu görülmüştür. Ancak N67W bileşeninde ise AVS'li binanın deplasmanları KAİ'li binanın deplasmanlarından daha büyük çıktığı görülmüştür. Her iki bileşende de KAİ+AVS 1'li ve KAİ+AVS 2'li binaların deplasman değerleri diğerlerinden daha küçük çıktığı görülmüştür.



(a)

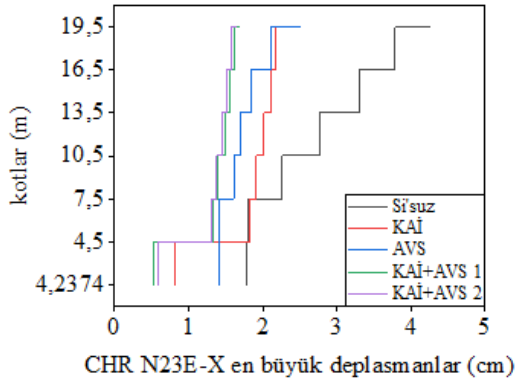
(b)



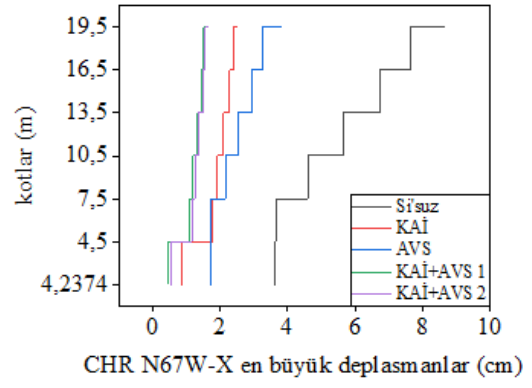
(c)

(d)

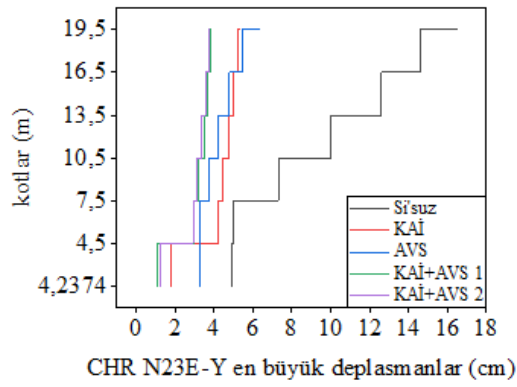
Şekil 69. Christchurch New Zealand Durum 1 katlarda oluşan en büyük deplasman değerleri (a) x yönündeki N23E bileşeninin değerleri (b) x yönündeki N67W bileşeninin değerleri (c) y yönündeki N23E bileşeninin değerleri (d) y yönündeki N67W bileşeninin değerleri



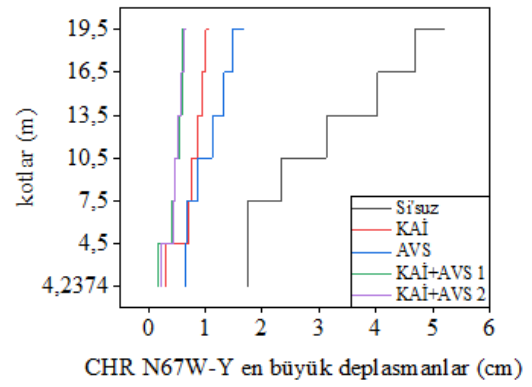
(a)



(b)

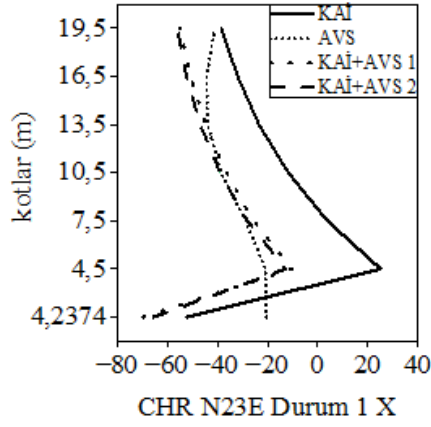


(c)

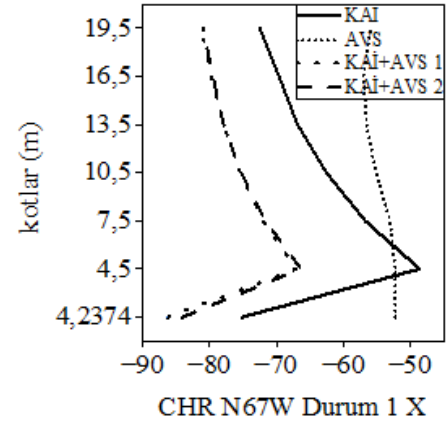


(d)

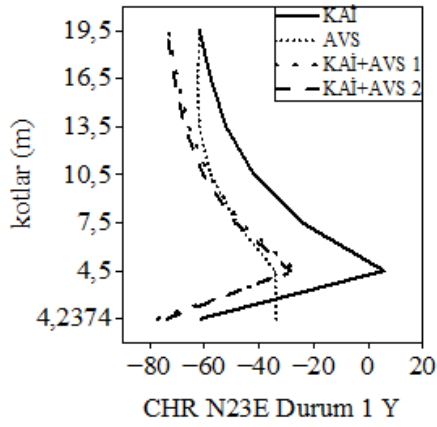
Şekil 70. Christchurch New Zealand Durum 2 katlarda oluşan en büyük deplasman değerleri (a) x yönündeki N23E bileşeninin değerleri (b) x yönündeki N67W bileşeninin değerleri (c) y yönündeki N23E bileşeninin değerleri (d) y yönündeki N67W bileşeninin değerleri



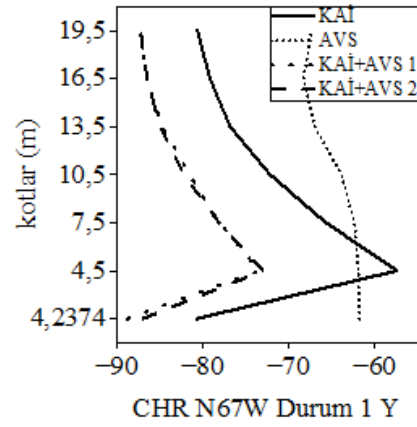
(a)



(b)

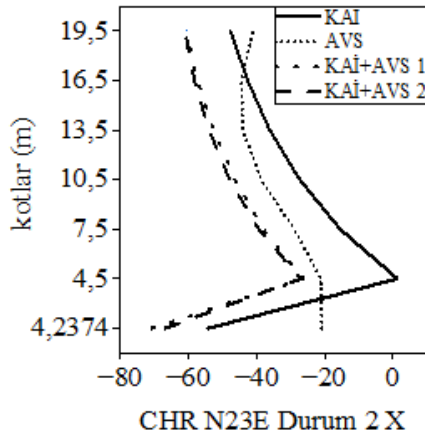


(c)

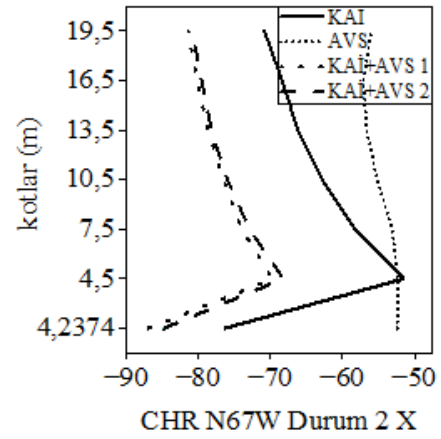


(d)

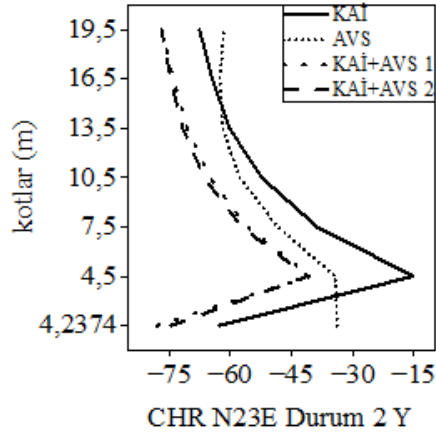
Şekil 71. Christchurch New Zealand Durum 1 katlarda oluşan en büyük deplasmanları titreşim kontrol sistemlerinin yüzde kaç değiştirdiğini gösteren grafikler (a) x yönündeki N23E bileşeninin değerleri (b) x yönündeki N67W bileşeninin değerleri (c) y yönündeki N23E bileşeninin değerleri (d) y yönündeki N67W bileşeninin değerleri



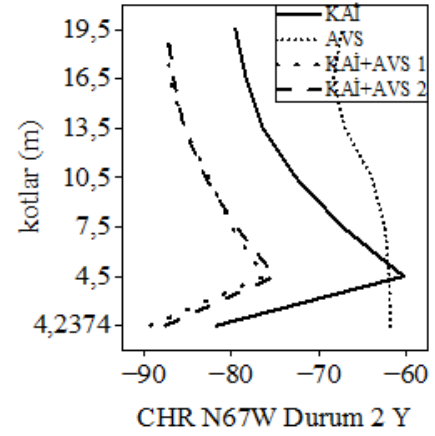
(a)



(b)



(c)

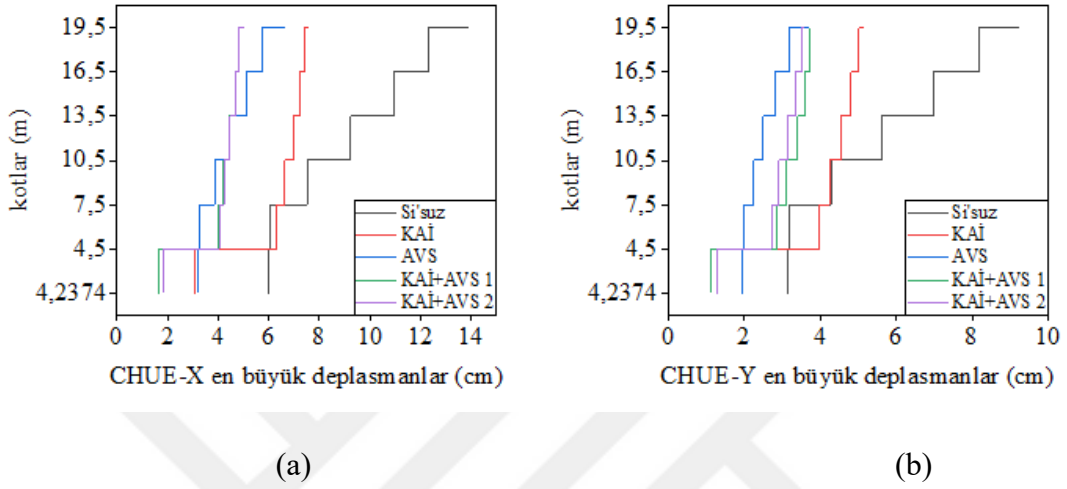


(d)

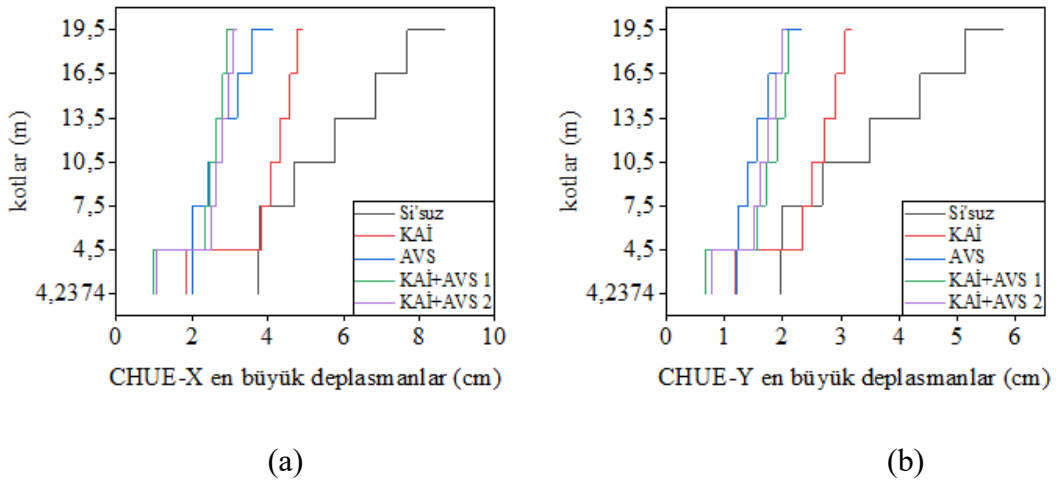
Şekil 72. Christchurch New Zealand Durum 2 katlarda oluşan en büyük deplasmanları titreşim kontrol sistemlerinin yüzde kaç değiştirdiğini gösteren grafikler (a) x yönündeki N23E bileşeninin değerleri (b) x yönündeki N67W bileşeninin değerleri (c) y yönündeki N23E bileşeninin değerleri (d) y yönündeki N67W bileşeninin değerleri

Chuetsu-oki depremi uygulandığında katlarda oluşan en büyük deplasmanlar aşağıda Şekil 73 ve Şekil 74'te verilmiştir. Şekil 75 ve Şekil 76'da ise bu titreşim kontrol sistemlerinin Sİ'suz binanın deplasmanlarını yüzde kaç değiştirdiğini gösteren grafikler verilmiştir. Grafiklerden görüleceği gibi Sİ'suz bina daha çok deplasman yaptığı görülmüştür. Depremi x yönündeki bileşeni y yönündeki bileşeninden daha fazla deplasman yaptığı görülmüştür. Depremde KAI'li bina, izolasyon eklendiği katta Sİ'suz binadan daha fazla deplasman yaptığı görülmüştür. Üstyapıda x yönünde 10,5 metreye kadar AVS'li binanın deplasmanları karma sistemli yapılardan daha küçük

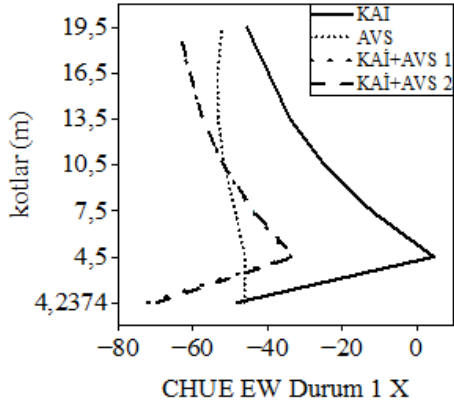
çıkarken 10,5 metreden sonra kadar AVS'li binanın deplasmanları daha büyük çıktığı görülmüştür. Ancak y yönünde AVS'li binanın deplasmanları karma sistemlerden daha düşük çıktığı görülmüştür.



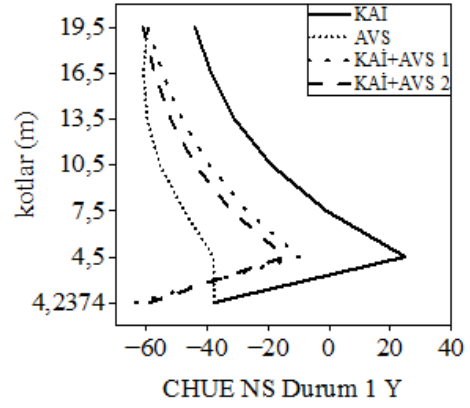
Şekil 73. Chuetsu-oki depremi Durum 1 katlarda oluşan en büyük deplasman değerleri (a) x yönü (b) y yönü



Şekil 74. Chuetsu-oki depremi Durum 2 katlarda oluşan en büyük deplasman değerleri (a) x yönü (b) y yönü

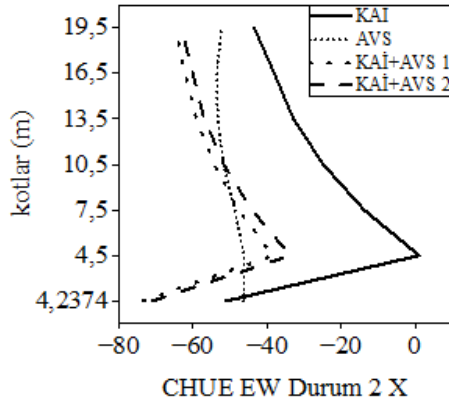


(a)

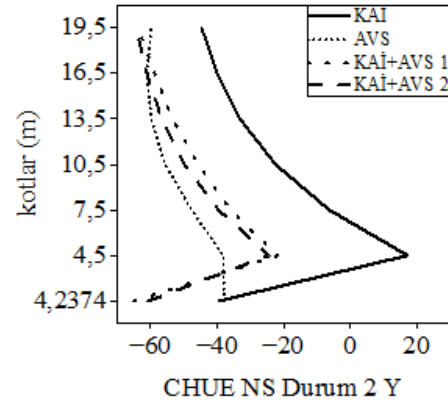


(b)

Şekil 75. Chuetsu-oki Durum 1 katlarda oluşan en büyük deplasmanları titreşim kontrol sistemlerinin yüzde kaç değiştirdiğini gösteren grafikler (a) x yönü (b) y yönü



(a)

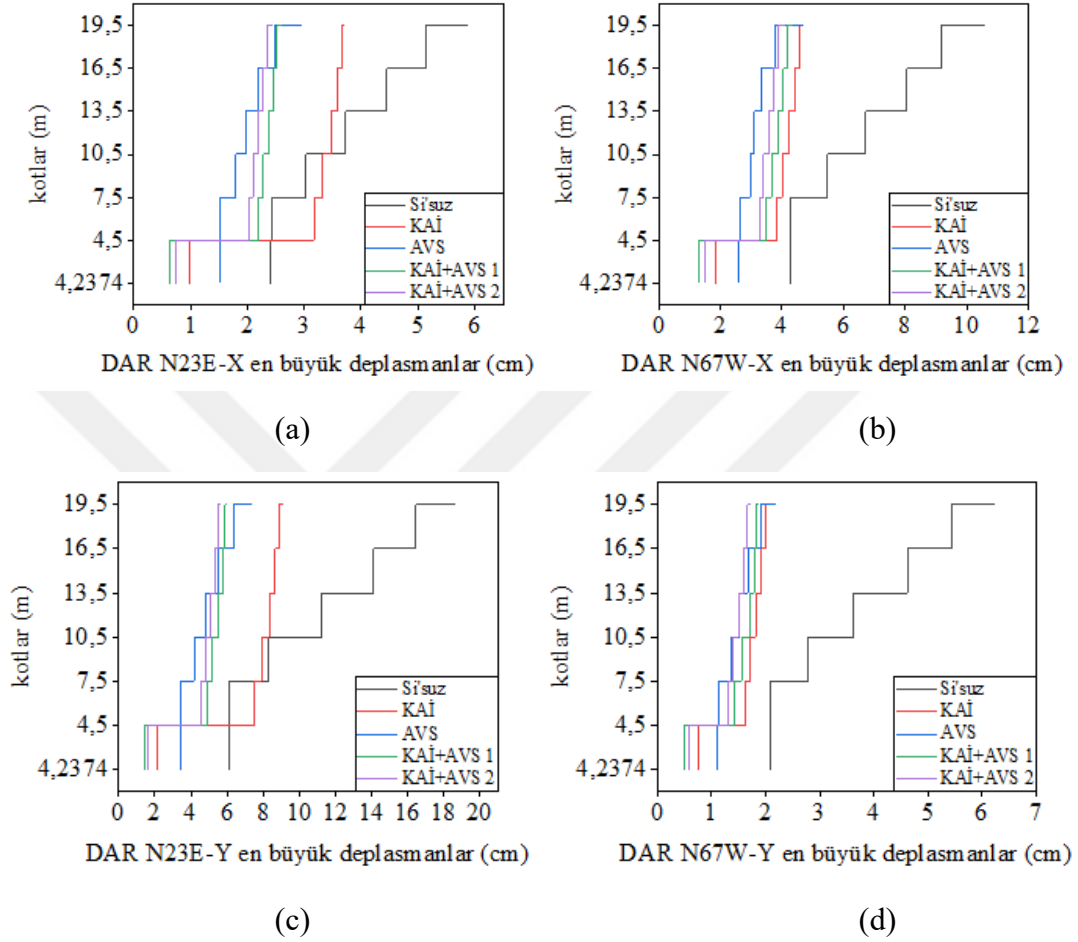


(b)

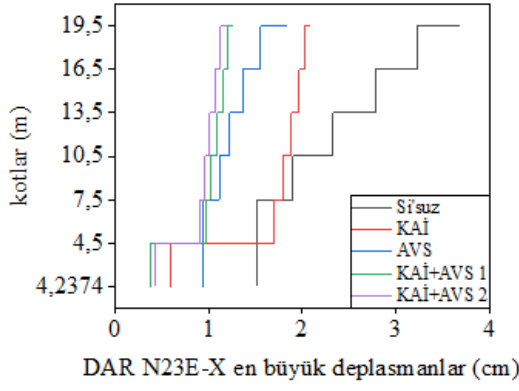
Şekil 76. Chuetsu-oki Durum 2 katlarda oluşan en büyük deplasmanları titreşim kontrol sistemlerinin yüzde kaç değiştirdiğini gösteren grafikler (a) x yönü (b) y yönü

Darfield New Zealand depremi uygulandığında katlarda oluşan en büyük deplasmanlar aşağıda Şekil 77 ve Şekil 78’de verilmiştir. Şekil 79 ve Şekil 80’de ise bu titreşim kontrol sistemlerinin Sİ’suz binanın deplasmanlarını yüzde kaç değiştirdiğini gösteren grafikler verilmiştir. Grafiklerden görüleceği üzere AVS’li bina KAI’li binadan daha az deplasman yaptığı görülmüştür. Depremi geliş açısı ve karakteristiğine göre bazısında AVS’li bina daha fazla deplasman yaptığı görülmüşken

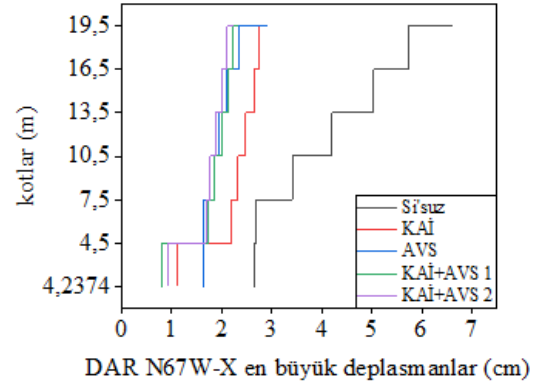
bazısında KAI+AVS 1 ve KAI+AVS 2'li binalar daha fazla deplasman yaptığı görülmüştür. KAI+AVS 1 ve KAI+AVS 2'li binalar benzer sonuçlar verdiği görülmüştür.



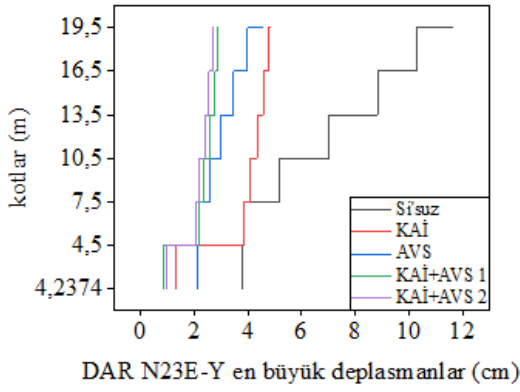
Şekil 77. Darfield New Zealand Durum 1 katlarda oluşan en büyük deplasman değerleri (a) x yönündeki N23E bileşeninin değerleri (b) x yönündeki N67W bileşeninin değerleri (c) y yönündeki N23E bileşeninin değerleri (d) y yönündeki N67W bileşeninin değerleri



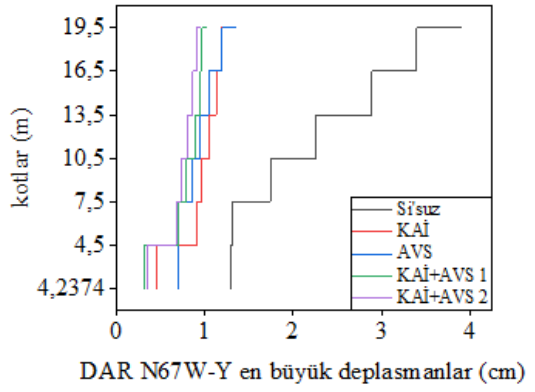
(a)



(b)

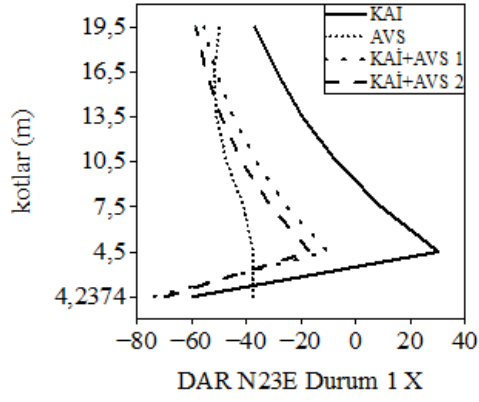


(c)

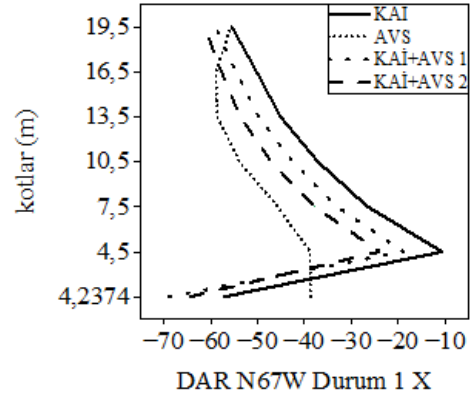


(d)

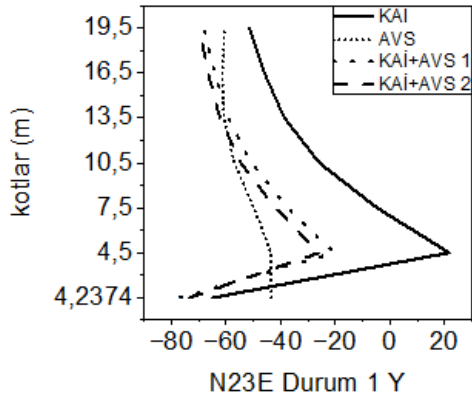
Şekil 78. Darfield New Zealand Durum 2 katlarda oluşan en büyük deplasman değerleri (a) x yönündeki N23E bileşeninin değerleri (b) x yönündeki N67W bileşeninin değerleri (c) y yönündeki N23E bileşeninin değerleri (d) y yönündeki N67W bileşeninin değerleri



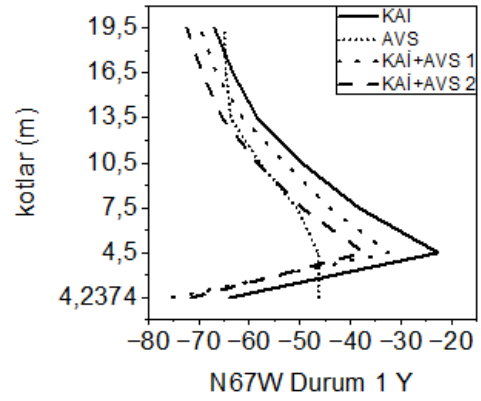
(a)



(b)

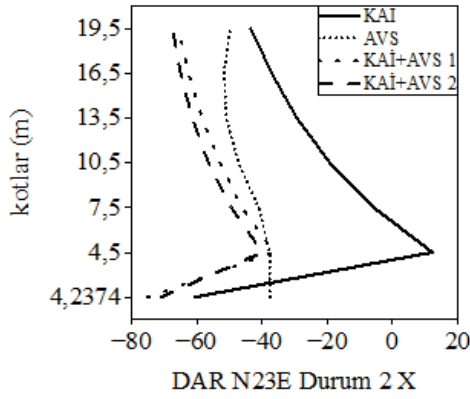


(c)

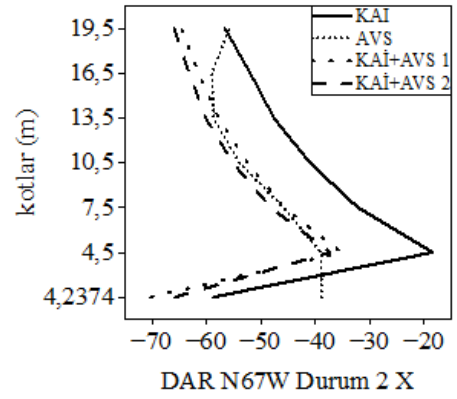


(d)

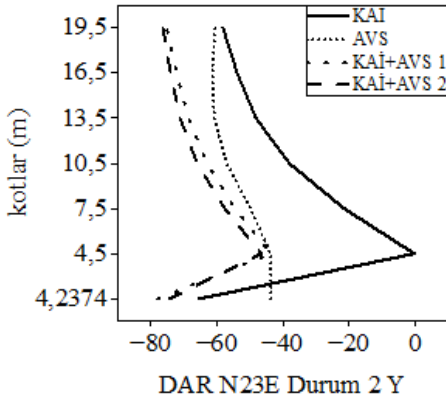
Şekil 79. Darfield New Zealand Durum 1 katlarda oluşan en büyük deplasmanları titreşim kontrol sistemlerinin yüzde kaç değiştirdiğini gösteren grafikler (a) x yönündeki N23E bileşeninin değerleri (b) x yönündeki N67W bileşeninin değerleri (c) y yönündeki N23E bileşeninin değerleri (d) y yönündeki N67W bileşeninin değerleri



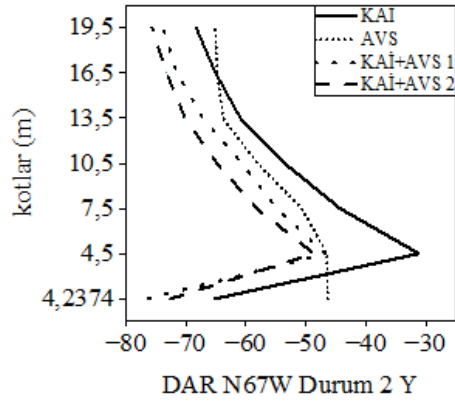
(a)



(b)



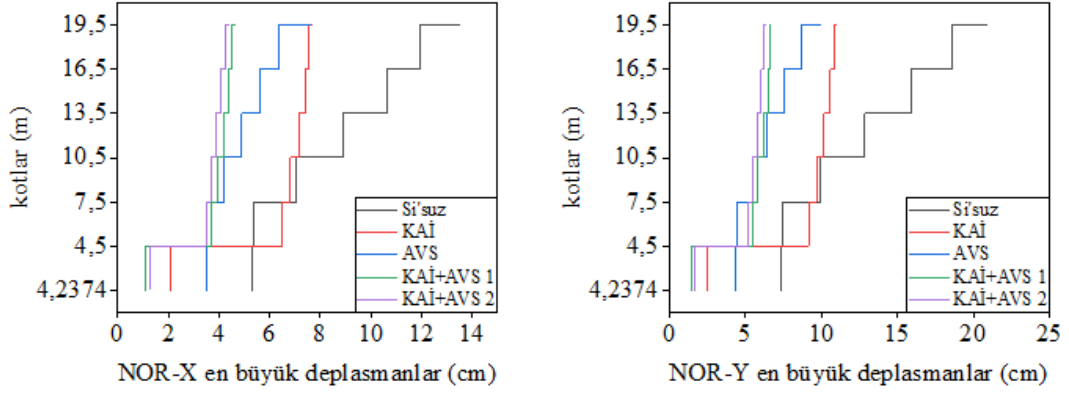
(c)



(d)

Şekil 80. Darfield New Zealand Durum 2 katlarda oluşan en büyük deplasmanları titreşim kontrol sistemlerinin yüzde kaç değiştirdiğini gösteren grafikler (a) x yönündeki N23E bileşeninin değerleri (b) x yönündeki N67W bileşeninin değerleri (c) y yönündeki N23E bileşeninin değerleri (d) y yönündeki N67W bileşeninin değerleri

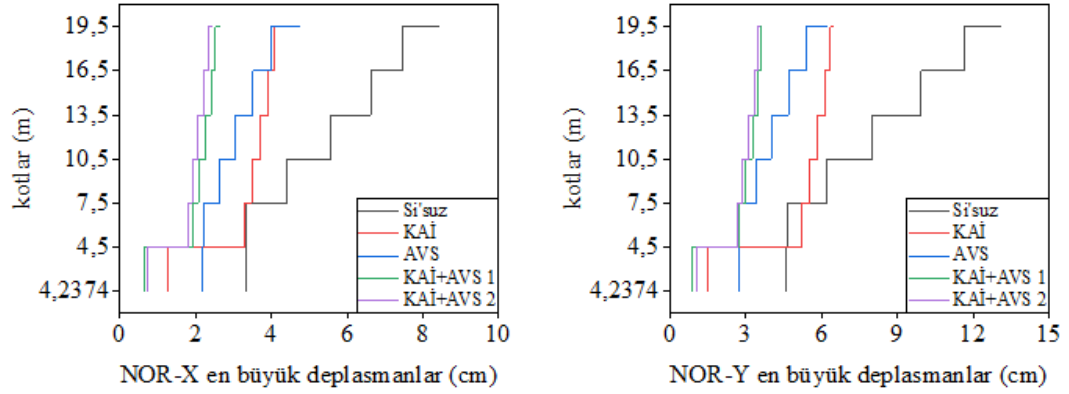
Northridge depremi uygulandığında katlarda oluşan en büyük deplasmanlar aşağıda Şekil 81 ve Şekil 82’de verilmiştir. Şekil 83 ve Şekil 84’te ise bu titreşim kontrol sistemlerinin Sİ’suz binanın deplasmanlarını yüzde kaç değiştirdiğini gösteren grafikler verilmiştir. Grafiklerden anlaşılabacağı üzere AVS’li bina, KAI’li bina daha düşük deplasman yaptığı görülmüştür. KAI+AVS 1 ve KAI+AVS 2’li binalar ise AVS’li binadan daha düşük deplasman yaptığı görülmüştür.



(a)

(b)

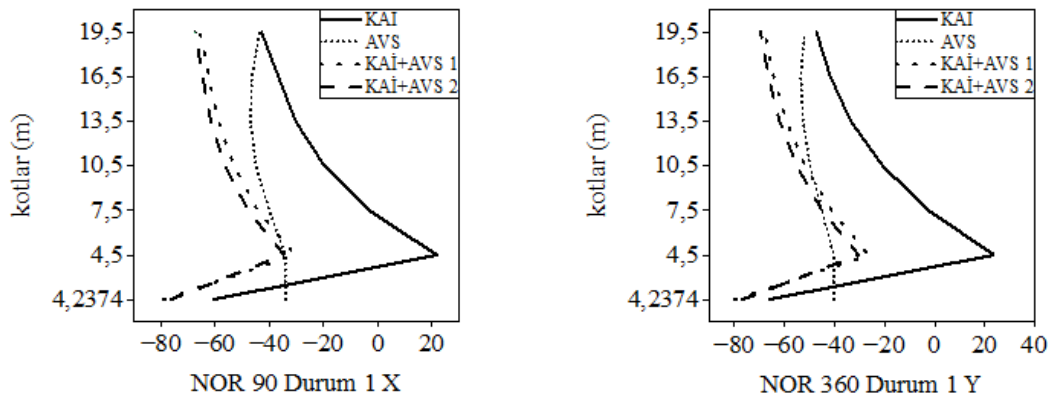
Şekil 81. Northridge Durum 1 katlarda oluşan en büyük deplasman değerleri (a) x yönü (b) y yönü



(a)

(b)

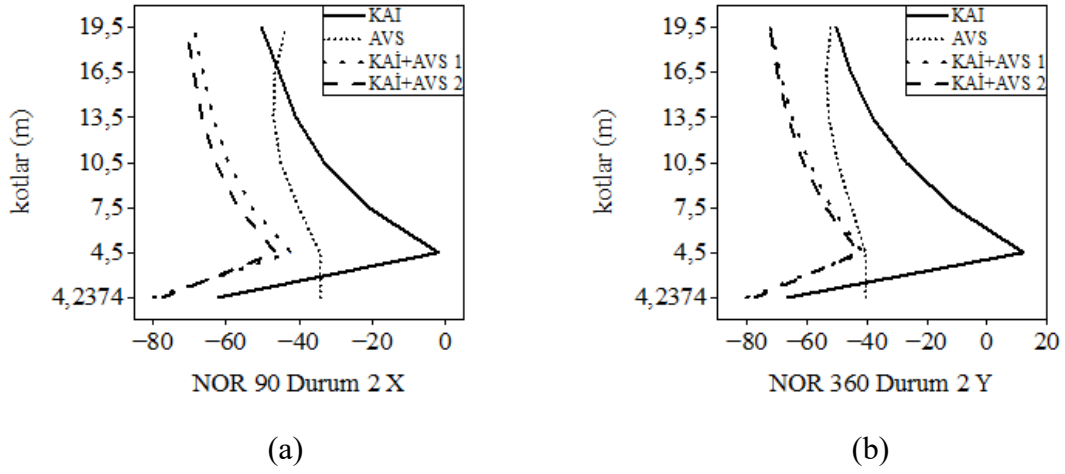
Şekil 82. Northridge Durum 2 katlarda oluşan en büyük deplasman değerleri (a) x yönü (b) y yönü



(a)

(b)

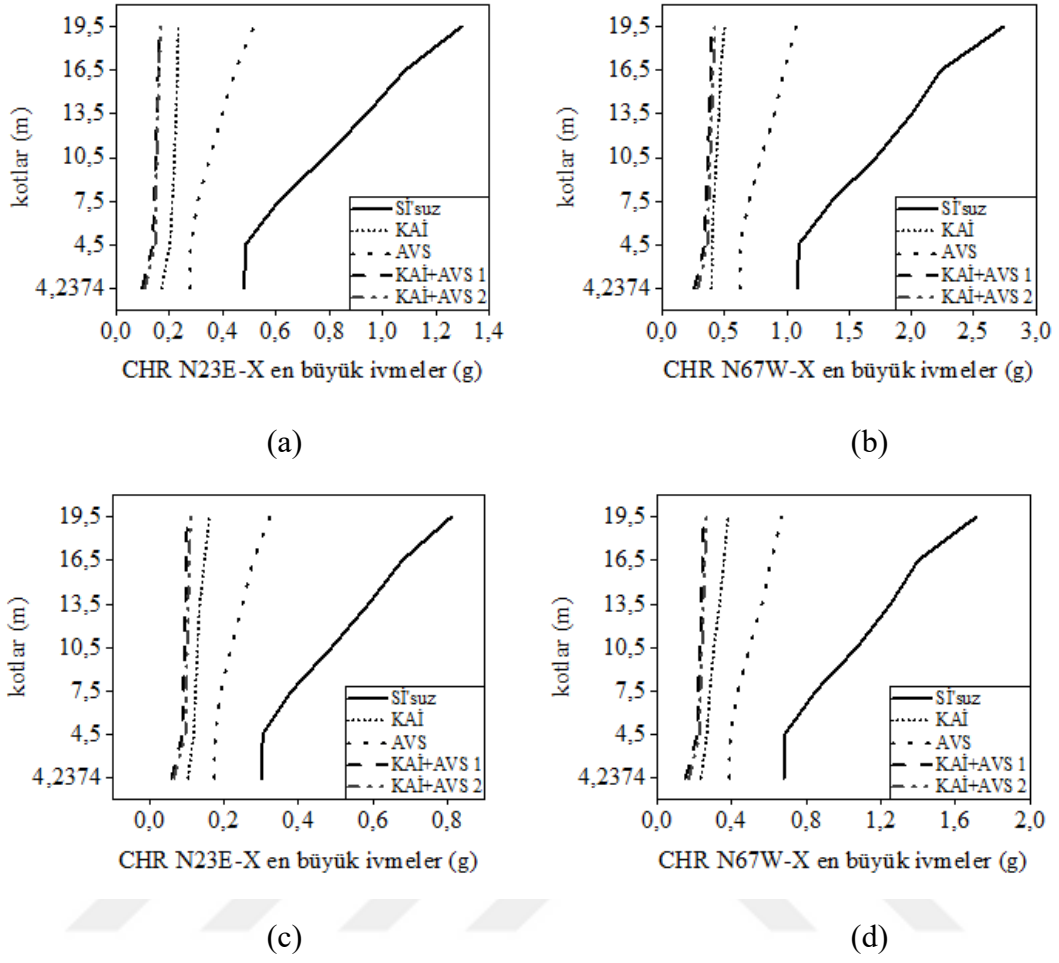
Şekil 83. Northridge Durum 1 katlarda oluşan en büyük deplasmanları titreşim kontrol sistemlerinin yüzde kaç değiştirdiğini gösteren grafikler (a) x yönü (b) y yönü



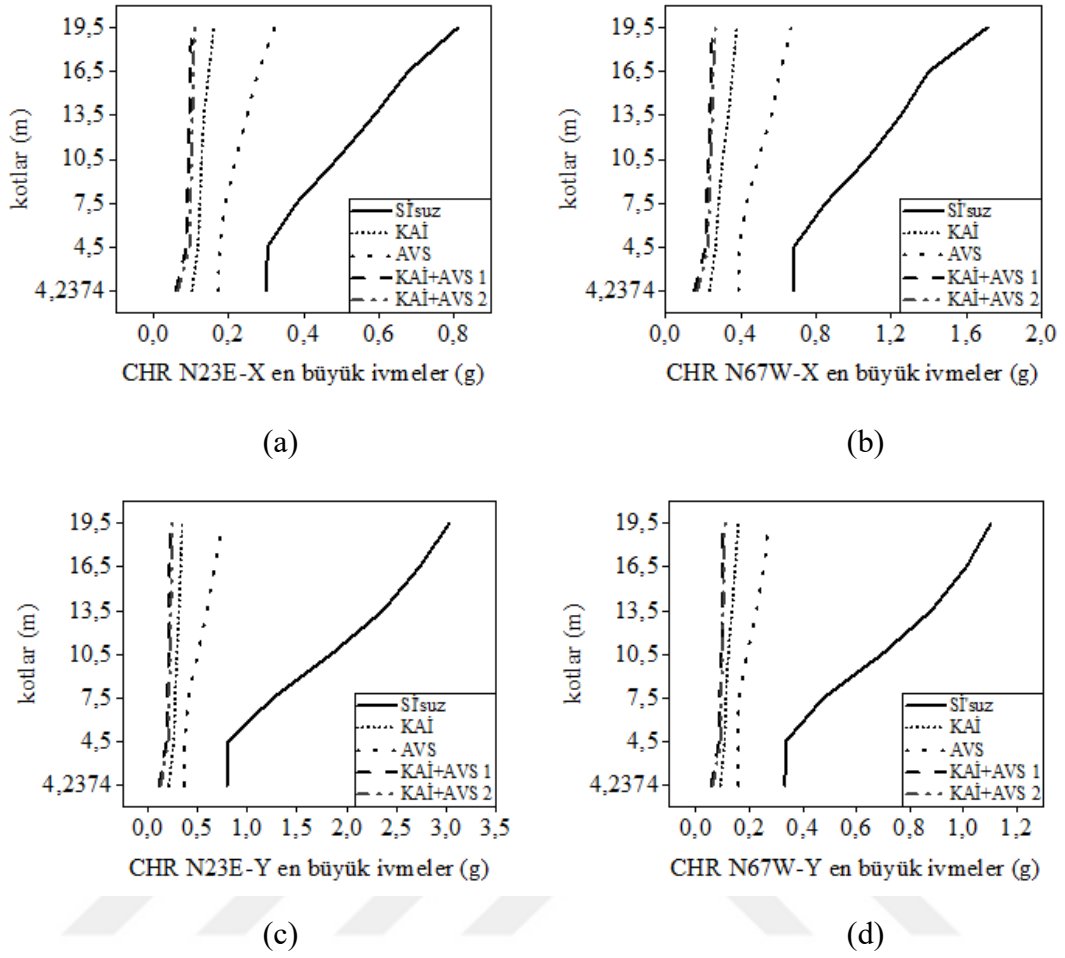
Şekil 84. Northridge Durum 2 katlarda oluşan en büyük deplasmanları titreşim kontrol sistemlerinin yüzde kaç değiştirdiğini gösteren grafikler (a) x yönü (b) y yönü

3.2. En Büyük İvmelerin İncelenmesi

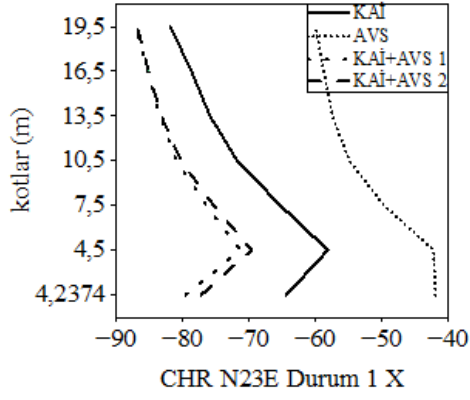
Christchurch New Zealand depremi uygulandığında katlarda oluşan en büyük en büyük ivmeler aşağıda Şekil 85 ve Şekil 86'da verilmiştir. Şekil 87 ve Şekil 88'de ise bu titreşim kontrol sistemlerinin Sİ'suz binanın deplasmanlarını yüzde kaç değiştirdiğini gösteren grafikler verilmiştir. Grafiklerden anlaşılacağı üzere AVS'li bina her iki yönde ve her iki deprem düzeyinde ivmeleri düşürmede diğerlerinden daha düşük bir performans gösterdiği görülmüştür.



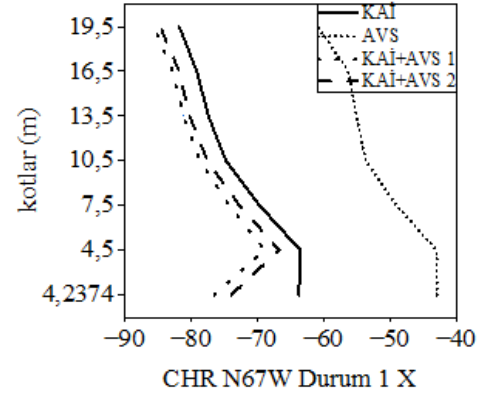
Şekil 85. Christchurch New Zealand Durum 1 katlarda oluşan en büyük ivme değerleri (a) x yönündeki N23E bileşeninin değerleri (b) x yönündeki N67W bileşeninin değerleri (c) y yönündeki N23E bileşeninin değerleri (d) y yönündeki N67W bileşeninin değerleri



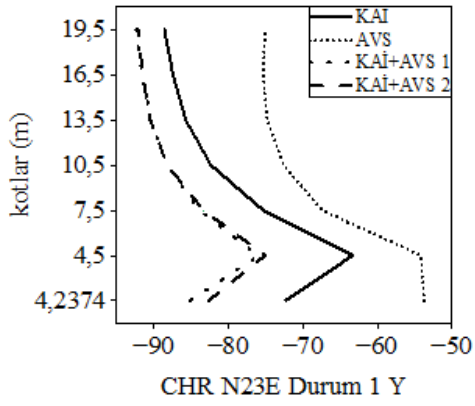
Şekil 86. Christchurch New Zealand Durum 2 katlarda oluşan en büyük ivme değerleri (a) x yönündeki N23E bileşeninin değerleri (b) x yönündeki N67W bileşeninin değerleri (c) y yönündeki N23E bileşeninin değerleri (d) y yönündeki N67W bileşeninin değerleri



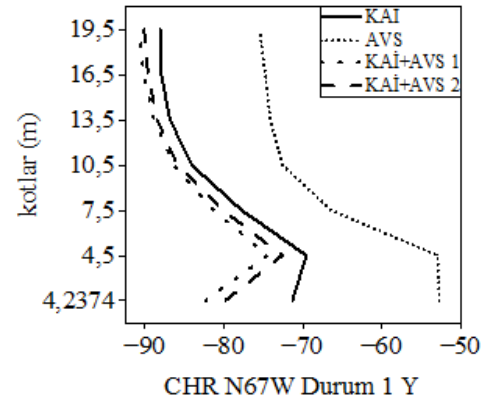
(a)



(b)

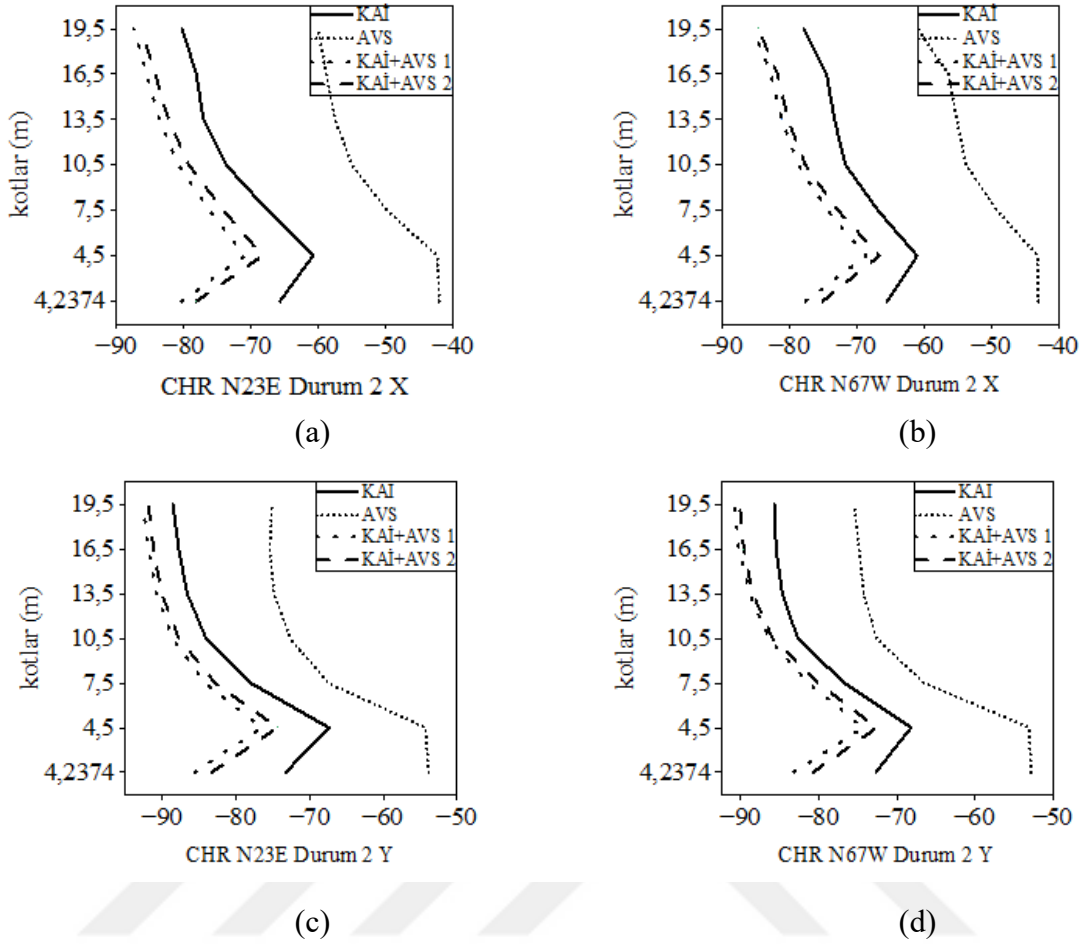


(c)



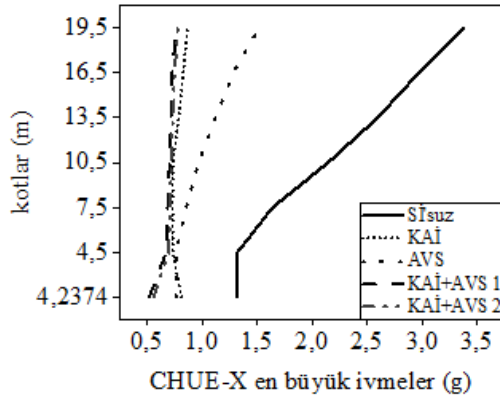
(d)

Şekil 87. Christchurch New Zealand Durum 1 katlarda oluşan en büyük ivmeleri titreşim kontrol sistemlerinin yüzde kaç değiştirdiğini gösteren grafikler (a) x yönündeki N23E bileşeninin değerleri (b) x yönündeki N67W bileşeninin değerleri (c) y yönündeki N23E bileşeninin değerleri (d) y yönündeki N67W bileşeninin değerleri

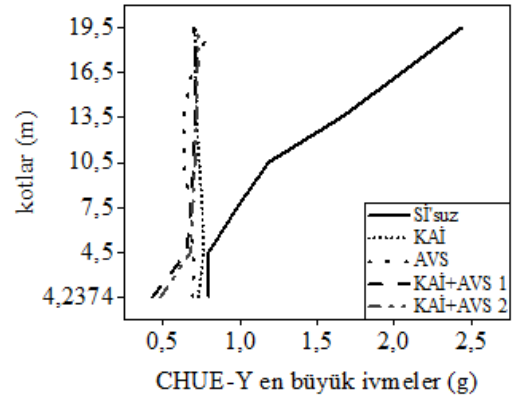


Şekil 88. Christchurch New Zealand Durum 2 katlarda oluşan en büyük ivmeleri titreşim kontrol sistemlerinin yüzde kaç değiştirdiğini gösteren grafikler (a) x yönündeki N23E değerleri (b) x yönündeki N67W değerleri (c) y yönündeki N23E değerleri (d) y yönündeki N67W değerleri

Chuetsu-oki depremi uygulandığında katlarda oluşan en büyük ivmeler aşağıda Şekil 89 ve Şekil 90'da verilmiştir. Şekil 91 ve Şekil 92'de ise bu titreşim kontrol sistemlerinin SI'suz binanın deplasmanlarını yüzde kaç değiştirdiğini gösteren grafikler verilmiştir. Grafiklerden anlaşılacağı üzere x yönünde AVS'li bina diğerlerinden daha az verimli olduğu görülmüşken y yönünde oldukça verimli çalışmış ve diğerleriyle yaklaşık eşit performans gösterdiği görülmüştür.

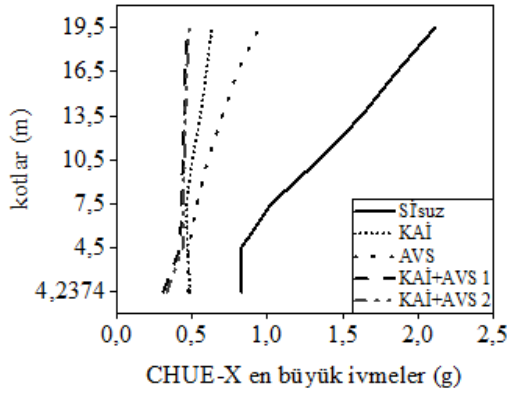


(a)

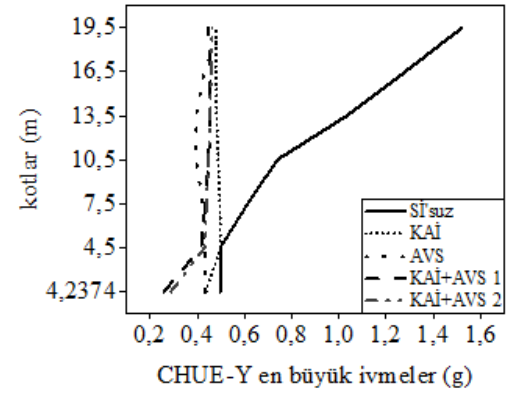


(b)

Şekil 89. Chuetsu-oki Durum 1 katlarda oluşan en büyük ivme değerleri (a) x yönü
(b) y yönü

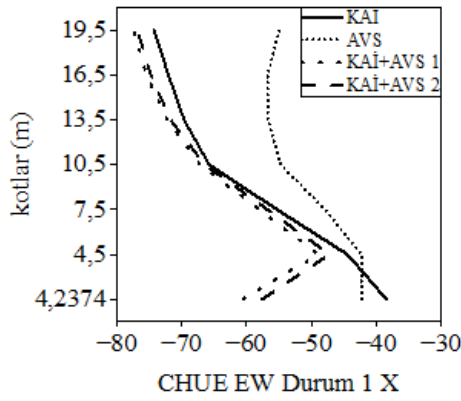


(a)

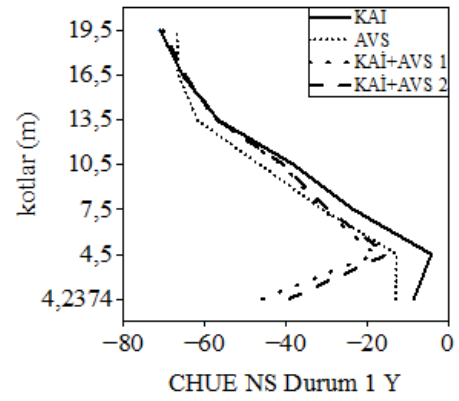


(b)

Şekil 90. Chuetsu-oki Durum 2 katlarda oluşan en büyük ivme değerleri (a) x yönü
(b) y yönü

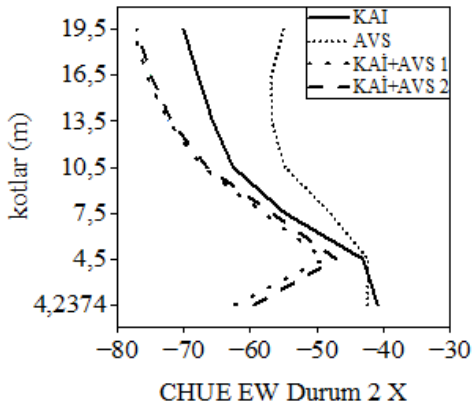


(a)

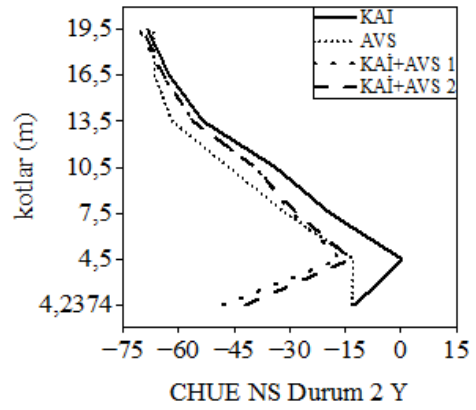


(b)

Şekil 91. Chuetsu-oki Durum 1 katlarda oluşan en büyük ivmeleri titreşim kontrol sistemlerinin yüzde kaç değiştirdiğini gösteren grafikler (a) x yönü (b) y yönü



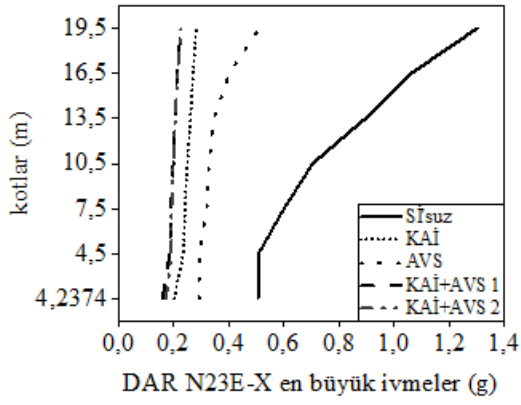
(a)



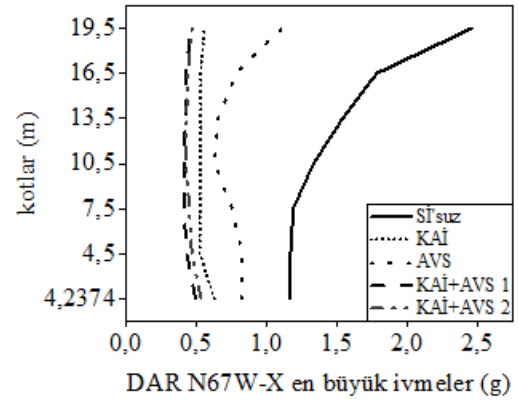
(b)

Şekil 92. Chuetsu-oki Durum 2 katlarda oluşan en büyük ivmeleri titreşim kontrol sistemlerinin yüzde kaç değiştirdiğini gösteren grafikler (a) x yönü (b) y yönü

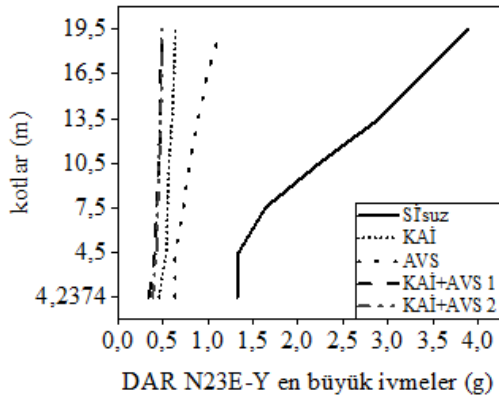
Darfield New Zealand depremi uygulandığında katlarda oluşan en büyük ivmeler aşağıda Şekil 93 ve Şekil 94'te verilmiştir. Şekil 95 ve Şekil 96'da ise bu titreşim kontrol sistemlerinin Sİ'suz binanın deplasmanlarını yüzde kaç değiştirdiğini gösteren grafikler verilmiştir. Grafiklerden anlaşılabacağı üzere AVS'li binanın her iki yönde ve her iki durumda ivmeleri düşürmede diğerlerinden daha düşük bir performans gösterdiği görülmüştür.



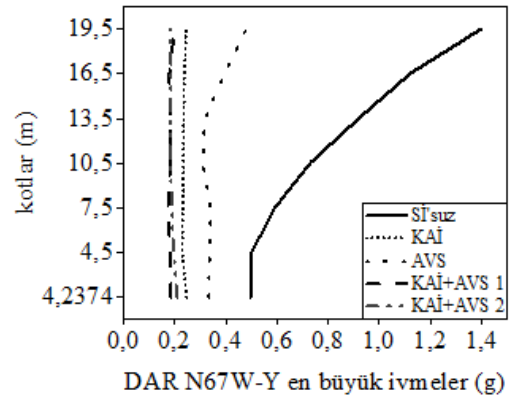
(a)



(b)

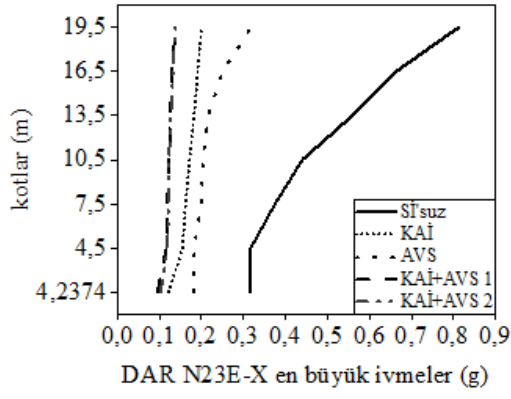


(c)

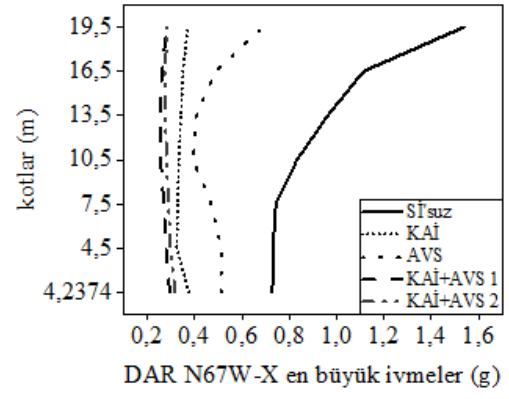


(d)

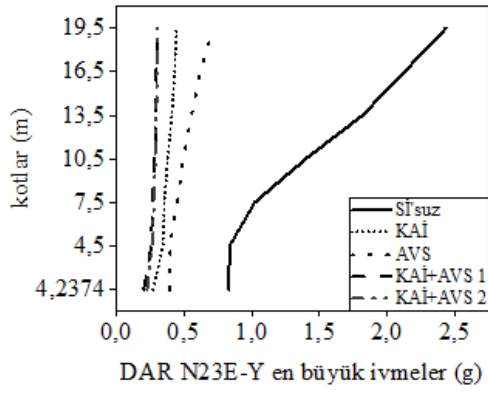
Şekil 93. Darfield New Zealand Durum 1 katlarda oluşan en büyük ivme değerleri (a) x yönündeki N23E bileşeninin değerleri (b) x yönündeki N67W bileşeninin değerleri (c) y yönündeki N23E bileşeninin değerleri (d) y yönündeki N67W bileşeninin değerleri



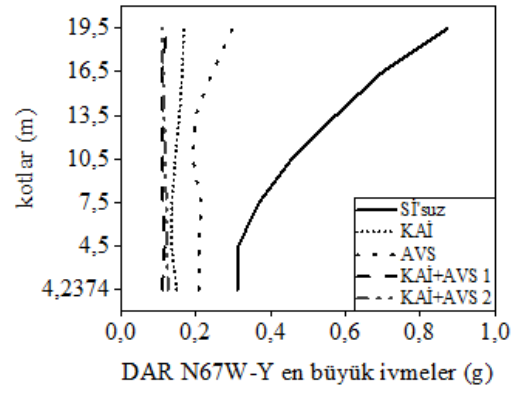
(a)



(b)

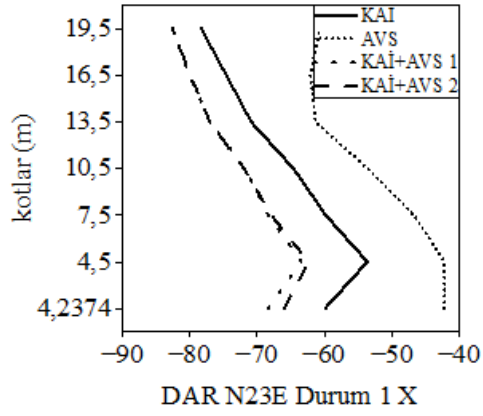


(c)

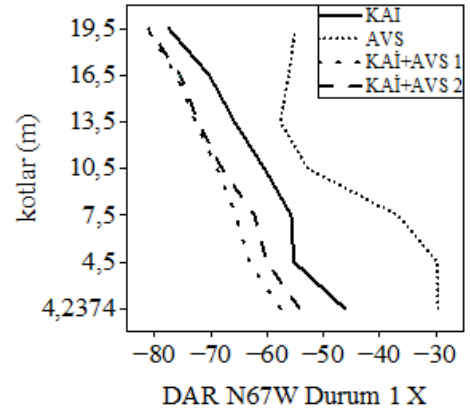


(d)

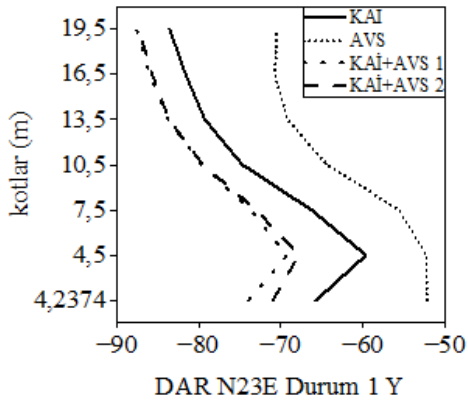
Şekil 94. Darfield New Zealand Durum 2 katlarda oluşan en büyük ivme değerleri
 (a) x yönündeki N23E bileşeninin değerleri (b) x yönündeki N67W bileşeninin
 değerleri (c) y yönündeki N23E bileşeninin değerleri (d) y yönündeki N67W
 bileşeninin değerleri



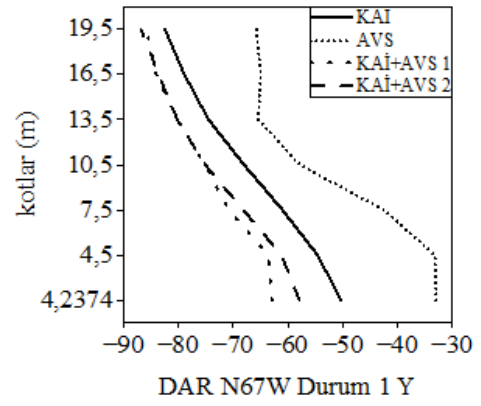
(a)



(b)

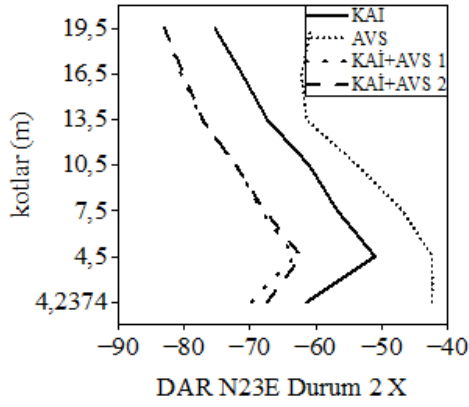


(c)

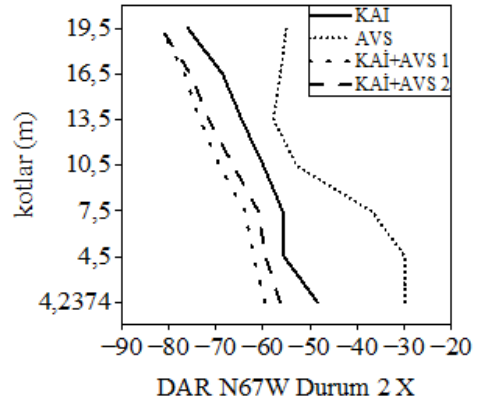


(d)

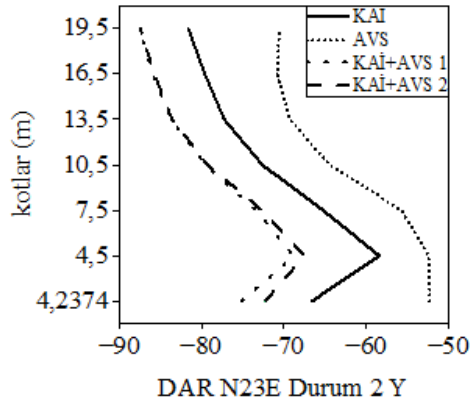
Şekil 95. Darfield New Zealand Durum 1 katlarda oluşan en büyük ivmeleri titreşim kontrol sistemlerinin yüzde kaç değiştirdiğini gösteren grafikler (a) x yönündeki N23E değerleri (b) x yönündeki N67W değerleri (c) y yönündeki N23E değerleri (d) y yönündeki N67W değerleri



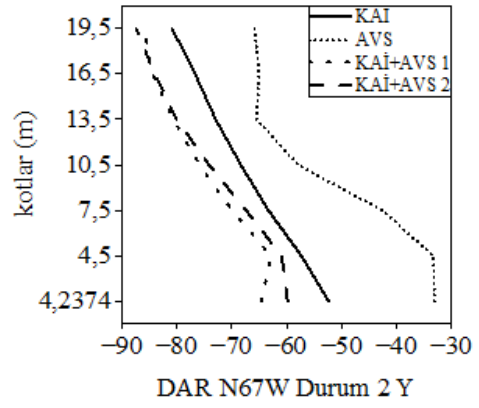
(a)



(b)



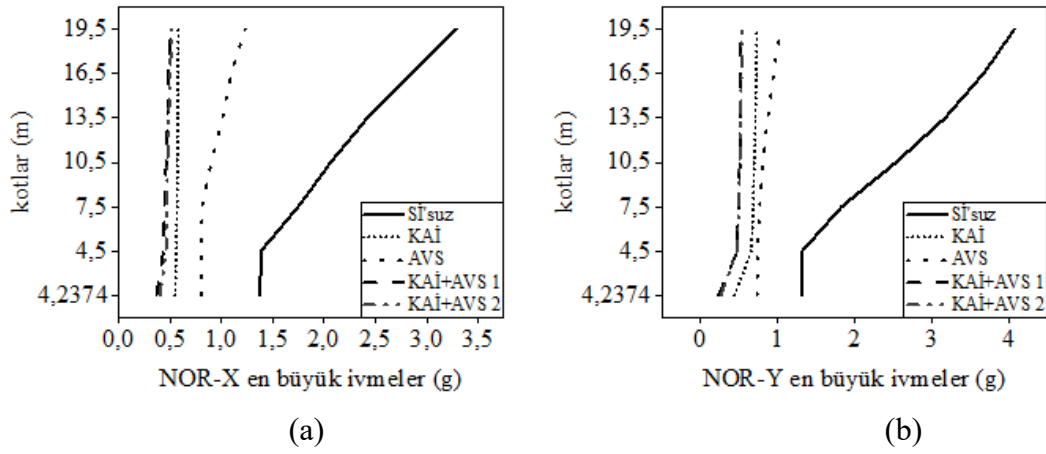
(c)



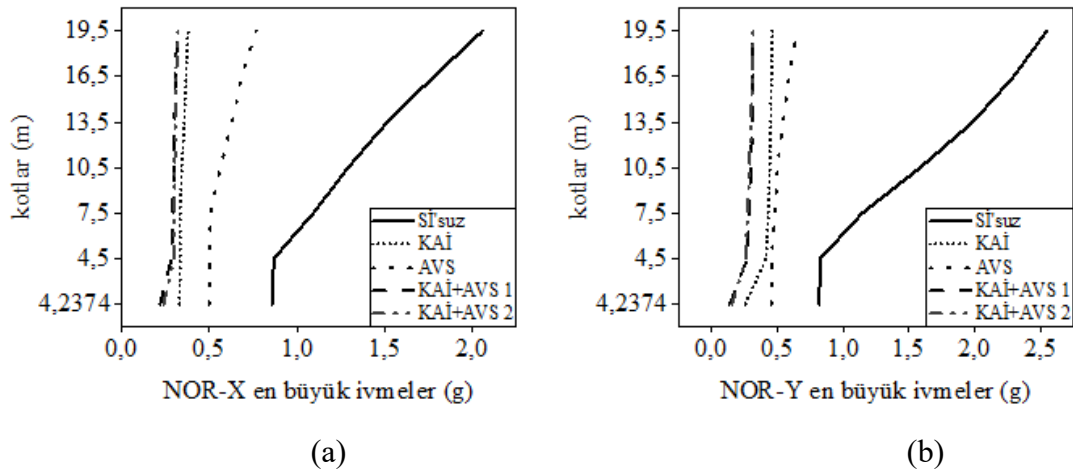
(d)

Şekil 96. Darfield New Zealand Durum 2 katlarda oluşan en büyük ivmeleri titreşim kontrol sistemlerinin yüzde kaç değiştirdiğini gösteren grafikler (a) x yönündeki N23E değerleri (b) x yönündeki N67W değerleri (c) y yönündeki N23E değerleri (d) y yönündeki N67W değerleri

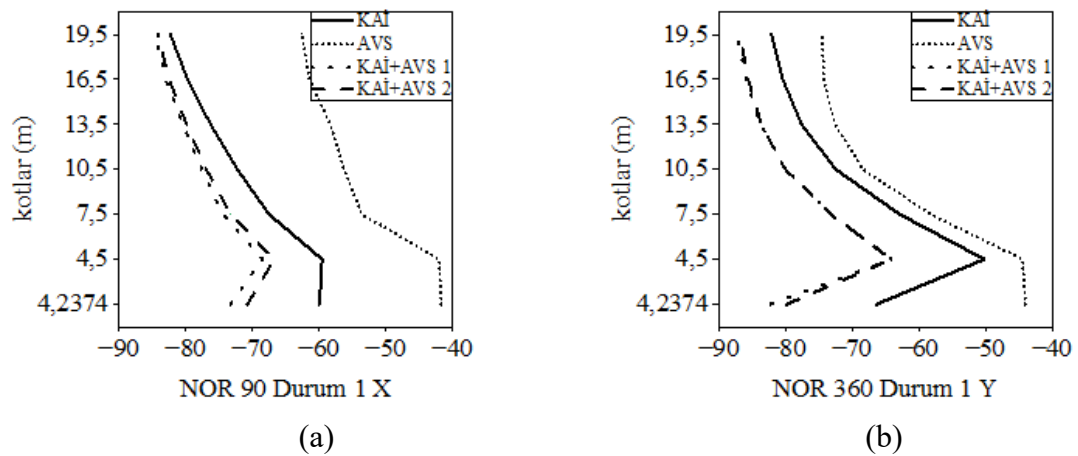
Northridge depremi uygulandığında katlarda oluşan en büyük ivmeler aşağıda Şekil 97 ve Şekil 98’de verilmiştir. Şekil 99 ve Şekil 100’de ise bu titreşim kontrol sistemlerinin Sİ’suz binanın deplasmanlarını yüzde kaç değiştirdiğini gösteren grafikler verilmiştir. Grafiklerden anlaşılacağı üzere AVS’li binanın her iki yönde ve her iki durumda ivmeleri düşürmede diğerlerinden daha düşük bir performans gösterdiği görülmüştür.



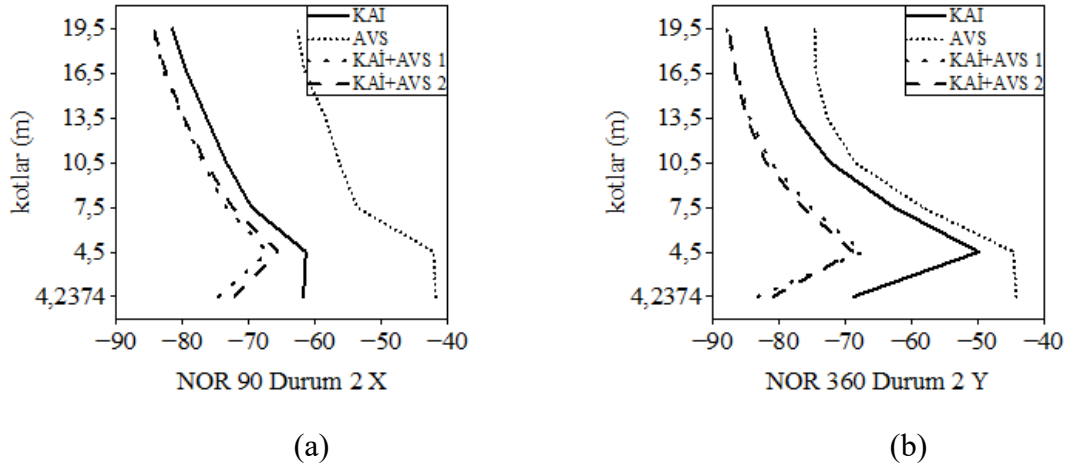
Şekil 97. Northridge Durum 1 katlarda oluşan en büyük ivme değerleri (a) x yönü (b) y yönü



Şekil 98. Northridge Durum 2 katlarda oluşan en büyük ivme değerleri (a) x yönü (b) y yönü



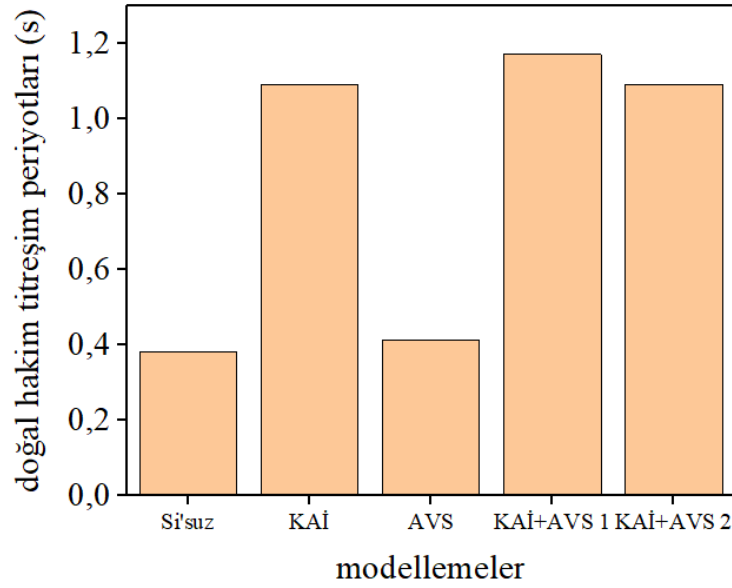
Şekil 99. Northridge Durum 1 katlarda oluşan en büyük ivmeleri titreşim kontrol sistemlerinin yüzde kaç değiştirdiğini gösteren grafikler (a) x yönü (b) y yönü



Şekil 100. Northridge Durum 2 katlarda oluşan en büyük ivmeleri titreşim kontrol sistemlerinin yüzde kaç değiştirdiğini gösteren grafikler (a) x yönü (b) y yönü

3.3. Doğal Hâkim Titreşim Periyotlarının İncelenmesi

Yapı modellerine ait doğal hâkim titreşim periyotları Şekil 101’de verilmiştir.



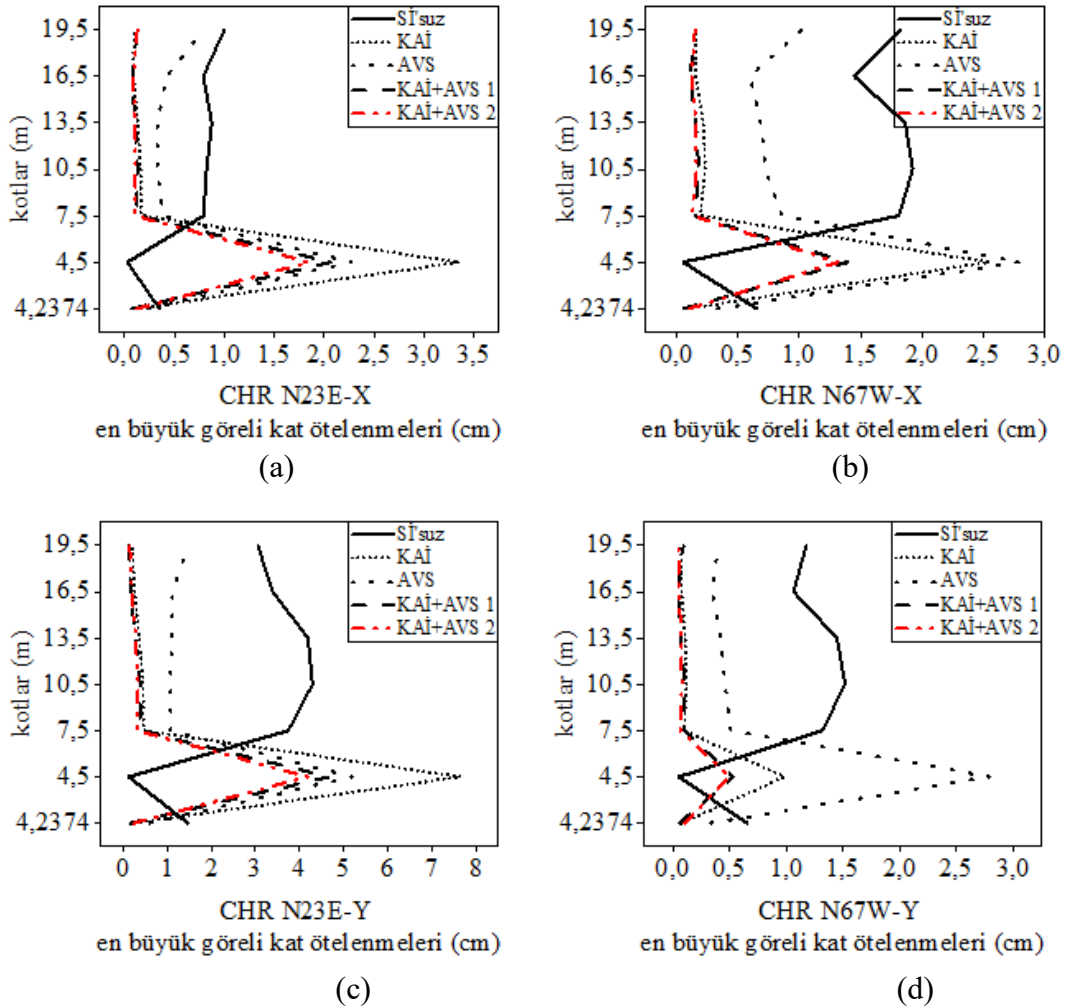
Şekil 101. Doğal hâkim titreşim periyotları

Grafikten görüldüğü gibi KAI’li bina SI’suz binanın doğal hâkim titreşim periyodunu büyük oranda arttırdığı görülmüştür. AVS’li bina ise çok fazla bir artışa sebep olmadığı görülmüştür. KAI+AVS 1’li binanın doğal hâkim titreşim periyodu KAI’li binadan biraz daha fazla olduğu görülmüştür. KAI+AVS 2’li binanın doğal

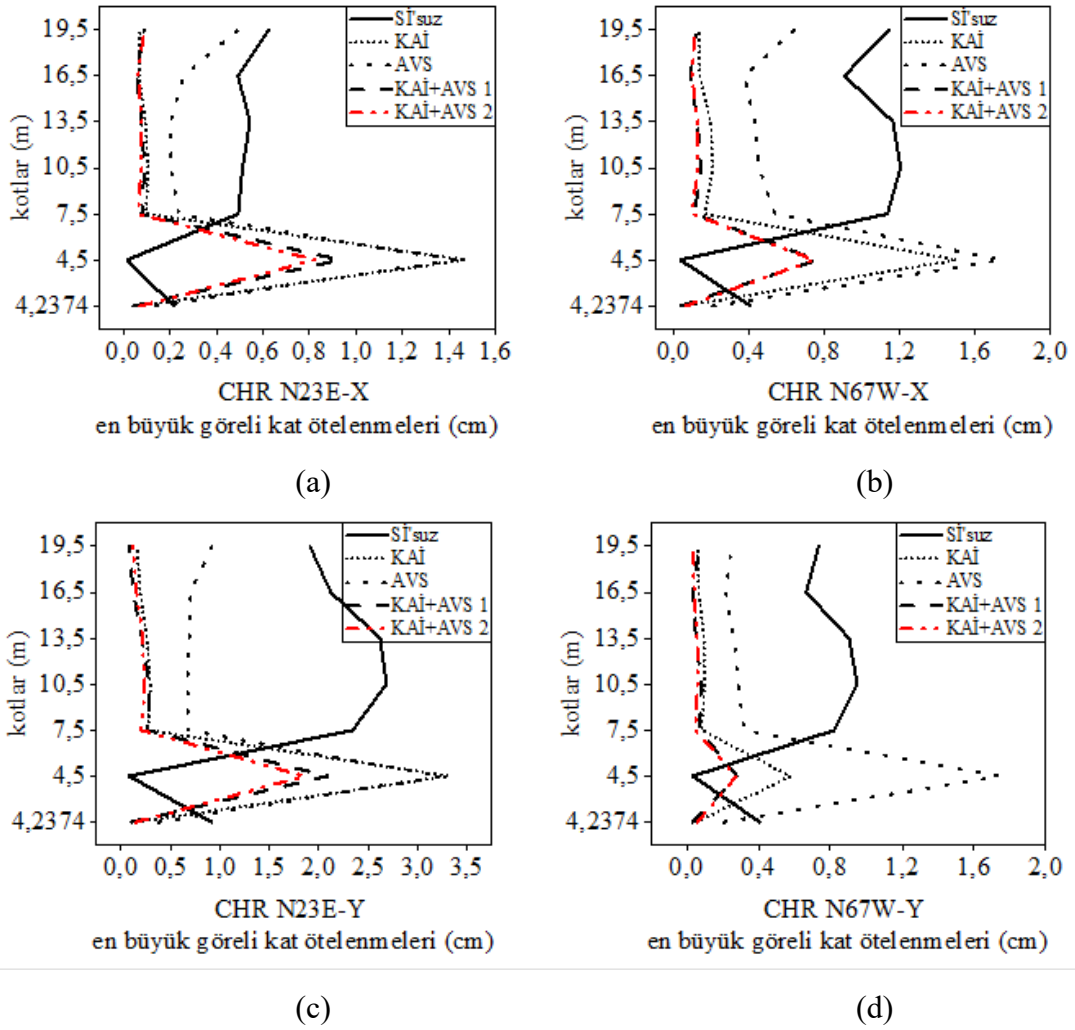
hâkim titreşim periyodu KAI'li binaya nazaran hemen hemen aynı olduğu görülmüştür.

3.4. En Büyük Göreli Kat Ötelenmelerinin İncelenmesi

Christchurch New Zealand depremi uygulandığında katlarda oluşan en büyük göreli kat ötelenmeleri aşağıda Şekil 102 ve Şekil 103'te verilmiştir. Grafiklerden anlaşılacağı üzere AVS'li binalar her iki yönde ve her iki durumda göreli kat ötelenmeleri düşürmede en düşük performans gösteren titreşim kontrol sistemi olduğu görülmüştür. Diğer titreşim kontrol sistemlerinin deprem analizi sonucu elde edilen göreli kat ötelenmeleri birbirlerine yakın çıktıkları görülmüştür.

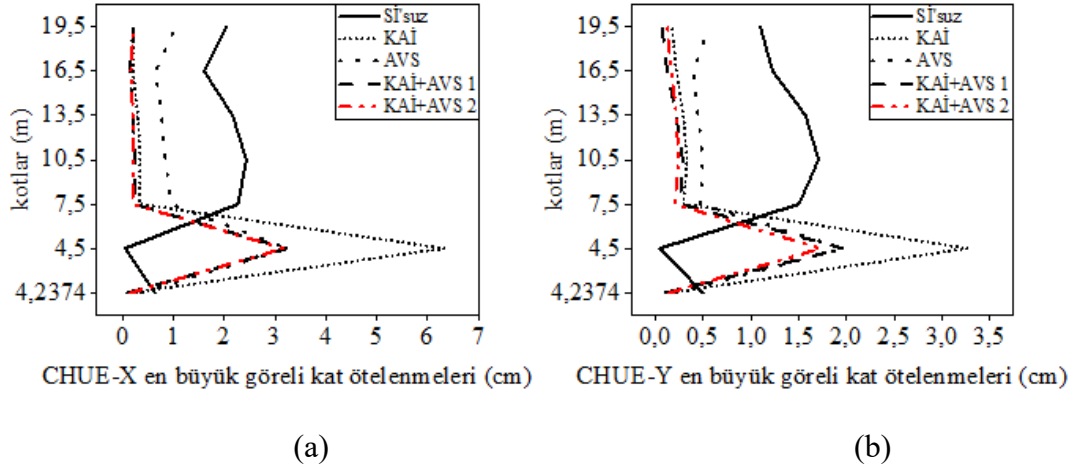


Şekil 102. Christchurch New Zealand Durum 1 katlarda oluşan en büyük göreli kat ötelenme değerleri (a) x yönündeki N23E bileşeninin değerleri (b) x yönündeki N67W bileşeninin değerleri (c) y yönündeki N23E bileşeninin değerleri (d) y yönündeki N67W bileşeninin değerleri

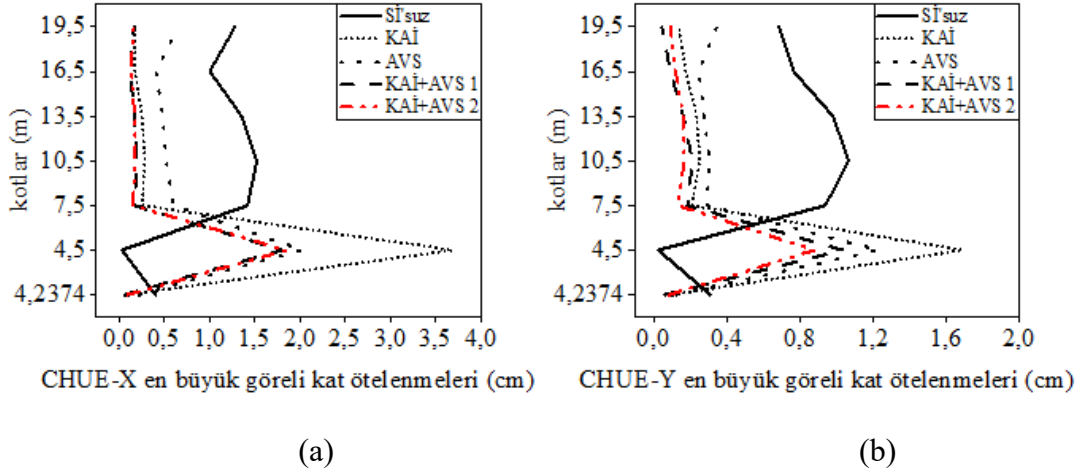


Şekil 103. Christchurch New Zealand Durum 2 katlarda oluşan en büyük görel kat ötelenme değerleri (a) x yönündeki N23E bileşeninin değerleri (b) x yönündeki N67W bileşeninin değerleri (c) y yönündeki N23E bileşeninin değerleri (d) y yönündeki N67W bileşeninin değerleri

Chuetsu-oki depremi uygulandığında katlarda oluşan en büyük görel kat ötelenmeleri aşağıda Şekil 104 ve Şekil 105'te verilmiştir. Grafiklerden anlaşılacağı üzere AVS'li binalar her iki yönde ve her iki durumda görel kat ötelenmeleri düşürmede en düşük performans gösteren titreşim kontrol sistemi olduğu görülmüştür. Ardından KAI'li binalar gelmektedir. KAI+AVS 1 ve KAI+AVS 2 ise hepsinden daha yüksek performans göstermiş ve sonuçlar birbirine yakın çıktığı görülmüştür.

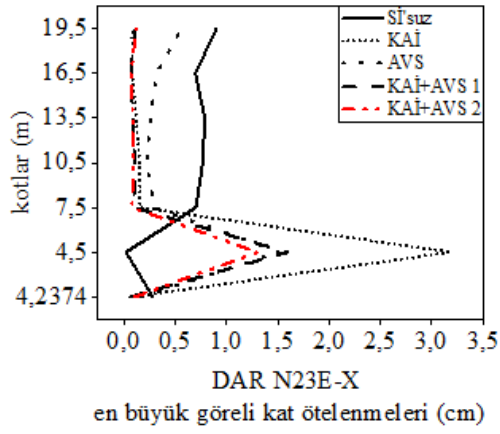


Şekil 104. Chuetsu-oki Durum 1 katlarda oluşan en büyük görelî kat ötelenme değeri (a) x yönü (b) y yönü

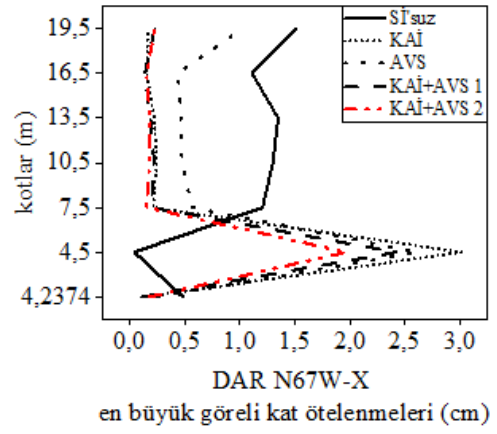


Şekil 105. Chuetsu-oki Durum 2 katlarda oluşan en büyük görelî kat ötelenme değeri (a) x yönü (b) y yönü

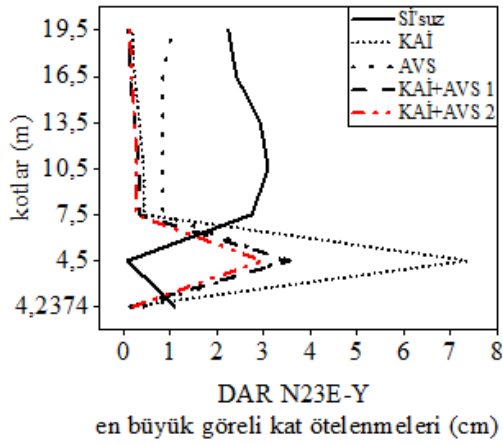
Darfield New Zealand depremi uygulandığında katlarda oluşan en büyük görelî kat ötelenmeleri aşağıda Şekil 106 ve Şekil 107’de verilmiştir. Grafiklerden anlaşılacağı üzere AVS’li binalar her iki yönde ve her iki durumda görelî kat ötelenmeleri düşürmede en düşük performans gösteren titreşim kontrol sistemi olduğu görülmüştür. Diğer titreşim kontrol sistemlerinin deprem analizi sonucu elde edilen görelî kat ötelenmeleri birbirlerine yakın çıktıkları görülmüştür.



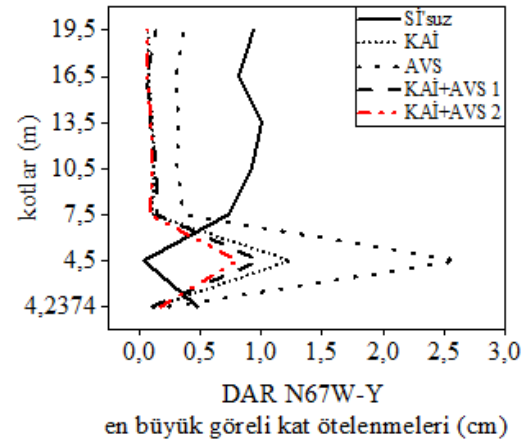
(a)



(b)

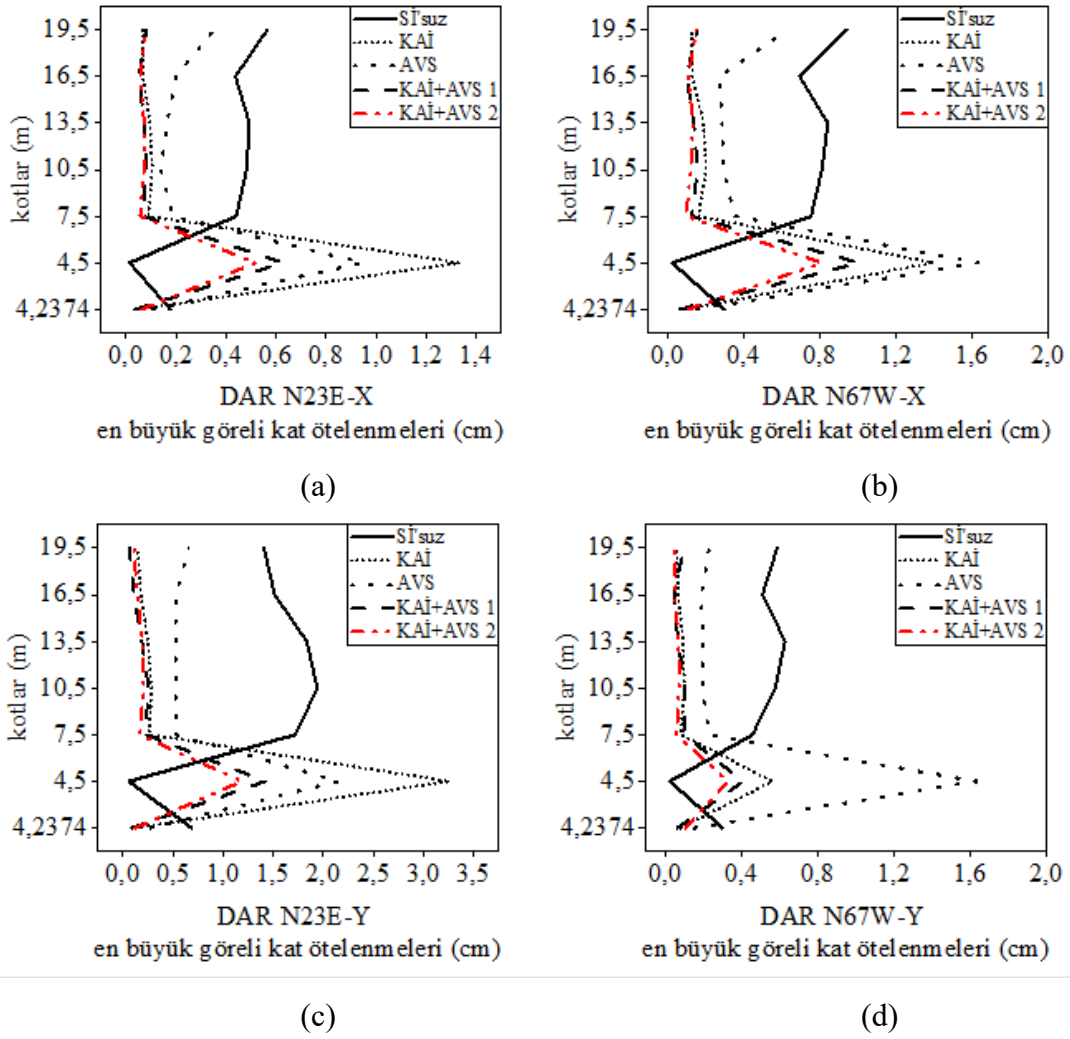


(c)



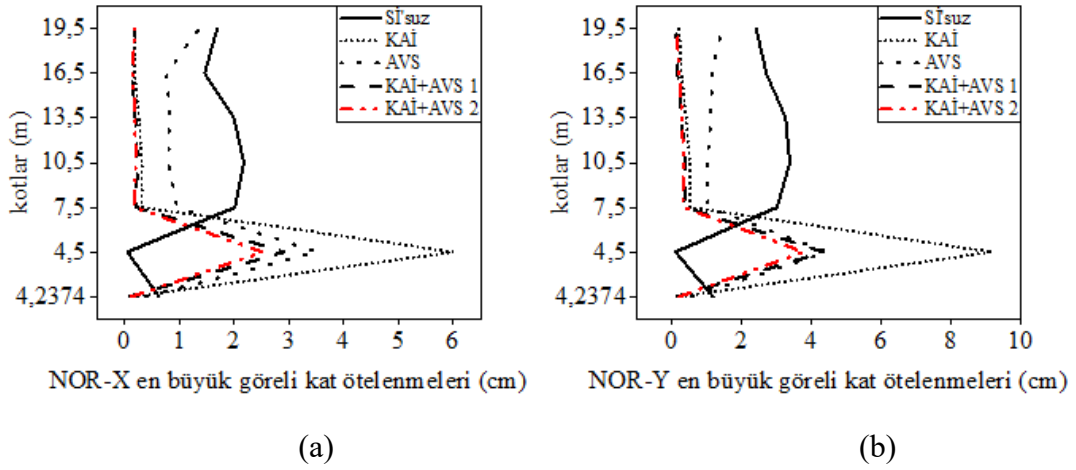
(d)

Şekil 106. Darfield New Zealand Durum 1 katlarda oluşan en büyük görel kat ötelenme değerleri (a) x yönündeki N23E bileşeninin değerleri (b) x yönündeki N67W bileşeninin değerleri (c) y yönündeki N23E bileşeninin değerleri (d) y yönündeki N67W bileşeninin değerleri

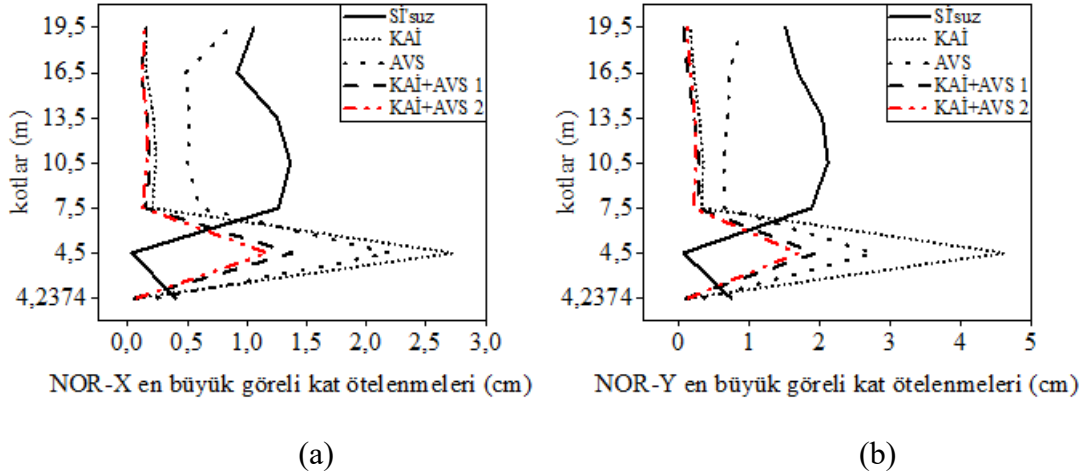


Şekil 107. Darfield New Zealand Durum 2 katlarda oluşan en büyük görel kat ötelenme değerleri (a) x yönündeki N23E bileşeninin değerleri (b) x yönündeki N67W bileşeninin değerleri (c) y yönündeki N23E bileşeninin değerleri (d) y yönündeki N67W bileşeninin değerleri

Northridge depremi uygulandığında katlarda oluşan en büyük görel kat ötelenmeleri aşağıda Şekil 108 ve Şekil 109’da verilmiştir. Grafiklerden anlaşılaçağı üzere AVS’li binalar her iki yönde ve her iki durumda görel kat ötelenmeleri düşürmede en düşük performans gösteren titreşim kontrol sistemi olduğu görülmüştür. Diğer titreşim kontrol sistemlerinin deprem analizi sonucu elde edilen görel kat ötelenmeleri birbirlerine yakın çıktıkları görülmüştür.



Şekil 108. Northridge Durum 1 katlarda oluşan en büyük görel kat ötelenme değerleri (a) x yönü (b) y yönü

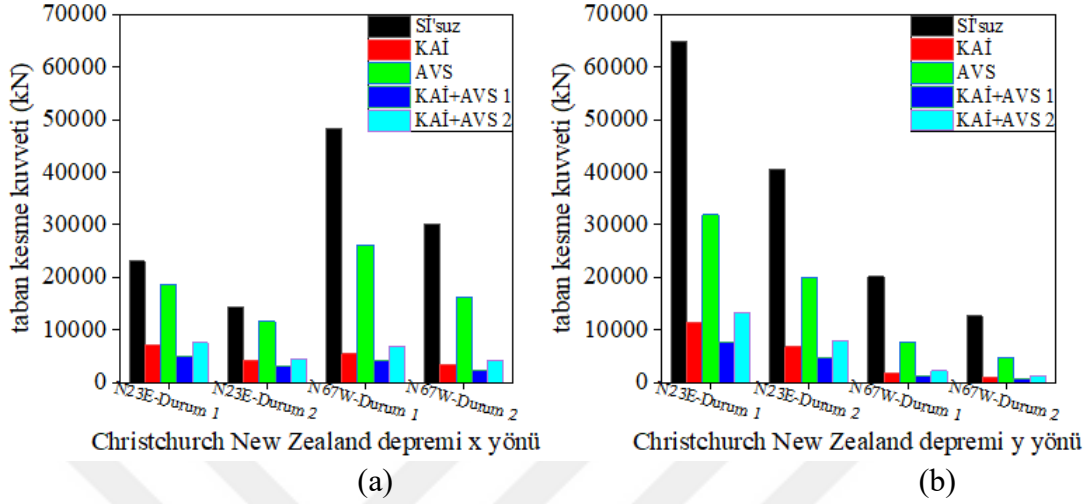


Şekil 109. Northridge Durum 2 katlarda oluşan en büyük görel kat ötelenme değerleri (a) x yönü (b) y yönü

3.5. En Büyük Taban Kesme Kuvvetlerinin İncelenmesi

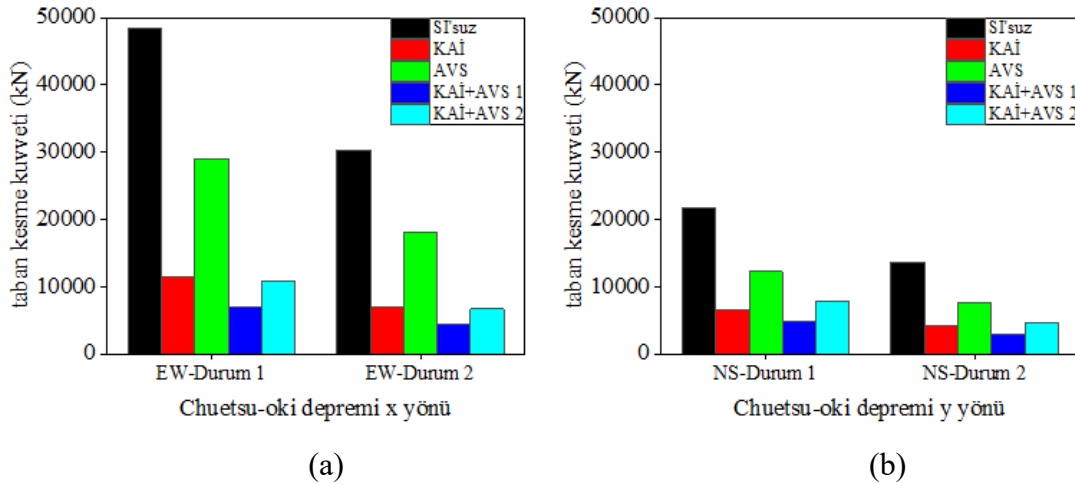
Christchurch New Zealand depremi uygulandığında elde edilen en büyük taban kesme kuvvetleri Şekil 110'da verilmiştir. Grafiklerden anlaşılabacağı üzere her iki yönde ve her iki deprem düzeyinde AVS'li binanın taban kesme kuvvetini en az düşüren titreşim kontrol sistemi olduğu görülmüştür. Ardından KAI'li binanın taban kesme kuvvetini düşürmede AVS'li binadan daha başarılı olduğu görülmüştür. Bunun yanında KAI+AVS 1'li bina taban kesme kuvvetini daha da düşürdüğü görülmüştür. Ancak KAI+AVS 2'li binada taban kesme kuvvetinin biraz daha arttığı görülmüştür. N67W bileşeninde zayıf yönde yani y yönünde daha küçük taban kesme kuvvetinin

çıkmasının sebebi depremin kaydedilen açının x eksenine daha yakın olmasıdır. Bundan dolayı daha küçük taban kesme kuvvetleri oluşmuş.



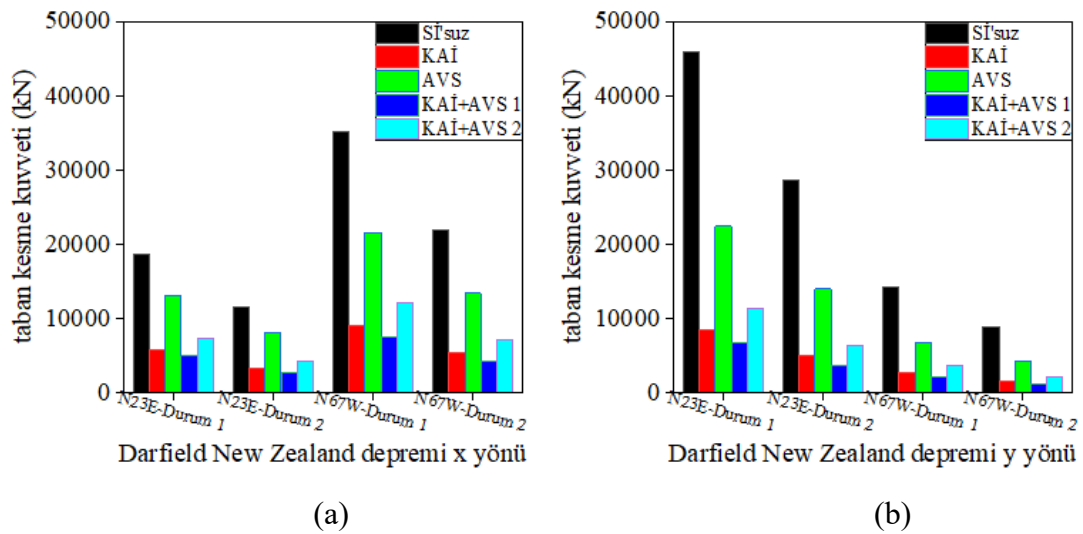
Şekil 110. Christchurch New Zealand depremi uygulandığında elde edilen en büyük taban kesme kuvveti değerleri (a) x yönü (b) y yönü

Chuetsu-oki depremi uygulandığında elde edilen en büyük taban kesme kuvvetleri Şekil 111’de verilmiştir. Grafiklerden anlaşılabacağı üzere en az düşüren AVS’li binalar olduğu görülmüştür. Daha sonra taban kesme kuvvetlerini düşürmede daha etkili olan KAI’li bina olduğu görülmüştür. KAI+AVS 1’li bina daha da düşürdüğü görülmüştür. Ancak KAI+AVS 2’li binanın taban kesme kuvvetleri KAI’li binanın taban kesme kuvvetlerine yaklaşık eşit olduğu görülmüştür.



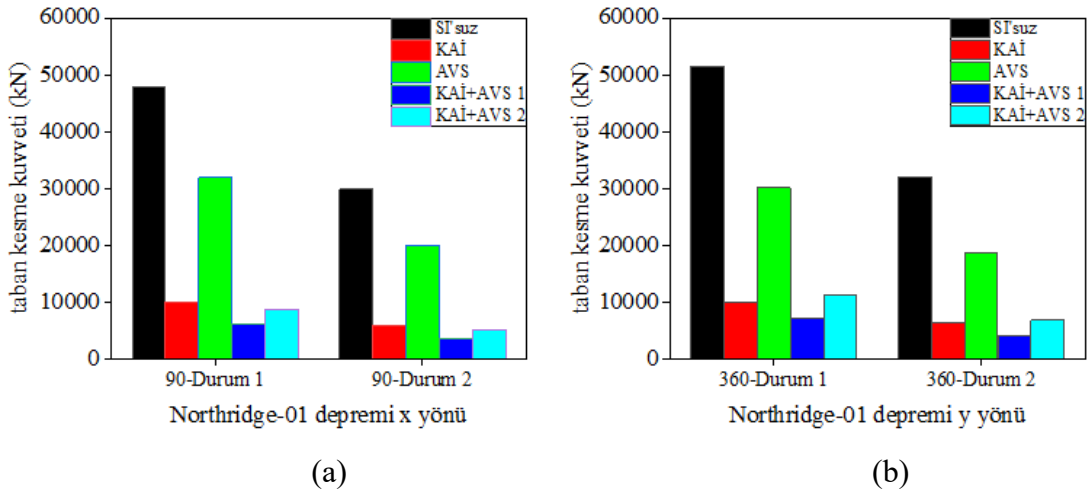
Şekil 111. Chuetsu-oki depremi uygulandığında elde edilen en büyük taban kesme kuvveti değerleri (a) x yönü (b) y yönü

Darfield New Zealand depremi uygulandığında elde edilen en büyük taban kesme kuvvetleri Şekil 112’de verilmiştir. Grafiklerden anlaşılabacağı üzere her iki yönde ve her iki durumda AVS’li binaların taban kesme kuvvetini en az düşüren titreşim kontrol sistemi olduğu görülmüştür. Ardından KAI’li binalar taban kesme kuvvetini düşürmede AVS’li binalardan daha başarılı olduğu görülmüştür. Bunun yanında KAI+AVS 1’li bina taban kesme kuvvetlerini daha da düşürdüğü görülmüştür. Ancak KAI+AVS 2’li binanın taban kesme kuvvetlerini biraz daha artırdığı görülmüştür.



Şekil 112. Darfield New Zealand depremi uygulandığında elde edilen en büyük taban kesme kuvveti değerleri (a) x yönü (b) y yönü

Northridge depremi uygulandığında elde edilen en büyük taban kesme kuvvetleri Şekil 113’te verilmiştir. Grafiklerden anlaşılabacağı üzere en az düşüren AVS’li bina olduğu görülmüştür. Daha sonra taban kesme kuvvetlerini düşürmede daha etkili olan KAI’li bina olduğu görülmüştür. KAI+AVS 1’li bina taban kesme kuvvetlerini daha da düşürdüğü görülmüştür. Ancak KAI+AVS 2’li binanın taban kesme kuvvetleri KAI’li binanın taban kesme kuvvetlerine yaklaşık eşit olduğu görülmüştür.

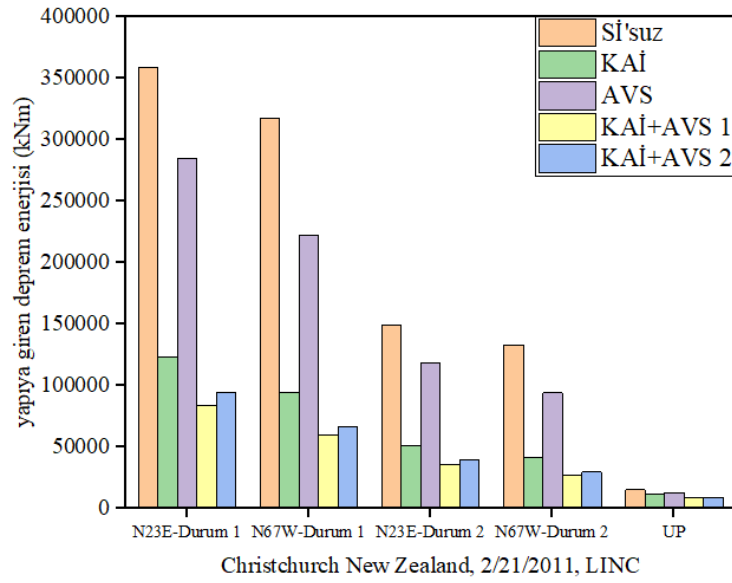


Şekil 113. Northridge depremi uygulandığında elde edilen en büyük taban kesme kuvveti değerleri (a) x yönü (b) y yönü

3.6. Toplam Girdi Enerjisinin İncelenmesi

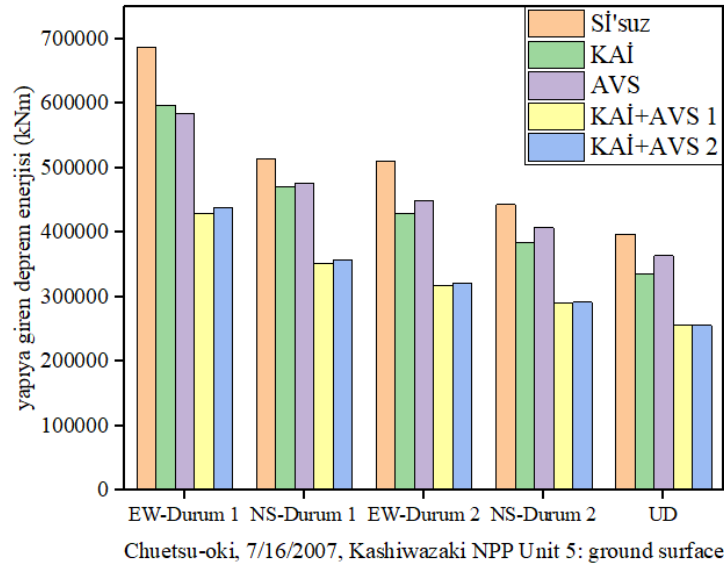
Bu bölümde yapıya giren toplam girdi enerjileri incelenmektedir. Bu yapıya giren enerji miktarlarını SAP2000 programı kendi hesaplayabilmektedir. Bunun için SAP2000’de tablolardan Structure Output→Other Output Items→Table: Total Energy Components sırası ile kutucuk işaretlenir ve Ok düğmesine basılır. Ardından açılan tablodan yapıya giren toplam enerji okunabilir.

Christchurch New Zealand depreminde giren enerji miktarları Şekil 114’da verilmiştir. Grafikten anlaşılabacağı üzere AVS’li binalar enerji miktarını düşürmede en az performans gösteren sönümleyici olduğu görülmüştür. KAI’li binalar ise AVS’li binalara nazaran giren enerjiyi oldukça düşürdüğü görülmüştür. KAI+AVS 1’li binaya giren enerji miktarı ise hepsinden daha az olduğu görülmüştür. KAI+AVS 2’li binaya giren enerjinin ise KAI+AVS 1’li binaya nazaran bir miktar arttığı görülmüştür.



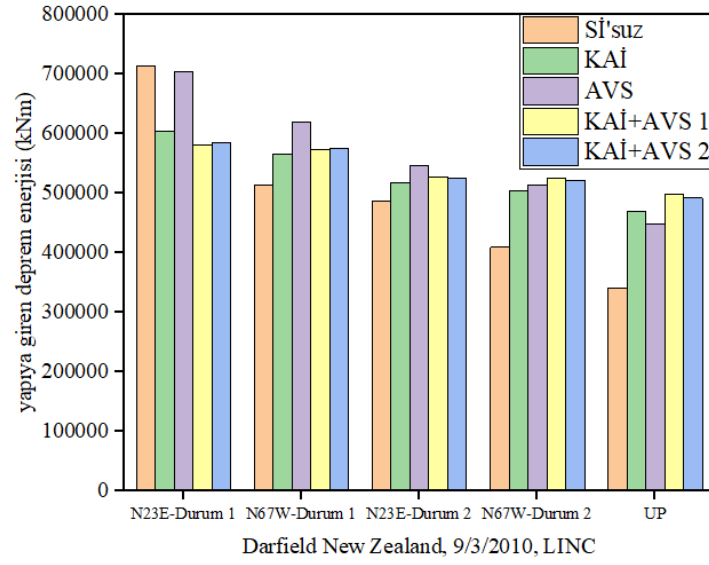
Şekil 114. Christchurch New Zealand depremin dinamik analizi sonucu sistemlere giren enerji miktarları

Chuetsu-oki depremine giren enerji miktarları Şekil 115'te verilmiştir. Grafiklerden anlaşılacağı üzere EW Durum 1 KAİ'li binaya giren enerji AVS'li binadan daha fazla olduğu görülmüşken diğer deprem bileşenlerinde tam tersi durum olmuştur. Ancak enerji miktarları her iki sistemde de birbirlerine çok yakındır. KAİ+AVS 1'li binaya giren enerji ile KAİ+AVS 2'li binaya giren enerji birbirlerine yakın çıktığı görülmüştür ve diğer titreşim kontrol sistemlerinden daha az olduğu görülmüştür.



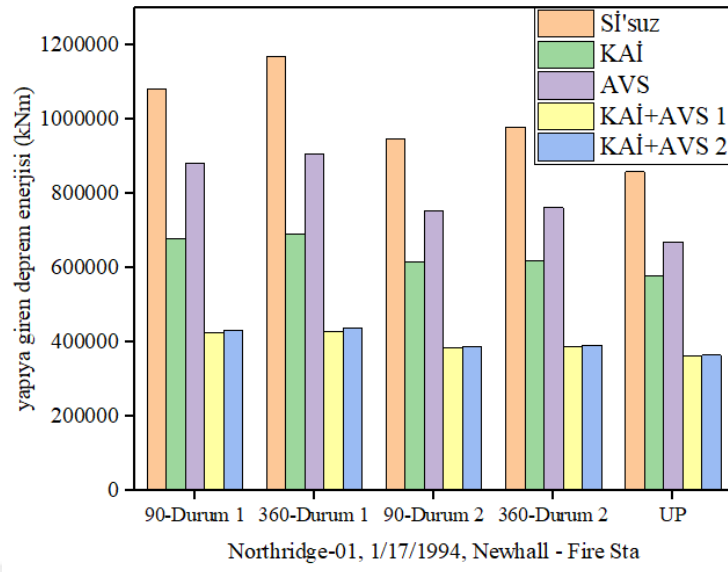
Şekil 115. Chuetsu-oki depremin dinamik analizi sonucu sistemlere giren enerji miktarları

Darfield New Zealand depreminde giren enerji miktarları Şekil 116'da verilmiştir. Grafikten anlaşılacağı üzere depremin N23E Durum 1'de giren enerji miktarını titreşim kontrol sistemleri azalttığı görülmüşken diğer bileşenlerde ise artırma eğiliminde oldukları görülmüştür. Çünkü darbe türü olarak nitelendirilen depremlerde sönümleyici sistemler giren enerjiyi artırma eğilimindedirler. Ayrıca ivmenin yüksek olan kısmı uzun sürdüğü için de olabilir. (Habib ve Yildirim 2023; Ras ve Boumechra 2016).



Şekil 116. Darfield New Zealand depremin dinamik analizi sonucu sistemlere giren enerji miktarları

Northridge depreminde giren enerji miktarları Şekil 117’de verilmiştir. Grafikten anlaşılacağı üzere AVS’li binalar enerji miktarını düşürmede en az performans gösteren sönümleyici oldukları görülmüştür. KAI’li bina ise AVS’li binaya nazaran giren enerjiyi oldukça düşürdükleri görülmüştür. KAI+AVS 1’li binaya giren enerji miktarı ise hepsinden daha az olmuştur. KAI+AVS 2’li binaya giren enerji miktarı ise KAI+AVS 1’li binadan bir miktar daha fazla olduğu görülmüştür.



Şekil 117. Northridge depremin dinamik analizi sonucu sistemlere giren enerji miktarları

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada 6 katlı bir hastane binasının yalın hali, sadece katlar arası izolasyonlu hali, sadece akışkan viskoz sönümleyicili hali, üstyapıya akışkan viskoz sönümleyicinin eklendiği katlar arası izolasyonlu karma sistemli hali ve altyapıya akışkan viskoz sönümleyicinin eklendiği katlar arası izolasyonlu karma sistemli hali 4 farklı yer hareketi altında zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analizleri yapılmıştır. Bu analizler sonucunda her katın 5 farklı duruma göre en büyük kat deplasmanları, en büyük kat ivmeleri, doğal hâkim titreşim periyotları, en büyük görelî kat ötelenmeleri, en büyük taban kesme kuvvetleri ve toplam enerji girdi parametreleri karşılaştırılmıştır. Analizler sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Her bir titreşim kontrol sistemi sismik izolasyonsuz binanın deplasmanlarını, ivmelerini, görelî kat ötelenmelerini, taban kesme kuvvetlerini ve girdi enerjisi parametrelerini düşürmede başarılı olmuştur.
- En büyük deplasmanları düşürmede Chrishchurch New Zealand ve Darfield New Zealand depremlerinin N23E bileşenlerinde katlar arası izolasyon sistemi akışkan viskoz sönümleyiciden daha iyi performans gösterirken, diğer depremlerde akışkan viskoz sönümleyici katlar arası izolasyondan daha iyi performans göstermiştir. Chrishchurch New Zealand ve Darfield New Zealand hem DD-1 hem de DD-2 deprem düzeylerinin N67W bileşeninin deplasman grafikleri incelendiğinde tüm titreşim kontrol sistemlerinin birbirine yakın sonuçlar verdiği görülmüştür.
- En büyük kat ivmelerini düşürmede en düşük performansa sahip titreşim kontrol sistemi akışkan viskoz sönümleyici iken en yüksek performans gösteren davranan üstyapısında akışkan viskoz sönümleyici bulunan katlar arası izolasyonlu karma titreşim kontrol sisteminde olmuştur. Ancak Chuetsu-oki depreminin y bileşeninde her bir titreşim kontrol sistemleri hemen hemen yakın sonuçlar vermiştir.
- Doğal hâkim titreşim periyotlarında titreşim kontrol sistemlerinin her biri periyodu binanın yalın haline göre periyodu artırmıştır. Ancak

sadece katlar arası izolasyonlu yapının periyodu ile altyapısında akışkan viskoz sönümleyici bulunan katlar arası izolasyonlu karma yapının periyotları oldukça yakın çıkmıştır.

- En büyük görelî kat ötelenmelerini en az düşüren akışkan viskoz sönümleyici iken en fazla düşüren titreşim kontrol sistemi ise altyapısında akışkan viskoz sönümleyici bulunan katlar arası izolasyonlu karma yapı olmuştur.
- En büyük taban kesme kuvvetlerini en az düşüren titreşim kontrol sistemi sadece akışkan viskoz sönümleyicili yapı iken, en çok düşüren titreşim kontrol sistemi üstyapısında akışkan viskoz sönümleyici olan karma sistemli yapı olmuştur. Sadece akışkan viskoz sönümleyici yapının Christchurch New Zealand depreminin N23E bileşeninde taban kesme kuvvetini azaltması %20 civarındayken N67W bileşeninde %45 civarında azaltma olmuştur.
- Her bir titreşim kontrol sistemi düşey bileşeninkiler de dahil yapıya giren girdi enerji parametrelerini düşürmeyi başarmıştır. Ancak Darfield New Zealand depreminde DD-1 düzeyindeki N23E bileşeni hariç titreşim kontrol sistemleri giren girdi enerji parametrelerini artırmıştır.
- Depremin karakteristiği titreşim kontrol sistemlerinin performansını etkilemiştir.

Fragiacomo ve diğ. (2003) yılında yapmış oldukları çalışmada kütle, dayanım, elastik ve plastik rijitlik gibi izolatör sisteminin optimum tasarım parametrelerini kullanarak basit bir tasarım prosedürü uygulamışlardır. Farklı yer hareketleri altında sistemin en büyük görelî deplasmanları ve girdi enerjisini büyük oranda düşürdüğünü gözlemlemişlerdir. Bu makaleden, tezin sonuçlarının literatürle uyumlu olduğu görülmektedir. Fragiaco ve diğ. (2003) çalışmasında tezden farklı olarak taban izolasyonu kullansa da her ikisi de yapıda aynı tür titreşim kontrol sistemini kullanmıştır. Ganji and Kazem (2017) yılında yapmış oldukları çalışmada 5, 10 ve 15 katlı üç farklı binayı TBDY 2018’de karşılığı DD-2 olan deprem tehlike düzeyi 1 ve TBDY 2018’de karşılığı DD-1 olan deprem tehlike düzeyi 2 olan 7 farklı yakın fay

depremlerinde analiz etmişlerdir. Analizler sonucunda akışkan viskoz damperin yalın hale göre girdi ortalama olarak %10 artırdığını bulmuşlardır. Ancak kurşun kauçuk mesnet yapıya gelen girdi enerjileri ortalama olarak yaklaşık %30 azalttığını bulmuşlardır.

Bu tezde katlar arası izolasyonlu ve akışkan viskoz sönümleyiciliden oluşan karma sistemli yapı yer değiştirmeleri ve ivmeleri düşürmede sadece katlar arası izolasyonlu ve sadece akışkan viskoz sönümleyicili yapıdan daha çok düşürmüştür. Karimi ve Genes (2021) yılında yapmış oldukları çalışmada akışkan viskoz sönümleyicili ve taban izolasyonlu yapının katlarda oluşan en büyük yer değiştirme ve ivmeleri sadece kurşun çekirdekli kauçuk mesnetli yapıdan daha çok azalttığını bulmuşlardır.

Bu tezde akışkan viskoz sönümleyici yapıda oluşan kat ivmeleri katlar arası izolasyona nazaran daha büyük çıkmıştır. Rad, Hazaveh ve Holden (2019) yılında yapmış oldukları çalışmada 4 katlı akışkan viskoz sönümleyicili yapıda oluşan ivmeler taban izolasyonlu yapıdan daha büyüktür. Her ne kadar çalışmada bina taban izolasyonlu olsa da her iki çalışmada kullanılan titreşim kontrol sistemi aynıdır.

Bu tezde sadece katlar arası izolasyonlu sistemde yalıtım katında oluşan görelî kat ötelenmesini hem katlar arası izolasyonlu hem de akışkan viskoz sönümleyicili yapı hem DD-1 hem DD-2 düzeyinde 4 farklı yer hareketi altında %35-%61 arasında azaltmıştır. Y. Liu, Wu ve Donà (2018) yılında yapmış oldukları çalışmada katlar arası izolasyonlu yapıda izolasyon katında oluşan görelî kat ötelenmesini hem katlar arası izolasyonlu hem de akışkan viskoz sönümleyicili yapı %60 azaltmıştır. Depremler ve bina parametreleri azaltma miktarında etkili olmuştur.

Bu tezde sadece katlar arası izolasyonlu yapı en büyük taban kesme kuvvetini ortalama %77 azaltırken katlar arası izolasyonlu ve akışkan viskoz sönümleyicili karma titreşim kontrollü yapı taban kesme kuvvetini ortalama %80 azaltmıştır. Belbachir ve diğerleri (2023) yılında yapmış oldukları çalışmada taban izolasyonlu ve sadece kauçuk mesnetli yapı taban kesme kuvvetini %78 azaltırken hem kauçuk mesnetli hem de akışkan viskoz sönümleyicili karma titreşim kontrollü yapı ise %85 azaltmıştır. Bu farklılıkta depremin karakteristiğinin ve faya olan uzaklığının, bina geometrisi ve parametrelerinin, izolatör özelliklerinin ve zemin koşullarının etkisi vardır.

KAYNAKÇA

- Abdel-Rohman, Mohamed, and Horst H Leipholz. 1983. "Active control of tall buildings." *Journal of Structural Engineering* 109 (3): 628-645.
- Abraham, Sarah Mariam, KS Selman, Nithya Mohan, Shunmu Prasad, and Salini Theres N Kurian. 2021. "Analysis of Building with Baseisolation and Damper." *International Journal of Engineering Research & Technology*.
- Adampira, Mohammad, Mehdi Derakhshandi, and Abbas Ghalandarzadeh. 2021. "Experimental Study on Seismic Response Characteristics of Liquefiable Soil Layers." *Journal of Earthquake Engineering* 25 (7): 1287-1315. <https://doi.org/10.1080/13632469.2019.1568930>.
- Ager, Philipp, Katherine Eriksson, Casper Worm Hansen, and Lars Lønstrup. 2020. "How the 1906 San Francisco earthquake shaped economic activity in the American West." *Explorations in Economic History* 77: 101342.
- Aghaeidoost, Vahid, and AHM Muntasir Billah. 2022. "Sensitivity of seismic fragility of base-isolated bridges to lead rubber bearing modeling technique." *Structural Control Health Monitoring* 29 (8): e2971.
- Ahmadi, Ehsan. 2019. "Concurrent effects of inertial and kinematic soil-structure interactions on strength-ductility-period relationship." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 117: 174-189. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.10.043>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0267726118309084>.
- Ahmadzai, Hasibullah. 2022. "Yapı Sistemlerinin Hesabında Matris Yöntemleri." *TAS Journal* 2 (1): 19-29.
- Akehashi, Hiroki, and Izuru Takewaki. 2021. "Critical Analysis of Nonlinear Base-Isolated Building Considering Soil–Structure Interaction under Impulsive and Long-Duration Ground Motions." *Geotechnics* 1 (1): 76-94. <https://www.mdpi.com/2673-7094/1/1/5>.
- Akyüz, U, A Caner, A Yakut, and S Ozdemir. 2017. "Türkiye’deki Sismik İzolasyon Uygulamalarının İncelenmesi." 4. *Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*, ESKİŞEHİR.
- Ala, Nihan. 2007. "Adapazarı Zemininde Yapılan Betonarme Yapılarda Zemin-Yapı Etkileşimi." Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi (Turkey) (29176914). <https://www.proquest.com/dissertations-theses/adapazarı-zemininde-yapılan-betonarme-yapılarda/docview/2700373546/se-2?accountid=25094>.
- Aldemir, Ü, and E Aydın. 2005. "Depreme dayanıklı yapı tasarımında yeni yaklaşımlar." *Türkiye mühendislik haberleri* 435 (1): 81-89.

- Alemdar, Zeynep Fırat. 2004. "Yapılarda Deprem Analizi Yapmak için Kullanılan Değişik Hesap Metodları." *Boğaziçi Üniversitesi*.
- Alver, Ozan, and Esra Ece Eseller-Bayat. 2022. "Effect of soil damping on the soil–pile–structure interaction analyses in cohesionless soils." *Applied Sciences* 12 (18): 9002.
- Amini, F., and R. Doroudi. 2010. "Control of a building complex with Magneto-Rheological Dampers and Tuned Mass Damper." *Structural Engineering and Mechanics* 36 (2): 181-195. <https://doi.org/10.12989/SEM.2010.36.2.181>.
- Anwar, SF, M Hasmath, and MA Khan. 2016. "Study on Soil-Structure Interaction and Base Isolated System for Seismic Performance of Structures Resting on Different Types of Soils." *Global Journal of Engineering Science Researches* 3 (10): 61-67.
- Arguc, Sedar, Ozgur Avsar, and Gokhan Ozdemir. 2017. "Effects of lead core heating on the superstructure response of isolated buildings." *Journal of Structural Engineering* 143 (10): 04017145.
- Arora, Sahil. 2019. "Optimization of bracing and viscous damper and comparison of fluid viscous damper and bracing system for stabilization of high rise building." *Int. J. Civ. Eng. Technol* 10: 1978-1986.
- Arvind, R., and M. Helen Santhi. 2022. "A State of Art Review on Hybrid Passive Energy Dissipating Devices." *Journal of Vibration Engineering & Technologies* 10 (5): 1931-1954. <https://doi.org/10.1007/s42417-022-00492-1>. <https://doi.org/10.1007/s42417-022-00492-1>.
- Asadpour, Ghasem, Payam Asadi, Reyes Garcia, and Iman Hajirasouliha. 2023. "A novel stochastic linearization technique for structures with nonlinear fluid viscous dampers including soil-structure interaction." *Journal of Building Engineering* 72: 106668. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106668>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710223008471>.
- Autrique, Jean-Christophe, and Frédéric Magoulès. 2006. "Studies of an infinite element method for acoustical radiation." *Applied Mathematical Modelling* 30 (7): 641-655. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apm.2005.08.022>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X05002040>.
- Aydin, Ersin, Baki Ozturk, Aleksandra Bogdanovic, and Ehsan Noroozinejad Farsangi. 2020. "Influence of soil-structure interaction (SSI) on optimal design of passive damping devices." *Structures* 28: 847-862. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.09.028>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235201242030504X>.

- Aydinoğlu, Mehmet Nuray. 1992. *Development of Analytical Techniques in Soil-structure Interaction. Developments in Dynamic Soil-Structure Interaction*, . Kluwer Academic Publishers.
- Ayhan, Oğuzhan. 2006. "Binaların depreme karşı güçlendirilmesinde klasik yöntem ile sürtünmeli sarkaç sistemlerin karşılaştırılması." Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Bahekar, Rohini, and Atulkumar Manchalwar. 2019. "Seismic Response of Structure Equipped with Lead Rubber Bearing Considering SSI." *IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN)* 5: 48-52.
- Balendra, T., C. M. Wang, and N. Yan. 2001. "Control of wind-excited towers by active tuned liquid column damper." *Engineering Structures* 23 (9): 1054-1067. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(01\)00015-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0141-0296(01)00015-3). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029601000153>.
- Balkanlou, V Sadeghi, M Reza Bagerzadeh Karimi, B Bagheri Azar, and Alaeddin Behraves. 2013. "Evaluating effects of viscous dampers on optimizing seismic behavior of structures." *International Journal of Current Engineering Technology* 3 (4): 1150-1157.
- Bandyopadhyay, Srijit, Y. M. Parulekar, Aniruddha Sengupta, and J. Chattopadhyay. 2021. "Structure soil structure interaction of conventional and base-isolated building subjected to real earthquake." *Structures* 32: 474-493. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.03.069>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352012421002496>.
- Bang, I. 2011. "Experiences of sliding disk bearing in Korea." Proceedings of the 7th World Congress on Joints Bearings and Seismic Systems for Concrete Structures, Las Vegas, NV, USA.
- Bao, Xiaohua, Zhiyang Jin, Hongzhi Cui, Xiangsheng Chen, and Xiongyao Xie. 2019. "Soil liquefaction mitigation in geotechnical engineering: An overview of recently developed methods." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 120: 273-291. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.01.020>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0267726118306043>.
- Bapir, Baban, Lars Abrahameczyk, Torsten Wichtmann, and Luis Felipe Prada-Sarmiento. 2023. "Soil-structure interaction: A state-of-the-art review of modeling techniques and studies on seismic response of building structures." *Frontiers in Built Environment* 9. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2023.1120351>. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbuil.2023.1120351>.
- Bararnia, Majid, Nemat Hassani, Behnoud Ganjavi, and Gholamreza Ghodrati Amiri. 2018. "Estimation of inelastic displacement ratios for soil-structure systems with embedded foundation considering kinematic and inertial interaction effects." *Engineering Structures* 159: 252-264.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.01.002>.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029617313238>.

- Barbat, AH, J Rodellar, EP Ryan, and N Molinares. 1995. "Active control of nonlinear base-isolated buildings." *Journal of Engineering Mechanics* 121 (6): 676-684.
- Basu, U., and A. K. Chopra. 2004. "Perfectly matched layers for transient elastodynamics of unbounded domains." *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 59 (8): 1039-1074. <https://doi.org/10.1002/nme.896>.
<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-1542290049&doi=10.1002%2fnme.896&partnerID=40&md5=e16a09c30d77889e6c4ab241221e4e7e>.
- Bazyar, Mohammad H, and Chongmin Song. 2020. "Transient analysis of dynamic soil-structure interaction using the scaled boundary finite-element method." In *Progress in Mechanics of Structures and Materials*, 157-162. CRC Press.
- Belbachir, Asma, Abdelkader Benanane, Abderrahmane Ouazir, Zouaoui R. Harrat, Marijana Hadzima-Nyarko, Dorin Radu, Ercan Işık, Zouhir S. M. Louhibi, and Sofiane Amziane. 2023. Enhancing the Seismic Response of Residential RC Buildings with an Innovative Base Isolation Technique. *Sustainability* 15 (15). <https://doi.org/10.3390/su15151624>.
- Berenger, J. P. 1994. "A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves." *Journal of Computational Physics* 114 (2): 185-200. <https://doi.org/10.1006/jcph.1994.1159>.
<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-28044459877&doi=10.1006%2fjcph.1994.1159&partnerID=40&md5=b74edadef4614eac41465db78c2f7a>.
- Bharadwaj, Karabi, Bapi Mondal, and Nirmalendu Debnath. 2019. "Vibration Reduction of Eccentric Steel 3D Framed Building Considering Soil Flexibility." *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A* 100 (2): 347-356. <https://doi.org/10.1007/s40030-019-00365-z>.
<https://doi.org/10.1007/s40030-019-00365-z>.
- Bird, Juliet F, Julian J Bommer, Helen Crowley, and Rui Pinho. 2006. "Modelling liquefaction-induced building damage in earthquake loss estimation." *Soil Dynamics Earthquake Engineering* 26 (1): 15-30.
- Bouckovalas, GD, and YZ Tsiapas. 2015. "Seismic isolation effects and elastic response spectra of liquefied ground." 6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Christchurch, New Zealand.
- Bouckovalas, George D, Yannis Z Tsiapas, Alexandros I Theocharis, and Yannis K Chaloulos. 2016. "Ground response at liquefied sites: seismic isolation or amplification?" *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 91: 329-339.

- Brandão, Francisco Da Silva, and Letícia Fleck Fadel Miguel. 2023. "A New Methodology for Optimal Design of Hybrid Vibration Control Systems (MR + TMD) for Buildings under Seismic Excitation." *Shock and Vibration* 2023: 8159716. <https://doi.org/10.1155/2023/8159716>.
<https://doi.org/10.1155/2023/8159716>.
- Brinkgreve, RBJ, MH Kappert, and PG Bonnier. 2007. "Hysteretic damping in a small-strain stiffness model." *Proc. of Num. Mod. in Geomech., NUMOG X, Rhodes*: 737-742.
- Chan, Peng-Tai. 2023. "Element Exchange Algorithms for Optimum Viscous Damper Placement in Buildings." Ph.d. Thesis, Civil Engineering, The University of Auckland.
- Chang, Cheng-Hsiung. 2002. "Modeling of laminated rubber bearings using an analytical stiffness matrix." *International Journal of Solids and Structures* 39 (24): 6055-6078. [https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(02\)00471-7](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(02)00471-7).
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020768302004717>.
- Chaudhari, RR, and Dr KN Kadam. 2013. "Effect of piled raft design on high-rise building considering soil structure interaction." *International journal of scientific technology research* 2 (6): 72-79.
- Chaudhary, Budhi Ram, Suman Devkota, and Gurpreet Singh. 2019. "A Review Paper on Comparative Study of Fixed Base, Base Isolation & Damper System in RC Building." *International Research Journal of Engineering and Technology* 6 (8): 279-283.
- Chen, Zhiyi, and Peng Jia. 2021. "Seismic response of underground stations with friction pendulum bearings under horizontal and vertical ground motions." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 151: 106984. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106984>.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0267726121004061>.
- Cheng, Franklin Y, Hongping Jiang, and Kangyu Lou. 2008. *Smart structures: innovative systems for seismic response control*. CRC press.
- Chesné, S., G. Inquieté, P. Cranga, F. Legrand, and B. Petitjean. 2019. "Innovative Hybrid Mass Damper for Dual-Loop Controller." *Mechanical Systems and Signal Processing* 115: 514-523. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.06.023>.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327018303601>.
- Constantinou, MC, and DM Fenz. 2008. "Spherical sliding isolation bearings with adaptive behavior: Theory." *Earthquake Eng. Struct. Dyn* 37 (2): 163-183.
- Cubrinovski, Misko, Jonathan D. Bray, Christopher de la Torre, Michael Olsen, Brendon Bradley, Gabriele Chiaro, Emilia Stocks, Liam Wotherspoon, and

- Tiffany Krall. 2018. "Liquefaction-Induced Damage and CPT Characterization of the Reclamations at CentrePort, Wellington." *Bulletin of the Seismological Society of America* 108 (3B): 1695-1708. <https://doi.org/10.1785/0120170246>. <https://doi.org/10.1785/0120170246>.
- Çağlar, Naci, Zehra Şule Garip, and Zeynep Dere Yaman. 2005. "Deprem etkisindeki betonarme yapılarda yapı-zemin etkileşimi." Deprem Sempozyumu, Kocaeli.
- Çavdar, Özlem, and Zeynep Yıldız. 2023. "Çelik Takviyeli Elastomerik İzolatör Numune Üretimi." *International Journal of Advanced Natural Sciences and Engineering Researches (IJANSER)* 7 (11): 108-112. <https://doi.org/10.59287/as-ijanser.571>. <https://alls-academy.com/index.php/ijanser/article/view/571>.
- Çerçevik, Ali Erdem. 2019. "Bina ve köprü tipi yapılarda pasif yapısal kontrol sistemlerin sezgisel algoritmalar ile optimizasyonu." Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi.
- Çetinkaya, Mustafa Yavuz, Erkan Çelebi, and Osman Kırtel. 2017. "Yapı-temel-zemin sismik etkileşim probleminin Adapazarı bölgesi için empedans fonksiyonları yardımıyla analizi." *Politeknik Dergisi* 20 (2): 325-332.
- Çetinkaya, Mustafa Yavuz, Erkan Çelebi, and Osman Kırtel. 2015. "Sismik Yüklere Maruz Yapı-Zemin Ortak Sisteminin Çözüm Sürecinde Temel-Zemin Etkileşiminin Sönümü." *International Journal of Engineering Research Development* 7 (3): 25-30.
- Deringöl, Ahmet Hilmi, and Esra Mete Güneyisi. 2020. "Effect of lead rubber bearing on seismic response of regular and irregular frames in elevation." *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 26 (6): 1076-1085. <https://dergipark.org.tr/en/pub/pajes/issue/57790/825502>.
- Dezfuli, F Hedayati, and M Shahria Alam. 2013. "Shape memory alloy wire-based smart natural rubber bearing." *Smart Materials Structures* 22 (4): 045013.
- Dhadse, Gaurav D., G. D. Ramtekkar, and Govardhan Bhatt. 2021. "Finite Element Modeling of Soil Structure Interaction System with Interface: A Review." *Archives of Computational Methods in Engineering* 28 (5): 3415-3432. <https://doi.org/10.1007/s11831-020-09505-2>. <https://doi.org/10.1007/s11831-020-09505-2>.
- Dick, Christian, Joachim Georgii, and Rüdiger Westermann. 2011. "A real-time multigrid finite hexahedra method for elasticity simulation using CUDA." *Simulation Modelling Practice Theory* 19 (2): 801-816.
- Dicleli, M. 2013. "Sismik izolasyon ve enerji sistemleriyle ilgili teknik gelişmeler ve sismik performansı iyileştirme amaçlı özel uygulamalar." Deprem yalıtımı yöntemleri ve uygulamaları sempozyumu, ODTÜ.

- Dobry, R., and T. Abdoun. 2017. "Recent Findings on Liquefaction Triggering in Clean and Silty Sands during Earthquakes." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 143 (10): 04017077. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001778](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001778).
- Doğangün, A 2021. *Deprem-Zemin ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı*. Edited by Istanbul: Birsen Yayınevi. Birsen Yayınevi.
- Dok, Gökhan, Muharrem Aktaş, and Osman Kırtel. 2015. "Yapı-Zemin Dinamik Etkileşiminin Doğrusal Olmayan Davranışa Etkisi: Betonarme Perde-Çerçeve Örneği." 5th International Earthquake Symposium.
- Döker, Alper Tolga. 2020. "Burulma düzensizliğine sahip taban izolasyonlu yapıların deprem davranışının incelenmesi." Yüksek Lisans Yüksek Lisans Tezi, İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI, Bursa Uludağ Üniversitesi.
- Dutta, Sekhar Chandra, Koushik Bhattacharya, and Rana Roy. 2004. "Response of low-rise buildings under seismic ground excitation incorporating soil-structure interaction." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 24 (12): 893-914. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2004.07.001>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0267726104001290>.
- Düzgün, Oğuz Akın. 2007. "Topografik Yapının Zemin Yapı Sistemlerinin Dinamik Davranışı Üzerindeki Etkileri." Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi.
- Düzgün, Oğuz Akın, and Yavuz Selim Hatipoğlu. 2023. "Effective Damping Coefficient of Fluid Viscous Dampers for Dynamic Response Mitigation of Coupled Frames." *Journal of Vibration Engineering & Technologies* 11 (4): 1821-1835. <https://doi.org/10.1007/s42417-022-00673-y>.
- Düzgün, Oğuz Akın, Yavuz Selim Hatipoğlu, and Osman Ünsal Bayrak. 2023. "Optimum parameters for adjacent structures coupled by fluid viscous dampers considering soil-structure interaction." *CHALLENGE* 9 (1): 12-23.
- Ekinci, Nazif, and Cengiz IPEK. 2023. "Farklı Döşeme Tiplerine Sahip Betonarme Binaların Deprem Yükleri Altında Davranışlarının İncelenmesi Rc Buildings With Different Slab Types Investigation Under Earthquake Loads." *KONGRE KÜNYESİ*.
- Engin, Tahsin, Zekeriya Parlak, İsmail Şahin, Seval Genç, Gürsoy Turan, and Naci Çağlar. 2021. "Depreme Duyarlı Yapıların Yarı-Aktif Manyeto-Reolojik Damperler ile Kontrolü." *TÜBİTAK*.
- Eren, Fatma Ensaroğlu. 2010. "Betonarme Perdelerde Kesme Kuvveti Dinamik Büyütme Katsayısının Doğrusal Olmayan Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemi İle İrdelenmesi." Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Escoffier, Sandra. 2013. "Centrifuge modeling of foundations subjected to earthquake loadings." *ALERT Doctoral School*: 77.

- Eskandari Nasab, Mohammad Seddiq, and Jinkoo Kim. 2022. "Fuzzy analysis of a viscoelastic damper in seismic retrofit of structures." *Engineering Structures* 250: 113473. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113473>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029621015777>.
- Etedali, Sadegh, Kazem Hasankhoie, and Mohammad Reza Sohrabi. 2020. "Seismic responses and energy dissipation of pure-friction and resilient-friction base-isolated structures: A parametric study." *Journal of Building Engineering* 29: 101194. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101194>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710219325069>.
- Failla, Isabella. 2021. "A Didactic Introduction To Models And Devices To Mitigate Seismic Actions." *AAPP Physical, Mathematical Natural Sciences/Atti della Accademia Peloritana dei Pericolanti-Classe di Scienze Fisiche, Matematiche e Naturali* 99.
- Fajfar, Peter. 2002. "Structural analysis in earthquake engineering—a breakthrough of simplified non-linear methods." 12th European conference on earthquake engineering.
- Farghaly, Ahmed Abdelraheem. 2014. "Optimization of viscous dampers with the influence of soil structure interaction on response of two adjacent 3-D buildings under seismic load." *Optimization* 4 (01).
- Fatemi, H, and J Conklin. 2019. "Experimental Behaviour of Friction-Based EradiQuake Seismic Isolation Systems." 12th Canadian Conference on Earthquake Engineering, Quebec, Canada.
- Fathi, Ahmad, Arjang Sadeghi, M. Reza Emami Azadi, and Nader Hoveidae. 2020. "Assessing the soil-structure interaction effects by direct method on the out-of-plane behavior of masonry structures (case study: Arge-Tabriz)." *Bulletin of Earthquake Engineering* 18 (14): 6429-6443. <https://doi.org/10.1007/s10518-020-00933-w>.
- Filonenko-Borodich, MM. 1940. "Some approximate theories of elastic foundation." *Uchenyie Zapiski Moskovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Mekhanika, Moscow* 46: 3-18.
- Fisco, N. R., and H. Adeli. 2011. "Smart structures: Part II — Hybrid control systems and control strategies." *Scientia Iranica* 18 (3): 285-295. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scient.2011.05.035>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1026309811001003>.
- Forcellini, Davide. 2022. "Seismic fragility of tall buildings considering soil structure interaction (SSI) effects." *Structures* 45: 999-1011. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.09.070>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352012422008463>.

- Fragiacomo, M, SANDRA Rajgelj, and F Cimadom. 2003. "Design of bilinear hysteretic isolation systems." *Earthquake engineering structural dynamics* 32 (9): 1333-1352.
- Frahm, H. 1909. "Devices for Damping Vibration of Bodies US Patent No. 989958."
- Ganji, Mohammad, and Hossein Kazem. 2017. "Comparing seismic performance of steel structures equipped with viscous dampers and lead rubber bearing base isolation under near-field earthquake." *Civil Engineering Journal* 3 (2): 124-136.
- Gao, Liang, Dewen Liu, Min Lei, Yong Ding, and Shian Mu. 2023. "Study on Shock-Absorbing Effect of a Double-Story Isolation Structure Considering Soil-Structure Interaction." *Buildings* 13 (11): 2677. <https://www.mdpi.com/2075-5309/13/11/2677>.
- Garcia, Diego Lopez. 2001. "A simple method for the design of optimal damper configurations in MDOF structures." *Earthquake spectra* 17 (3): 387-398.
- Garip, Z. Ş., N. Çağlar, M. Pala, and N. Ala. 2007. "Adapazarındaki zemin şartlarında betonarme yapıların yapı-zemin etkileşimi." 2007 Deprem Sempozyumu, Kocaeli.
- Garip, Zehra Şule. 2017. "Yumuşak Kat Düzensizliği olan Betonarme Binalarda Yapı Zemin Etkileşimi." 5th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science 29-30 September 2017 (ISITES2017 Baku-Azerbaijan), Baku - Azerbaijan.
- Gerdes, K. 1998. "Infinite Element Methods." In *IUTAM Symposium on Computational Methods for Unbounded Domains: Proceedings of the IUTAM Symposium held in Boulder, Colorado, U.S.A., 27-31 July 1997*, edited by Thomas L. Geers, 143-150. Dordrecht: Springer Netherlands.
- Ghalandari, Mohammad, Saeed Bornassi, Shahabbodin Shamshirband, Amir Mosavi, and Kwok Wing Chau. 2019. "Investigation of submerged structures' flexibility on sloshing frequency using a boundary element method and finite element analysis." *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics* 13 (1): 519-528. <https://doi.org/10.1080/19942060.2019.1619197>.
- Gil, Heungbae, Kyoungbong Han, Junho Gong, and Dooyong Cho. 2020. "Improvement of the performance-based seismic design method of cable supported bridges with the resilient-friction base isolation systems." *Applied Sciences* 10 (11): 3942.
- Girija Vallabhan, CV, and YC Das. 1991. "Modified Vlasov model for beams on elastic foundations." *Journal of geotechnical engineering* 117 (6): 956-966.
- Gorantiwar, Anish, Rajvardhan Nalawade, Arash Nouri, and Saied Taheri. 2020. "Experimental analysis of a novel double damper system with semi-active control." *Electronics* 9 (9): 1518.

- Griffiths, D. V. 1990. "Treatment of skew boundary conditions in finite element analysis." *Computers & Structures* 36 (6): 1009-1012.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0045-7949\(90\)90207-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0045-7949(90)90207-1).
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0045794990902071>.
- Gu, Zhenyuan, Yahui Lei, Wangping Qian, Ziru Xiang, Fangzheng Hao, and Yi Wang. 2021. An Experimental Study on the Mechanical Properties of a High Damping Rubber Bearing with Low Shape Factor. *Applied Sciences* 11 (21).
<https://doi.org/10.3390/app112110059>.
- Guddati, M. N., and K. W. Lim. 2006. "Continued fraction absorbing boundary conditions for convex polygonal domains." *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 66 (6): 949-977.
<https://doi.org/10.1002/nme.1574>.
<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-33646526463&doi=10.1002%2fnme.1574&partnerID=40&md5=e9d9b6442db4527f0d8a71dcfcbac73>.
- Gutierrez Soto, Mariantonieta, and Hojjat Adeli. 2013. "Tuned Mass Dampers." *Archives of Computational Methods in Engineering* 20 (4): 419-431.
<https://doi.org/10.1007/s11831-013-9091-7>.
- Gücek, Süleyman, Kamil Bekir Afacan, and İsmail Zorluer. 2023. "6 Şubat 2023 Depremleri Sonrası Zemin Büyütmesi ve Sıvılaşma Gerçeği: Antakya, Gölbasi, Türkoğlu Örnekleri." *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi* 23 (3): 740-752.
- Gürbüz, Mustafa. 2023. "Mikrotremor Verilerinde Çapraz Spektrum ve Güç Spektrumu Tekniği Kullanılarak Zemin Büyütmesinin Belirlenmesi." *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi* 25 (73): 37-53.
- Habib, Ahed, and Umut Yildirim. 2023. "Distribution of strong input energy in base-isolated structures with complex nonlinearity: a parametric assessment." *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures* 19 (2): 324-340.
- Hamza, Ameer, Muhammad Hammad, Sikandar Ali Khokhar, Faizan Ali, and Abbas Haider. 2024. "Enhancing Fluid Viscous Damper Design in High-Rise Buildings through Direct Soil Structure Interaction Approach." *Research Square*. <https://doi.org/https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4173486/v1>.
- Hasan, Abdulameer Qasim, and Yahya Mohammad Younus. 2023. "Used Isolation System to Reduce the Response of Offshore Structure Considering Soil Structure Interaction." *Civil Environmental Engineering* 19 (2): 662-675.
- Hasmaden, Hilal. 2014. "Kayma çerçevelerinde optimum sönümleyici dağılımına zemin etkisi." İnşaat Mühendisliği, Niğde Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü.

- Hatipoğlu, Yavuz Selim, and Oğuz Akın Düzgün. 2020. "Investigation of the effectiveness of viscous dampers connected to adjacent buildings on dynamic behavior under soil-structure interaction effects." *Sigma Journal of Engineering Natural Sciences* 11 (1): 51-72.
- Hazout, Leila, Zein El-Abidine Zitouni, Mostefa Belkhatir, and Tom Schanz. 2017. "Evaluation of static liquefaction characteristics of saturated loose sand through the mean grain size and extreme grain sizes." *Geotechnical Geological Engineering* 35: 2079-2105.
- He, Zhongying, Yifan Song, Jianguo Wang, Wen Xu, Hongzhai Guan, and Yutao Pang. 2023. "Experimental study on mechanical property degradation of thermal aging laminated rubber bearing." *Case Studies in Construction Materials* 18: e02060. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02060>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509523002395>.
- Hetényi, Miklós, and Miklós Imre Hetbenyi. 1946. *Beams on elastic foundation: theory with applications in the fields of civil and mechanical engineering*. Vol. 16. University of Michigan press Ann Arbor, MI.
- Hiçyılmaz, Murat, Mizan Doğan, and Hasan Gönen. 2018. "Geri çekme düzensizliğine sahip çelik çerçevelerde optimum viskoz sönümleyici dağılımının incelenmesi." *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 24 (6): 1024-1029.
- Hirshikesh, A. L. N. Pramod, R. K. Annabattula, E. T. Ooi, C. Song, and S. Natarajan. 2019. "Adaptive phase-field modeling of brittle fracture using the scaled boundary finite element method." *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 355: 284-307. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cma.2019.06.002>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045782519303342>.
- Hojat Jalali, Himan, Maziar Fahimi Farzam, Seyyed Ali Mousavi Gavvani, and Gebrail Bekdaş. 2023. "Semi-active control of buildings using different control algorithms considering SSI." *Journal of Building Engineering* 67: 105956. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.105956>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710223001353>.
- Hokmabadi, Aslan S, and Behzad Fatahi. 2016. "Influence of foundation type on seismic performance of buildings considering soil–structure interaction." *International Journal of structural stability dynamics* 16 (08): 1550043.
- Ikeda, Yoshiki, Katsuyasu Sasaki, Mitsuo Sakamoto, and Takuji Kobori. 2001. "Active mass driver system as the first application of active structural control." *Earthquake engineering structural dynamics* 30 (11): 1575-1595.
- Imran, Iswandi, Dionysius M. Siringoringo, and James Michael. 2021. "Seismic performance of reinforced concrete buildings with double concave friction

- pendulum base isolation system: case study of design by Indonesian code." *Structures* 34: 462-478.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.07.084>.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352012421007013>.
- Jia-Long, Li, Yu Ding-Hao, and Li Gang. 2022. "Seismic response analysis of complicated soil-structure interaction using inelasticity-separated scaled boundary finite element method." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 152: 107069. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.107069>.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0267726121004917>.
- Jiang, Junni, Jijian Lian, Xiaofeng Dong, Haijun Wang, and Huan Zhou. 2021. "Soil damping calculation of the offshore wind turbine supported by wide-shallow bucket foundation." *Applied Ocean Research* 111: 102682.
- Jouneghani, Kourosh, Mahmood Hosseini, Mohammad Rohanimanesh, and Morteza Dehkordi. 2023. "Building's Controlled Seismic Isolation by Using Dampers and Stiff Core *." *Turkish Journal of Civil Engineering* 34. <https://doi.org/10.18400/tjce.1265467>.
- Jouneghani, Kourosh Talebi, Mahmood Hosseini, Mohammad Sadegh Rohanimanesh, and Morteza Raissi. 2023. "Building's Controlled Seismic Isolation by Using Upper Horizontal Dampers and Stiff Core." *Turkish Journal of Civil Engineering* 34 (3).
- Jung, Hyung-Jo, BF Spencer Jr, YQ Ni, and IW Lee. 2004. "State-of-the-art of semiactive control systems using MR fluid dampers in civil engineering applications." *Structural Engineering Mechanics* 17 (3-4): 493-526.
- Kahya, Volkan, and ARAZ Onur. 2020. "Yüksek hızlı demiryolu köprülerinde aşırı titreşimlerin azaltılmasında paralel bağlı ayarlı kütle sönümleyiciler için basit bir tasarım yöntemi." *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi* 35 (2): 607-618.
- Kaliyaperumal, Saravana Raja Mohan. 2022. "Numerical Investigation of Visco-Elastic Damper for Seismic Vibration." *Advances in Structural Mechanics Applications: Proceedings of ASMA-*.
- Kaptan, Kubilay. 2012. "Deprem Dalgalarının Zemin Büyütmesi Üzerine Örnekler." *TÜBAV Bilim Dergisi* 5 (4): 17-32.
- Karabörk, Turan. 2009. "Yapı-Zemin Etkileşimi Dikkate Alınarak Betonarme Yapıların Doğrusal Olmayan 3 Boyutlu Dinamik Analizi." *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi* 5 (1): 25-36.
<https://doi.org/https://dergipark.org.tr/tr/pub/yted/issue/22214/238501>.
<https://dergipark.org.tr/tr/pub/yted/issue/22214/238501>.
- Karabörk, Turan, İbrahim Ö. Deneme, and R. Pelin Bilgehan. 2010. "Temeli izole edilen yapılarda dinamik yapı-zemin etkileşimi." *Erciyes Üniversitesi Fen*

Bilimleri Enstitüsü Dergisi 26 (1): 77-87.
<https://doi.org/https://dergipark.org.tr/en/pub/erciyesfen/issue/25575/269780>.
<https://dergipark.org.tr/en/pub/erciyesfen/issue/25575/269780>.

Karaca, Hakan. 2021. "2007 ve 2018 Deprem Yönetmelikleri Kullanılarak Farklı Zeminlere Göre ve Farklı Kentler İçin Elde Edilen Tasarım İvmelerinin Karşılaştırılması, Kapadokya Örneği." *Afet ve Risk Dergisi* 4 (1): 42-52.

Karafagka, Stella, Stavroula Fotopoulou, and Dimitris Pitilakis. 2023. "The Effect of Soil Liquefaction and Lateral Spreading to the Seismic Vulnerability of RC Frame Buildings Considering SSI." *Journal of Earthquake Engineering*: 1-23.
<https://doi.org/10.1080/13632469.2023.2193658>.

Karakostas, Christos, Konstantinos Morfidis, Emmanouil Rovithis, and Nikolaos Theodoulidis. 2022. "Soil-structure interaction effects on the seismic response of a public building in Lefkas, Greece." *Bulletin of Earthquake Engineering* 20 (7): 3549-3575. <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01278-8>.
<https://doi.org/10.1007/s10518-021-01278-8>.

Karimi, Mohammad Reza Bagerzadeh, and Mehmet Cemal Genes. 2021. "Effectiveness of FVD-BIS for protecting a base-isolated high-rise building against resonance." *Earthquakes Structures* 21 (4): 351-370.

Karşlıoğlu, Asena, Mehmet Hanifi Alkayış, and Mehmet İnanç Onur. 2021. "Sentinel-1 uydusu ile deprem kaynaklı yüzey çökme analizi: Sivrice-Doğanyol-Pütürge örneği." *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi* 11 (2): 510-521.

Kavyashree, B. G., Shantharam Patil, and Vidya S. Rao. 2021. "Review on vibration control in tall buildings: from the perspective of devices and applications." *International Journal of Dynamics and Control* 9 (3): 1316-1331.
<https://doi.org/10.1007/s40435-020-00728-6>.

Kayabekir, Aylin Ece, Gebrail Bekdaş, Sinan Melih Nigdeli, and Zong Woo Geem. 2020. "Optimum Design of PID Controlled Active Tuned Mass Damper via Modified Harmony Search." *Applied Sciences* 10 (8): 2976.
<https://doi.org/https://doi.org/10.3390/app10082976>.
<https://www.mdpi.com/2076-3417/10/8/2976>.

Kerr, Arnold D. 1965. "A study of a new foundation model." *Acta Mechanica* 1 (2): 135-147.

Khajehsaeid, Hesam, Jamal Arghavani, Reza Naghdabadi, and s Sohrabpour. 2014. "A visco-hyperelastic constitutive model for rubber-like materials: A rate-dependent relaxation time scheme." *International Journal of Engineering Science* 79: 44-58. <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2014.03.001>.

Kim, Simon, and Enzo D'Amore. 1999. "Push-over analysis procedure in earthquake engineering." *Earthquake Spectra* 15 (3): 417-434.

- Kneifati, Mahmoud C. 1985. "Analysis of plates on a Kerr foundation model." *Journal of Engineering Mechanics* 111 (11): 1325-1342.
- Kori, Jagadish G, and RS Jangid. 2007. "Semi-active stiffness dampers for seismic control of structures." *Advances in Structural Engineering* 10 (5): 501-524.
- Kramer, Steven Lawrence. 1996. *Geotechnical earthquake engineering*. Pearson Education India.
- Krawinkler, Helmut. 1996. "Pushover analysis: why, how, when, and when not to use it." Proceedings of the 65th Annual Convention of the Structural Engineers Association of California, Maui, Hawaii.
- Krawinkler, Helmut, and GDPK Seneviratna. 1998. "Pros and cons of a pushover analysis of seismic performance evaluation." *Engineering structures* 20 (4-6): 452-464.
- Kurt, Zafer, and Zeliha Tonyalı. 2020. "Performance Analysis of a Reinforced Concrete Frame System According to TBEC-2018." *Sciennovation* 1 (2): 6-22.
- Kutanis, Mustafa 2001. "YAPI-ZEMİN DİNAMİK ETKİLEŞİMİ." Doktora Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü SAKARYA ÜNİVERSİTESİ.
- Lashkari, Ali, Ali Karimi, Kazem Fakharian, and Farzad Kaviani-Hamedani. 2017. "Prediction of undrained behavior of isotropically and anisotropically consolidated Firoozkuh sand: instability and flow liquefaction." *International Journal of Geomechanics* 17 (10): 04017083.
- Lavasani, Seyed Hossein Hosseini, and Rouzbeh Doroudi. 2020. "Meta heuristic active and semi-active control systems of high-rise building." *International Journal of Structural Engineering* 10 (3): 232-253.
- Lee, David, and Douglas P Taylor. 2001. "Viscous damper development and future trends." *The structural design of tall buildings* 10 (5): 311-320.
- Lee, Hong-Pyo, and Myung-Sug Cho. 2013. "Assessment of EQS Seismic Isolation Device for Nuclear Power Plant." *Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting*: 24-25.
- Lee, Hyungyil, and David M Parks. 1995. "Enhanced elastic-plastic line-spring finite element." *International journal of solids structures* 32 (16): 2393-2418.
- Li, Jianbo, Miaomiao Chen, and Zhiyuan Li. 2022. "Improved soil–structure interaction model considering time-lag effect." *Computers and Geotechnics* 148: 104835. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2022.104835>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266352X22001872>.
- Li, Zhong-Xian, Dongbin Wen, Yundong Shi, and Xin Wei. 2022. "A frequency-dependent variable-damping control based variable-orifice damper for smart base-isolation system." *Smart Materials Structures* 31 (12): 125016.

- Liao, Wen-I, Chin-Hsiung Loh, and Shiuan Wan. 2001. "Earthquake responses of RC moment frames subjected to near-fault ground motions." *The Structural Design of Tall Buildings* 10 (3): 219-229.
- Lim, Brian, and Tatsuji Matsumoto. 2006. "Characteristics of super high damping visco-elastic damper for earthquake and wind-induced vibration." 4th International Conference on Earthquake Engineering, Taipei, Taiwan.
- Liu Dewen, Yang Fan, X. U. Jingran, L. I. Zhiang, Yang Yutong, and L. I. U. Yang. 2022. "Seismic response research of SSI effect on inter-story isolated structure." *JOURNAL OF BUILDING STRUCTURES* 43 (S1): 232-238. <https://doi.org/10.14006/j.jzjgxb.2022.S1.0025>. <http://www.jzjgxb.com/EN/10.14006/j.jzjgxb.2022.S1.0025>.
- Liu, Dewen, Liping Li, Yafei Zhang, Lihao Chen, Feng Wan, and Fan Yang. 2022. "Study on seismic response of a new staggered story isolated structure considering SSI effect." *Journal of Civil Engineering Management* 28 (5): 397-407-397-407.
- Liu, Jingbo, Hui Tan, Xin Bao, Dongyang Wang, and Shutao Li. 2019. "Seismic wave input method for three-dimensional soil-structure dynamic interaction analysis based on the substructure of artificial boundaries." *Earthquake Engineering and Engineering Vibration* 18 (4): 747-758. <https://doi.org/10.1007/s11803-019-0534-5>.
- Liu, Shutong, Zheng Lu, Peizhen Li, Sunwei Ding, and Fei Wan. 2020. "Shaking table test and numerical simulation of eddy-current tuned mass damper for structural seismic control considering soil-structure interaction." *Engineering Structures* 212: 110531. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110531>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029619344372>.
- Liu, Yanhui, Jinbiao Wu, and Marco Donà. 2018. "Effectiveness of fluid-viscous dampers for improved seismic performance of inter-storey isolated buildings." *Engineering Structures* 169: 276-292. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.05.031>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029617335113>.
- Loghman, Vahid, Faramarz Khoshnoudian, and Mehdi Banazadeh. 2013. "Effect of vertical component of earthquake on seismic responses of triple concave friction pendulum base-isolated structures." *Journal of Vibration and Control* 21 (11): 2099-2113. <https://doi.org/10.1177/1077546313503359>.
- Luca, Septimiu-George, and Cristian Pastia. 2009. "Case study of variable orifice damper for seismic protection of structures." *Buletinul Institutului Politehnic din Iasi. Sectia Constructii, Arhitectura* 55 (1): 39.
- Lysmer, J., and R. L. Kuhlemeyer. 1969. "Finite Dynamic Model for Infinite Media." *Journal of the ENGINEERING MECHANICS DIVISION Proceedings of the American Society of Civil Engineers* 95 (EM4): 859-877.

- Lysmer, J., T. Udaka, C. Tsai, and H. B. Seed. 1975. *FLUSH - a computer program for approximate 3-D analysis of soil-structure interaction problems*. (United States). http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:08330610.
- Mamuk, Furat. 2010. "Üç Boyutlu Dinamik Zemin-yapı Etkileşimi." Yüksek Lisans Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Mase, Lindung Zalbuin, Suched Likitlersuang, and Tetsuo Tobita. 2021. "Ground motion parameters and resonance effect during strong earthquake in northern Thailand." *Geotechnical Geological Engineering* 39 (3): 2207-2219.
- Minnucci, Lucia, Michele Morici, Sandro Carbonari, Francesca Dezi, Fabrizio Gara, and Graziano Leoni. 2022. "A probabilistic investigation on the dynamic behaviour of pile foundations in homogeneous soils." *Bulletin of Earthquake Engineering* 20 (7): 3329-3357. <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01272-0>.
- Miranda, Eduardo, and Jorge Ruiz-Garcia. 2002. "Influence of stiffness degradation on strength demands of structures built on soft soil sites." *Engineering Structures* 24 (10): 1271-1281.
- Mirhashemian, P, N Khaji, and H Shakib. 2009. "Soil-structure interaction (SSI) analysis using a hybrid spectral element/finite element (SE/FE) approach." *JOURNAL OF SEISMOLOGY AND EARTHQUAKE ENGINEERING* 11 (2): 84-95.
- Mj, Turner. 1956. "Stiffness and deflection analysis of complex structures." *J Aero Sci* 23: 805.
- Moghaddasi, M, M Cubrinovski, S Pampanin, A Carr, and JG Chase. 2010. "A robust probabilistic evaluation of soil-foundation-structure interaction effects on structural response." *Soil-Foundation-Structure Interaction*: 77-84.
- Moharnmadi, S, DRJ Owen, and D Peric. 1998. "A combined finite/discrete element algorithm for delamination analysis of composites." *Finite Elements in Analysis Design* 28 (4): 321-336.
- Mokha, Anoop, M. C. Constantinou, A. M. Reinhorn, and A. Zayas Victor. 1991. "Experimental Study of Friction-Pendulum Isolation System." *Journal of Structural Engineering* 117 (4): 1201-1217. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1991\)117:4\(1201\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1991)117:4(1201)). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1991\)117:4\(1201\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1991)117:4(1201)).
- Mujeeb, Md, JSR Prasad, and Venu Malagavelli. 2019. "Performance of Fluid Viscous Dampers on Seismic Response of RCC Structures." *International Journal of Innovative Technology Exploring Engineering* 8 (12): 2453-2459.
- Mwafy, AM, and Amr S Elnashai. 2001. "Static pushover versus dynamic collapse analysis of RC buildings." *Engineering structures* 23 (5): 407-424.

- Naimi, Sepanta, and Mohammad Harris Waheb. 2019. "Deprem Etkisindeki Yapıların Sismik Taban İzolasyonu ve Çoklu Ayarlı Kütle Sönümleyici Sistemleri ile Karma Korunması." *Erzincan University Journal of Science Technology* 12 (1): 499-516.
- Nathe, Piyush, and SK Hirde. 2021. "SEISMIC ANALYSIS OF SOIL INTEGRATED RC BUILDING RESTING ON SLOPE EMPLOYING FLUID VISCOUS DAMPERS." *International Research Journal of Engineering and Technology* 08 (09).
- Ng, C. L., and Y. L. Xu. 2007. "Semi-active control of a building complex with variable friction dampers." *Engineering Structures* 29 (6): 1209-1225. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.08.007>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029606003300>.
- Nguyen, Dong Van, and Dookie Kim. 2018. "Perfectly matched discrete layers with analytical wavelengths for soil–structure interaction analysis." *International Journal of Structural Stability Dynamics* 18 (09): 1850103.
- Nsieri, Emad, Yaron Offir, and Alex Shohat. 2014. "Seismic retrofit of exiting spherical tank using non-linear viscous dampers." Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Istanbul.
- Ocak, Ayla, Sinan Melih Niğdeli, and Gebrail Bekdaş. 2023. "Ayarlı Kütle Sönümleyicilerinin Optimum Ayarlanması." *Iuc University Press*. <https://doi.org/10.5152/3000>.
- Olarte, Juan, Shideh Dashti, and Abbie B Liel. 2018. "Can ground densification improve seismic performance of the soil-foundation-structure system on liquefiable soils?" *Earthquake Engineering Structural Dynamics* 47 (5): 1193-1211.
- Oz, Ibrahim, Sevkett Murat Senel, Mehmet Palanci, and Ali Kalkan. 2020. "Effect of Soil-Structure Interaction on the Seismic Response of Existing Low and Mid-Rise RC Buildings." *Applied Sciences* 10 (23): 8357. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/app10238357>. <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/23/8357>.
- Ozuygur, Ali Ruzi, and Ehsan Farsangi. 2021. "Influence of Pulse-Like Near-Fault Ground Motions on the Base-Isolated Buildings with LRB Devices." *Practice Periodical on Structural Design and Construction* 26. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SC.1943-5576.0000603](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000603).
- Özel, Feyzullah. 2019. "Comparison Of Microtremor Measurements And 3-D Soil Structure Interaction Analysis For A Historical Masonry Arch Bridge Under Near-Fault And Far-Fault Earthquakes." Yüksek Lisans Tezi, Civil Engineering, Gaziantep University.

- Özgan, K. 2000. "Değiştirilmiş Vlasov Modelini Kullanarak Elastik Zemine Oturan Kirişlerin Serbest Titreşim Hareketi." Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Teknik Üniversitesi.
- Özgan, K. 2007. "*Geliştirilmiş vlasov modelini kullanarak elastik zemine oturan kalın plakların sonlu elemanlar yöntemiyle analizi ve etkin zemin derinliğinin belirlenmesi.*" Doktora Tezi, İnşaat Mühendisliği, Karadeniz Teknik Üniversitesi.
- Pandey, Gaurav, Dharendra Patel, Vishal Kumar Mourya, Rajesh Kumar, and Suresh Kumar. 2023. "A Review on Soil-Foundation-Interaction Models." *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering* 11 (3): 158-179.
- Papanikolaou, Vassilis K, Amr S Elnashai, and Juan F Pareja. 2006. "Evaluation of conventional and adaptive pushover analysis II: Comparative results." *Journal of earthquake engineering* 10 (01): 127-151.
- Paramasivam, Balaji, Shideh Dashti, and Abbie Liel. 2018. "Influence of prefabricated vertical drains on the seismic performance of structures founded on liquefiable soils." *Journal of Geotechnical Geoenvironmental Engineering* 144 (10): 04018070.
- Park, K. H., Y. Fujiwara, T. Mazda, and Y. Kajita. 2020. "Evaluation of mechanical properties considering hysteresis characteristic of high damping rubber bearing." *Journal of Physics: Conference Series* 1687 (1): 012019. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1687/1/012019>.
- Pasternak, PL. 1954. "On a new method of analysis of an elastic foundation by means of two foundation constants." *Gos. Izd. Lit. po Strait i Arkh.*
- Pastia, Cristian, Septimiu George Luca, Florentina Chira, and Victor Octavian Roşca. 2005. "Structural control systems implemented in civil engineering." *Bulletin of the Polytechnic Institute of Jassy, Construction. Architecture Section*: 76-80.
- Patel, Chirag C, and RS Jangid. 2008. "Influence of soil-structure interaction on response of adjacent SDOF structures connected by viscous damper." The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG), Goa, India.
- Perumal, Logah, and Daw Thet Thet Mon. 2011. "Finite elements for engineering analysis: a brief review." Proceedings of the International Conference on Modeling, Simulation and Control, Singapore.
- Phuor, Ty, Indra S. H. Harahap, C. Y. Ng, and M. A. M. Al-Bared. 2021. "Development of the skew boundary condition for soil-structure interaction in three-dimensional finite element analysis." *Computers and Geotechnics* 137: 104264. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2021.104264>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266352X21002627>.

- Pianese, G, G Milani, and A Formisano. 2022. "High Damping Rubber Isolators for Low-Rise Masonry Buildings." *MASONRY INTERNATIONAL* 35 (1): 1-10.
- Pitilakis, Dimitris. 2006. "Soil-structure interaction modeling using equivalent linear soil behavior in the substructure method." Doktora Tezi, İnşaat Mühendisliği, Châtenay-Malabry, Ecole centrale de Paris.
- Polycarpou, Panayiotis. 2009. "Investigation of earthquake-induced poundings of seismically isolated buildings." Doktora Tezi, İnşaat Mühendisliği, University of Cyprus.
- Pong, Wenshen, and CS Tsai. 2001. "Soil-Structure Interaction Effects of Damped Structures." *CTBUH Review*: 43.
- "Proc. Matrix Methods in Structural Analysis." 1965. Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, October 26-28.
- Qin, Hu, and Kang Ma. 2021. "Dynamic behaviour difference between high-and low-raft forms of piles in earthquakes." *Geotechnical Research* 8 (3): 85-92.
- Rad, AA, NK Hazaveh, and T Holden. 2019. "Seismic performance of steel buildings with fluid viscous dampers relative to base isolation." Proceedings of 2019 Pacific Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand.
- Rahimi, Fatemeh, Reza Aghayari, and Bijan Samali. 2020. "Application of tuned mass dampers for structural vibration control: a state-of-the-art review." *Civil Engineering Journal* 6 (9): 1622-1651.
- Ras, A., and N. Boumechra. 2016. "Seismic energy dissipation study of linear fluid viscous dampers in steel structure design." *Alexandria Engineering Journal* 55 (3): 2821-2832. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.07.012>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016816301843>.
- Reddy, Junuthula Narasimha. 2019. *Introduction to the finite element method*. New York 27: McGraw-Hill Education.
- Rohollah, Rostami, B. Mickovski Slobodan, Hytiris Nicholas, and Bhattacharya Subhamoy. 2020. "The Dynamic Behaviour of Pile Foundations in Seismically Liquefiable Soils: Failure Mechanisms, Analysis, Re-Qualification." In *Earthquakes*, edited by Salazar Walter, Ch. 8. Rijeka: IntechOpen.
- Rosti, Matteo, Stefano Cii, Alberto Bussini, Paolo M. Calvi, and Francesco Ripamonti. 2022. "Design and validation of a hardware-in-the-loop test bench for evaluating the performance of an active mass damper." *Journal of Vibration and Control* 29 (17-18): 4093-4106. <https://doi.org/10.1177/10775463221111262>.
- Salaas, Basel, Gebrail Bekdaş, Yasser E. Ibrahim, Sinan Melih Nigdeli, Mohamed Ezzat, Mahmoud Nawar, and Aylin Ece Kayabekir. 2023. "Design

- Optimization of a Hybrid Vibration Control System for Buildings." 13 (4): 934. <https://www.mdpi.com/2075-5309/13/4/934>.
- Salimath, RS, MJ Pender, LS Hogan, and LM Wotherspoon. 2017. "Field tests on shallow foundations on stiff clay: moment-rotation response and damping." 20th NZGS Geotechnical Symposium.
- Savadatti, S., and M. N. Guddati. 2010. "A finite element alternative to infinite elements." *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 199 (33-36): 2204-2223. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2010.03.018>. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-77953542390&doi=10.1016%2fj.cma.2010.03.018&partnerID=40&md5=12d3fa13f19a61c0453755eed624beaa>.
- Scarfone, Riccardo, Marco Morigi, and Riccardo Conti. 2020. "Assessment of dynamic soil-structure interaction effects for tall buildings: A 3D numerical approach." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 128: 105864. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105864>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0267726119305871>.
- Serdar, Ahmet Hamdi. 2015. "Yüzeye yakın yumuşak zeminlerde yapılan betonarme binaların deprem davranışına bodrum kat etkisinin incelenmesi." Yüksek Lisans Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği, Sakarya Üniversitesi (Turkey).
- Serino, G, M Marsico Spizzuoco, and Chandrasekaran S MR. 2008. "Seismic isolation and modelling of a worship structure." Fourth European Conference on Structural Control.
- Shahsavari, Davood, Maryam Shahsavari, Li Li, and Behrouz Karami. 2018. "A novel quasi-3D hyperbolic theory for free vibration of FG plates with porosities resting on Winkler/Pasternak/Kerr foundation." *Aerospace Science and Technology* 72: 134-149. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ast.2017.11.004>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1270963817314244>.
- Shakib, H., and A. Fuladgar. 2003a. "Effect of vertical component of earthquake on the response of pure-friction base-isolated asymmetric buildings." *Engineering Structures* 25 (14): 1841-1850. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2003.08.008>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029603002050>.
- Shakib, H., & Fuladgar, A. 2003b. "Response of pure-friction sliding structures to three components of earthquake excitation." *Computers & Structures* 81 (4): 189-196. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(02\)00444-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0045-7949(02)00444-3). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045794902004443>.
- Shamkhi Al-Ghazali, Anwar, and Hashem Shariatmadar. 2021. "Hybrid active control of adjacent buildings interconnected by viscous dampers utilizing type-2 fuzzy

- controller considering soil-structure interaction." *Structures* 33: 292-306.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.03.117>.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352012421002976>.
- Shanmuga Priya, D, A Cinitha, PK Umesha, and R Iyer Nagesh. 2014. "Enhancing the seismic response of buildings with energy dissipation methods—An overview." *Journal of Civil Engineering Research*: 17-22.
<https://doi.org/10.5923/c.jce.201401.04>.
- Sharma, ML, and P Sharma. 2020. "Site Characterization And Soil Structure Interaction With Deep Bedrock Depth In Indo-Gangetic Plains." The 17th World Conference on Earthquake Engineering, Sendai, Japan.
- Sheikh, Hediye, Niel C. Van Engelen, and Rajeev Ruparathna. 2022. "A review of base isolation systems with adaptive characteristics." *Structures* 38: 1542-1555.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.02.067>.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235201242200159X>.
- Shivaprakash, B. G., and S. V. Dinesh. 2017. "Dynamic Properties of Sand–Fines Mixtures." *Geotechnical and Geological Engineering* 35 (5): 2327-2337.
<https://doi.org/10.1007/s10706-017-0247-3>.
- Sivrikaya, Osman, Ersin Aydin, and Hilal Turker. 2021. "Improvement of Dynamic Response of Structures on Sandy Soil by Means of Viscous Dampers." *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering* 45 (2): 741-756. <https://doi.org/10.1007/s40996-020-00445-2>.
- Siyahi, Bilge, Kemal Önder Çetin, and Habib Tolga Bilge. 2013. "Geoteknik deprem mühendisliği açısından zemin-temel-yapı etkileşimine kritik bakış." *Türkiye Mühendislik Haberleri* 484: 41-50.
- Song, Chongmin. 2009. "The scaled boundary finite element method in structural dynamics." *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 77 (8): 1139-1171.
- Song, Chongmin, and John P. Wolf. 1998. "The scaled boundary finite-element method: analytical solution in frequency domain." *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 164 (1): 249-264.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0045-7825\(98\)00058-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0045-7825(98)00058-9).
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045782598000589>.
- Sotiriadis, Dimitris, Nikolaos Klimis, Basil Margaris, and Anastasios Sextos. 2020. "Analytical expressions relating free-field and foundation ground motions in buildings with basement, considering soil-structure interaction." *Engineering Structures* 216: 110757.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110757>.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029619344529>.

- Soysal, Lale. 2006. "Deprem koşullarında yapı-zemin etkileşimi ve zemin iyileştirmesi." Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği, İstanbul Kültür Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Sun, Jianpeng, and Gaolin Zhufu. 2022. "Mechanical Behavior of Laminated Rubber Isolation Bearing with Buckling Steel Plate." *International Journal of Steel Structures* 22 (4): 1069-1085. <https://doi.org/10.1007/s13296-022-00623-0>.
- Şadan, Bahadır 2016. "Deprem güçlendirmesinde sismik izolasyon sistemleri ve sönümleyici kullanımı." İstanbul Teknik Üniversitesi Deprem Mühendisliği ve Afet Yönetim Enstitüsü, İstanbul.
- Şahin, Gizem, Onur Toygar, and Mehmet Rifat Kahyaoğlu. 2022. "Sıvılaşma Riskinin Azaltılması için Kullanılan Jet Grout Kolonlarının Verimliliği Üzerine Bir Sayısal Çalışma." *Türk Deprem Araştırma Dergisi* 4 (2): 210-229.
- Şahin, Murat , Fatih Göktepe, Erkan Çelebi, Abdullah Can Zülfikar, and Osman Kırtel. 2019. "Farklı Frekans İçeriklerine Sahip Tren Geçişlerinde Oluşan Titreşim Enerjisinin Soğurulmasının Deneysel Ve Analitik Olarak Değerlendirilmesi." 8. *Uluslararası Geoteknik Sempozyumu*, İTÜ Ayazağa Kampüsü, İstanbul.
- Şelenbaş, Seda. 2017. "Kaya ve alüvyon ortamlarda zeminin bina yüksekliğine etkisi." *Uygulamalı Yerbilimleri Dergisi* 16 (1): 1-16.
- Tanahashi, Hideaki, and Yoshiyuki Suzuki. 2020. "Review on the mechanical models and formulations of embedment of traditional timber joints in Japan." *Japan Architectural Review* 3 (2): 148-164.
- Tatsuoka, Fumio, Toshio Iwasaki, and Yoshikazu Takagi. 1978. "Hysteretic damping of sands under cyclic loading and its relation to shear modulus." *Soils Foundations* 18 (2): 25-40.
- TBDY. 2018. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği.
- Teodoru, Iancu-Bogdan, and Vasile Muşat. 2010. "The modified Vlasov foundation model: An attractive approach for beams resting on elastic supports." *EJGE* 15: 1-13.
- Thirunavukkarasu, Senganal, and Murthy N. Guddati. 2011. "Absorbing boundary conditions for time harmonic wave propagation in discretized domains." *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 200 (33): 2483-2497. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cma.2011.04.021>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045782511001629>.
- Thomson, William Tyrrell. 1965. "Vibration theory and applications(Book on vibration theory and application in treatment of vibrations in systems with various degrees of freedom, developing mathematical techniques)." *Englewood Cliffs, N. J., Prentice-Hall, Inc., . 384 P.*

- Tipsunavee, Thanapon, and Goran Arangjelovski. 2021. "Three-Dimensional Analysis of Soil-Pile-Structure Interaction Problem on High Rise Building on Improved Soft Soil." *GEOMATE Journal* 21 (88): 54-60.
- Tonyali, Z., and S. Ates. 2018. "The coupling finite-boundary element method for soil-structure interaction under spatially varying ground motion." *Journal of Structural Engineering & Applied Mechanics* 1 (1): 6-21. <https://doi.org/10.31462/jseam.2018.01006021>.
- Topaloglu, Hakan, and Arcan Yanik. 2023. "Soil-structure interaction in a base and mid-story seismically isolated building." *Materials Today: Proceedings* 85: 43-46. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.05.253>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785323028882>.
- TS498. Yapı elemanlarının boyutlandırılmasında alınacak yüklerin hesap değerleri.
- Tsai, Chong-Shien, Yan-Ming Wang, and Hui-Chen Su. 2019. "Soil-structure interaction, damping and higher mode effects on the response of a mid-story-isolated structure founded on multiple soil layers." *International Journal of Organizational Innovation* 11 (3): 135.
- Tsai, Hsiang-Chuan. 1995. "The effect of tuned-mass dampers on the seismic response of base-isolated structures." *International Journal of Solids and Structures* 32 (8): 1195-1210. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0020-7683\(94\)00150-U](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0020-7683(94)00150-U). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/002076839400150U>.
- Tzong, Tsair-jyh, and Joseph Penzien. 1983. *Hybrid modelling of soil-structure interaction in layered media*. Berkeley, CA: Earthquake Engineering Research Center, University of California.
- Tzou, HS, CI Tseng, and H Bahrami. 1994. "A thin piezoelectric hexahedron finite element applied to design of smart continua." *Finite Elements in Analysis Design* 16 (1): 27-42.
- Uludağ, Soner. 2005. "Taban İzolasyonu Sistemlerinin Karşılaştırmalı Analizi." Yüksek Lisans Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Uzelli, Taygun, Esra Bilgiç, Bahadır Öztürk, Alper Baba, Hasan Sözbilir, and Orhan Tatar. 2021. "Effects of seismic activity on groundwater level and geothermal systems in İzmir, Western Anatolia, Turkey: the case study from October 30, 2020 Samos Earthquake." *Turkish Journal of Earth Sciences* 30 (8): 758-778.
- Ürkmezyel, Mete. 2023. "Sismik izolasyon sistemlerinin fayda-maliyet analizi açısından değerlendirilmesi." Yüksek Lisans Yüksek lisans tezi, İnşaat Mühendisliği, TC Maltepe Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- Vaishali, Gavane, and AN Shaikh. 2022. "analysis of high rise buildings with diffrent shapes by corner modification & considering aerodynamic effect."

- Vallabhan, CV Girija, and YC Das. 1988. "Parametric study of beams on elastic foundations." *Journal of engineering mechanics* 114 (12): 2072-2082.
- Van Nguyen, Dong, and Dookie Kim. 2020. "Dynamic soil-structure interaction analysis in time domain based on a modified version of perfectly matched discrete layers." *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 12 (1): 168-179. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.06.006>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674775519306456>.
- Van Nguyen, Dong, Dookie Kim, and Duan Duy Nguyen. 2020. "Nonlinear seismic soil-structure interaction analysis of nuclear reactor building considering the effect of earthquake frequency content." *Structures* 26: 901-914. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.05.013>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352012420302253>.
- Vlasov, Vasilii Zakharovich. 1966. "Beams, plates and shells on elastic foundation." *Israel Program for Scientific Translation*.
- Walsh, Kenneth K, Grace Sallar, and Eric P Steinberg. 2019. "Hybrid base-isolation of a nonlinear building using a passive resettable stiffness damper." *Engineering Structures* 178: 206-211.
- Wan, Feng, Cheng Li, Hong Li, Dewen Liu, Shunzhong Yao, and Min Lei. 2023. "Seismic response of a mid-story-isolated structure considering soil-Structure interaction in sloping ground under three-dimensional earthquakes." *Frontiers in Earth Science* 10: 1098711.
- Wan, Feng, Shengwu Qin, Dewen Liu, Tiange Zhao, Yanping Zheng, Hang Shan, Zhiang Li, Fusong Peng, Jingran Xu, and Min Lei. 2024. "Seismic response of a mid-story isolated structure considering SSI in mountainous areas under long-period earthquakes." *Earthquake Engineering Engineering Vibration* 23 (1): 151-161.
- Wan, Feng, Wangwang Zhou, Dewen Liu, Yiran Huo, Hui Li, Xiaoxuan Luo, and Shunzhong Yao. 2023. "Seismic response of a stilted mid-story isolated structure in mountainous areas based on variable parameters soil-structure-interaction effect." *Structures* 51: 707-717. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.03.072>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352012423003582>.
- Wang, Shiang-Jung, Kuo-Chun Chang, Jenn-Shin Hwang, and Bo-Han Lee. 2011. "Simplified analysis of mid-story seismically isolated buildings." *Earthquake engineering structural dynamics* 40 (2): 119-133.
- Wegner, J. L., M. M. Yao, and Xiong Zhang. 2006. "Dynamic wave-soil-structure interaction analysis of tall buildings." 1: 425-430.

- Wu Yingxiong, Zheng Zewei, Y. A. N. Guiyun, W. U. Zhenxiang, Chen Baochun, and L. I. U. Ning. 2021. "Shaking table test of pile-soil inter-story isolated structure under far-field long-period ground motion." *JOURNAL OF BUILDING STRUCTURES* 42 (12): 11-22. <https://doi.org/10.14006/j.jzjgxb.2020.0474>. <http://www.jzjgxb.com/EN/10.14006/j.jzjgxb.2020.0474>.
- Xiao, Shuai, Cheng Li, Dewen Liu, Weiwei Sun, and Min Lei. 2023. "Research on irregular plane mid story isolation structures in castor earthquake prone areas considering SSI effect." *Frontiers in Earth Science* 11: 1207110.
- Xie, Yunfei, Shichun Chi, and Maohua Wang. 2020. "Influence of Variable Rigidity Design of Piled Raft Foundation on Seismic Performance of Buildings." *Mathematical Problems in Engineering* 2020: 1780197. <https://doi.org/10.1155/2020/1780197>.
- Xu, Jingran, Haolun Gao, Zihan Guo, Jie Zhao, Zhuoxin Yang, Guangxing Zhao, Zhongfa Guo, Dewen Liu, and Weiwei Sun. 2023. "Key technologies research on of soil-structure interaction base story isolated structure response in 3D seismic zone." *Frontiers in Earth Science* 11: 1254042. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1254042>. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/feart.2023.1254042>.
- Xu, Liying, Jianri Shi, Yingxiong Wu, and Youqin Lin. 2023. "Interlayer Isolation Structures Considering Soil-Structure Interaction under Long-Period Ground Motions: An Experimental Analysis." *Applied Sciences* 13 (16). <https://doi.org/10.3390/app13169090>.
- Yamamoto, Masashi, Satoru Aizawa, Masahiko Higashino, and Kotaro Toyama. 2001. "Practical applications of active mass dampers with hydraulic actuator." *Earthquake engineering structural dynamics* 30 (11): 1697-1717.
- Yang, Jinping, Zheng Lu, and Peizhen Li. 2020. "Large-scale shaking table test on tall buildings with viscous dampers considering pile-soil-structure interaction." *Engineering Structures* 220: 110960.
- Yang, Zhuoxin, Dewen Liu, TAO Ban, Yunlong Zhao, Rui Sun, and Weiwei Sun. 2024. "Seismic response analysis of cliff-attached isolated structures considering SSI effect under long-period ground motion in the far field." *Research Square*. <https://doi.org/https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4200850/v1>.
- Yanik, Arcan, and Unal Aldemir. 2019. "A Short Review on the Active Control Approaches in Earthquake Engineering at the Last 10 Years (2008-2018)." *International Journal of Engineering Technology* 11 (2).
- Yanık, Arcan, and Hakan Topaloğlu. 2023. "Simple Soil Effect Analysis in a Base and Mid-Story Isolated 15 Story Building." *El-Cezeri* 10 (3): 452-463.

- Yanik, Arcan, and Yalcincan Ulus. 2023. "Soil-Structure Interaction Consideration for Base Isolated Structures under Earthquake Excitation." *Buildings* 13 (4): 915. <https://www.mdpi.com/2075-5309/13/4/915>.
- Yasar, Cansu, Volkan Karuk, Onur Kaplan, Esengul Cavdar, and Gokhan Ozdemir. 2023. "Amplification in Mechanical Properties of a Lead Rubber Bearing for Various Exposure Times to Low Temperature." *Buildings* 13 (2). <https://doi.org/10.3390/buildings13020478>.
- Yeşil, Burak, and Ali Ateş. 2018. "Düzce İlindeki Farklı Zemin Sinifları Dikkate Alınarak Zemin Sinifının Yapı Hasarı Ve Deprem Performansına Etkisi." *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi* 7 (3): 48-56.
- Yoshida, Junji, Masato Abe, and Yozo Fujino. 2004. "Constitutive Model of High-Damping Rubber Materials." *Journal of Engineering Mechanics* 130 (2): 129-141. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2004\)130:2\(129\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2004)130:2(129)).
- Yurteri, Enes, and Oğuz Düğenci. 2022. "U Biçimli İki Farklı Tip Metalik Sönümleyicinin Eksenel Kuvvet Altında Yapısal Davranışı ve İki Yeni Metalik Sönümleyici Tasarımı." *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi* 38 (3): 602-619.
- Yücesoy, A. 2005. "Sismik izolatörler ile depreme dayanıklı yapı tasarımı." Yüksek Lisans Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği, Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Zhang, Cheng, Wenxue Zhang, Lijun Su, Ying Chen, and Xiuli Du. 2023. "Theoretical and Experimental Analysis of a Winding Rope Fluid Viscous Damper." *Structural Control and Health Monitoring* 2023: 7307224. <https://doi.org/10.1155/2023/7307224>. <https://doi.org/10.1155/2023/7307224>.
- Zhang, Chunwei, and Amir Ali. 2021. "The advancement of seismic isolation and energy dissipation mechanisms based on friction." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 146: 106746. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106746>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0267726121001688>.
- Zhang, Wenxue, Cheng Zhang, Lijun Su, Yongrui Zheng, and Xiuli Du. 2023. "Experimental study on the dynamic performance of a winding rope fluid viscous damper." *Engineering Structures* 281: 115786. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.115786>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029623002006>.
- Zhang, Xiaofeng, and Harry Far. 2022. "Seismic behaviour of high-rise frame-core tube structures considering dynamic soil–structure interaction." *Bulletin of Earthquake Engineering* 20 (10): 5073-5105.
- Zogh, Peiman, Ramin Motamed, and Keri Ryan. 2021. "Empirical evaluation of kinematic soil-structure interaction effects in structures with large footprints

and embedment depths." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 149: 106893. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106893>.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0267726121003158>.

