



**ÇELİK-BETON KOMPOZİT TAŞIYICI
SİSTEMLERDE AKIŞKAN VİSKOZ SÖNÜMLEYİCİ
BAĞLANTILARIN SİSMİK PERFORMANSA ETKİSİ**

Ömer Faruk ÖZKAYA

**Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Muhammed GÜRBÜZ**

**2025
Her hakkı saklıdır.**



**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ÇELİK-BETON KOMPOZİT TAŞIYICI SİSTEMLERDE AKIŞKAN VİSKOZ
SÖNÜMLEYİCİ BAĞLANTILARIN SİSMİK PERFORMANSA ETKİSİ**

Ömer Faruk ÖZKAYA

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Muhammed GÜRBÜZ

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Erzurum

2025

Her hakkı saklıdır

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

**ÇELİK-BETON KOMPOZİT TAŞIYICI SİSTEMLERDE AKIŞKAN VİSKOZ
SÖNÜMLEYİCİ BAĞLANTILARIN SİSMİK PERFORMANSA ETKİSİ**

Dr. Öğr. Üyesi Muhammed GÜRBÜZ danışmanlığında, Ömer Faruk ÖZKAYA tarafından hazırlanan bu çalışma 26 / 05 / 2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **Oy birliği ile (3/3)** kabul edilmiştir.

Başkan	: Prof. Dr. Oğuz Akın DÜZGÜN	İmza	:
Üye	: Prof. Dr. İlker KAZAZ	İmza	:
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Muhammed GÜRBÜZ	İmza	:

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum

Doç. Dr. Bünyamin ÖZGERİŞ
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması tarafından nolu proje ile desteklenmiştir.

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

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

26 / 05 / 2025

Ömer Faruk ÖZKAYA

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÇELİK-BETON KOMPOZİT TAŞIYICI SİSTEMLERDE AKIŞKAN VİSKOZ SÖNÜMLEYİCİ BAĞLANTILARIN SİSMİK PERFORMANSA ETKİSİ

Ömer Faruk ÖZKAYA

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Muhammed GÜRBÜZ

Bu tez çalışmasında, çelik-beton kompozit taşıyıcı sistemlerle entegre edilen akışkan viskoz sönümleyici (Fluid Viscous Dampers-FVD) sistemlerinin sismik performans üzerindeki etkileri araştırılmıştır. FVD'ler, yüksek yapılarda deprem enerjisinin disipline edilmesini sağlayarak taşıyıcı sistemin davranışını iyileştiren pasif sismik kontrol mekanizmalarıdır.

Analiz kapsamında, yüksek bina sınıfında yer alan bir yapı modeli üzerinde Geleneksel Taşıyıcı Sistem (GTS) ile yedi farklı Zenginleştirilmiş Taşıyıcı Sistem (ZTS) varyantı değerlendirilmiştir. FVD'lerin farklı yerleşim konfigürasyonlarının kat ötelemeleri, görelî deplasmanlar, kesme kuvvetleri, moment dağılımları ve enerji sönüm miktarları üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Hesaplamalar TBDY-2018 ve ÇYTHYE-2016 esas alınarak, lineer statik, modal ve zaman tanım alanı analizleriyle gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, FVD sistemlerinin özellikle “chevron” tipi çerçeve yerleşimlerinde yatay deplasmanları azalttığını, iç kuvvet dağılımlarını dengelediğini ve sönüm performansını artırdığını göstermiştir. Ayrıca, mimari uyumluluk ve maliyet etkinliği açısından da değerlendirmeler yapılmış; öneriler kısmında gelecekteki çalışmalar için çıkarımlara yer verilmiştir.

Bu çalışma, FVD sistemlerinin çelik-beton kompozit taşıyıcı sistemlerde tasarım entegrasyonuna yönelik mühendislik pratiğine katkı sağlamayı hedeflemektedir.

2025, 226 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Çelik-Beton Kompozit Taşıyıcı Sistemler, Akışkan Viskoz Sönümleyici Sistemler (FVD), Sismik Performans, Geleneksel Taşıyıcı Sistemler (GTS), Zenginleştirilmiş Taşıyıcı Sistemler (ZTS), Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı, Dirençli Kentsel Alanlar

ABSTRACT

MS. Thesis

THE EFFECT OF FLUID VISCOUS DAMPER CONNECTIONS ON THE SEISMIC PERFORMANCE OF STEEL-CONCRETE COMPOSITE STRUCTURAL SYSTEMS

Ömer Faruk ÖZKAYA

Erzurum Technical University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Muhammed GÜRBÜZ

In this thesis study, the seismic performance of fluid viscous dampers (FVD), integrated into steel–concrete composite structural systems, has been investigated. FVDs are passive seismic control mechanisms that improve the behavior of structural systems by dissipating seismic energy, particularly in high-rise buildings.

Within the scope of the analysis, a building model classified as a high-rise structure was evaluated using both a Conventional Structural System (GTS) and seven different Enhanced Structural System (ZTS) variants. The effects of various FVD placement configurations on story displacements, interstory drifts, shear forces, moment distributions, and energy dissipation capacities were comparatively analyzed. The analyses were conducted using linear static, modal, and time history analysis methods in accordance with the Turkish Building Earthquake Code (TBDY-2018) and the Steel Structures Design, Calculation and Construction Regulation (ÇYTHYE-2016). The results indicate that FVD systems, particularly when integrated into “chevron” type bracing frames, significantly reduce lateral displacements, balance internal force distributions, and enhance overall damping performance. Additionally, design evaluations were carried out in terms of architectural compatibility and cost efficiency. The concluding section offers recommendations and inferences for future studies.

This study aims to contribute to engineering practice regarding the design integration of FVD systems into steel-concrete composite structural systems.

2025, 226 page

Keywords: Steel-Concrete Composite Structural Systems, Fluid Viscous Dampers (FVD), Seismic Performance, Conventional Structural Systems (GTS), Enhanced Structural Systems (ZTS), Earthquake-Resistant Design, Resilient Urban Areas

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının her aşamasında bilgi, tecrübe ve akademik rehberliğiyle yolumu aydınlatan, sabırla yönlendiren ve kıymetli katkılarını esirgemeyen danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Muhammed GÜRBÜZ'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Kendisinin bilimsel yaklaşımı ve yapıcı eleştirileri, bu çalışmanın şekillenmesinde büyük rol oynamıştır.

Ayrıca, lisansüstü eğitim sürecim boyunca bilgi birikimleri ve destekleriyle akademik gelişimime katkı sağlayan Erzurum Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nün tüm değerli öğretim üyelerine ve idari personeline teşekkür ederim.

Hayatım boyunca yanımda olan, bana inanan ve her koşulda destek veren aileme, özellikle zorluklarla dolu bu süreçte sabırları, anlayışları ve sevgileriyle gücümün kaynağı oldukları için şükranlarımı sunuyorum.

Son olarak, lisansüstü eğitimim süresince birlikte çalıştığım, düşünsel katkı sağlayan, akademik dayanışma ve moral desteği gösteren tüm arkadaşlarıma ve meslektaşlarıma gönülden teşekkür ederim.

Ömer Faruk ÖZKAYA

Mayıs 2025

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Araştırmanın Amacı	2
1.2. Çelik-Beton Kompozit Taşıyıcı Sistemlerin Önemi	3
1.3. Akışkan Viskoz Sönümleyici Bağlantıların Sismik Performansa Etkisi	4
2. KAYNAK ÖZETLERİ	6
2.1. Taşıyıcı Sistemler ve Tasarım İlkeleri	6
2.1.1. Taşıyıcı Sistem Düzensizlikleri	8
2.1.2. Taşıyıcı Sistem Çeşitleri	14
2.2. Çelik - Beton Kompozit Taşıyıcı Sistemler	17
2.2.1. Kompozit Kolonlar.....	19
2.2.2. Kompozit Kirişler.....	20
2.2.3. Kompozit Döşemeler	22
2.2.4. Kompozit Perdeler	23
2.2.5. Karma Taşıyıcı Sistemler	25
2.2.6. Çelik - Beton Kompozit Taşıyıcı Sistemlerin Hesap ve Tasarım İlkeleri.....	26
2.3. Taşıyıcı Sistemlerde Sismik Kontrol Mekanizmaları	33
2.3.1. Aktif - Yarı Aktif ve Hibrit Kontrol Mekanizmaları	38
2.3.1.1. Aktif Kütle Sönümleyici Sistemler (AMD - Active Mass Dampers)	40
2.3.1.2. Aktif Ayarlı Kütle Sönümleyiciler (ATMD - Active Tuned Mass Dampers) ...	41
2.3.1.3. Aktif Tendon Sistemler (ATS - Active Tendon Systems)	42
2.3.1.4. Aktif Rijitlik Değiştirici Sistemler (ASCS - Active Stiffness Control System).43	
2.3.1.5. Manyetoreolojik Sönümleyiciler (MR - Magnetorheological Dampers).....	44

2.3.1.6. Değişken Rijitlikli ve Sönümlemeli Sistemler (VSDS - Variable Stiffness and Damping Systems)	45
2.3.1.7. Değişken Orifisli Hidrolik Sönümleyiciler (VOFD - Variable Orifice Fluid Dampers)	45
2.3.1.8. Akıllı Malzemeli Sistemler (SMS - Smart Material Systems).....	46
2.3.1.9. Hibrit Kütle Sönümleyiciler (HTMD - Hybrid Tuned Mass Dampers).....	46
2.3.1.10. Hibrit Manyetoreolojik Sönümleyiciler (HMRD - Hybrid M. Dampers).....	48
2.3.2. Pasif Kontrol Mekanizmaları	49
2.3.2.1. Düşük Sönümlü Kauçuk Mesnetler (LDRB - Low Damping Rubber Bearings)	49
2.3.2.2. Yüksek Sönümlü Kauçuk Mesnetler (HDRB - High Damping Rubber Bearings)	51
2.3.2.3. Kurşun Çekirdekli Kauçuk Mesnetler (LRB - Lead Rubber Bearings).....	53
2.3.2.4. Sürtünmeli Sarkaç Mesnetler (FPB - Friction Pendulum Bearings).....	55
2.3.2.5. Elastik Sürtünmeli Mesnetler (R-FBB - Resilient-Friction Base Bearings)	57
2.3.2.6. Metalik Sönümleyiciler (MD - Metallic Dampers).....	61
2.3.2.7. Sürtünmeli Sönümleyiciler (FD - Friction Dampers)	62
2.3.2.8. Visko-Elastik Sönümleyiciler (VED - Visco-Elastic Dampers)	64
2.3.2.9. Ayarlı Kütle Sönümleyiciler (TMD - Tuned Mass Dampers)	65
2.3.2.10. Ayarlı Sıvı Sönümleyiciler (LTD - Tuned Liquid Dampers).....	66
2.3.2.11. Akışkan Viskoz Sönümleyiciler (FVD - Fluid Viscous Dampers).....	68
2.3.3 Sismik Kontrol Mekanizmalarının Hesap Ve Tasarım İlkeleri.....	99
2.4. Yapı Dinamiği ve Analiz Yöntemleri	103
2.4.1. Lineer Statik Analiz (Linear Static Analysis)	104
2.4.2. Nonlineer Statik Analiz (Pushover-Nonlinear Static Analysis).....	105
2.4.3. Aşamalı İnşaat Analizi (Nonlinear Staged Construction Analysis).....	106
2.4.4. Modal Analiz (Modal Analysis)	107
2.4.5. Tepki Spektrumu Analizi (Response Spektral Analysis).....	108
2.4.6. Zaman Tanım Alanında Analiz (Time History Analysis).....	111
2.4.7. Burkulma Analizi (Buckling Analysis).....	114
2.4.8. Hiperstatik Analiz (Hyperstatic Analysis)	115
2.5. Kaynak Özetleri	116
3. MATERYAL ve YÖNTEM	138
3.1. Materyal	138

3.1.1. Yapı Kat Yerleşiminin Fonksiyonel Organizasyonu ve Detayları.....	139
3.1.2. Taşıyıcı Sistem Özellikleri ve Malzeme Sınıfları	139
3.1.3. Taşıyıcı Sistem Yük Bileşenleri ve Değerleri	146
3.2. Yöntem.....	147
3.2.1. FVD Bağlantılarının Özellikleri ve Tanımlanması	150
3.2.2. Analiz Yöntemleri ve Bilgi Girişleri.....	153
3.2.3. FVD Bağlantılarının Konfigürasyon Çeşitleri	162
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	167
4.1. Kat Yer Değiştirme Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	172
4.2. Göreli Kat Ötelemeleri Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	176
4.3. Kat Kesme Kuvvetleri Sonuçlarının Değerlendirilmesi	181
4.4. Kat Moment Kuvvetleri Sonuçlarının Değerlendirilmesi	185
4.5. Enerji Sönüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi	190
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	195
5.1. Sonuçlar	195
5.1.1. Çelik-Beton Kompozit Taşıyıcı Sistemlerin Sismik Yükler Etkisinde Davranışının Değerlendirilmesi.....	196
5.1.2. Akışkan Viskoz Sönümleyici Sistemlerin Yerleşim Konfigürasyonlarının Yapı Mühendisliği Açısından Değerlendirilmesi	199
5.1.3. Çelik-Beton Kompozit Taşıyıcı Sistemlerde Akışkan Viskoz Sönümleyicilerin Sismik Performans Üzerindeki Etkileri	207
5.2. Öneriler	210
5.2.1. Depreme Dayanıklı Yapıların Tasarım Süreçlerinde Sismik Kontrol Mekanizmalarının Önemi ve Entegrasyonu.....	212
5.2.2. Akışkan Viskoz Sönümleyici (FVD) Sistemlerinin Gelecekteki Uygulama ve Araştırma Alanları.....	215
5.2.3. Çelik-Beton Kompozit Taşıyıcı Sistemlerde Akışkan Viskoz Sönümleyici Sistemlerinin Uygulanması	218
KAYNAKLAR	221

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Açıklama

A	Herhangi bir katta, döşeme toplam alanı
A_b	Herhangi bir katta, döşeme boşluk alanları toplamı
A_c	Beton Enkesit Alanı
A_g	Kompozit Elemanın Toplam Enkesit Alanı
a	Kolonlarda Etriye Kollarının ve/veya Çirozlar Arasındaki Yatay Uzaklık
a_x, a_y	Kat düzleminde iki doğrultudaki çıkıntı uzunlukları
α	Sönümleyici Etki Hız Üssü Katsayısı
A_{sh}	Enine Donatı Alanı (dikdörtgen kesit)
A_s	Boyuna Donatı Alanı
A_{sr}	Boyuna Donatı Alanı Toplamı
$\sum A_e$	Herhangi bir katta, göz önüne alınan deprem doğrultusunda etkili kesme alanı
$\sum A_g$	Herhangi bir katta, göz önüne alınan deprem doğrultusuna paralel doğrultuda perde olarak çalışan taşıyıcı sistem elemanlarının en kesit alanlarının toplamı
$\sum A_k$	Herhangi bir katta, göz önüne alınan deprem doğrultusuna paralel kârgir dolgu duvar alanlarının (kapı ve pencere boşlukları hariç) toplamı
$\sum A_w$	Herhangi bir katta, kolon en kesiti etkin gövde alanlarının toplamı
b_k	Kolon enkesitinde en dıştaki enine donatı eksenleri arasındaki uzaklık
BYS	Bina Yükseklik Sınıfları
C	Sönümleme Katsayısı
C	Gerçek Sönümleme Katsayısı
C_{cr}	Kritik Sönümleme Katsayısı
D	Dayanım Fazlalığı Katsayısı
E_d	Deprem Etkisi
F	Sönümleme Kuvveti
F_y	Yapısal Çelik Elemanların Karakteristik Akma Dayanımı

F_{ysr}	Beton Çeliğinin Karakteristik Akma Dayanımı
f_{ck}	Betonun Karakteristik Basınç Dayanımları
f_{ywk}	Enine Donatının Karakteristik Akma Dayanımı
G	Sabit Yük
Γ_k	Etkin Modal Kütle Oranı
h_i	Binanın i'inci katının kat yüksekliği
k	Yapı Rijitlik Katsayısı
λ_{hd}	Süneklik düzeyi yüksek elemanlar için enkesit koşulu sınır değeri
L_x, L_y	Kat düzleminin iki doğrultudaki (x, y) toplam uzunlukları
m	Yapı Kütlesi
N_{dm}	Basın Kuvvetlerinin Maksimum Değeri
P_{no}	Kompozit Kolon Enkesitinin Eksenel Basınç Kuvveti Dayanımı
Q	Hareketli Yük
R	Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı
ρ_{sr}	Boyuna Donatı Oranı
S	Kar Yüğü
s	Kompozit kolonlarda enine donatı aralığı
t	Zaman
$\Delta_i^{(X)}_{max}$	Binanın i'inci katındaki maksimum azaltılmış görelî kat ötelemesi
$\Delta_i^{(X)}_{min}$	Binanın i'inci katındaki minimum azaltılmış görelî kat ötelemesi
$\Delta_i^{(X)}_{ort}$	Binanın i'inci katındaki ortalama azaltılmış görelî kat ötelemesi
V	Sönümleyici Etki Hızı
V_0	Sönümleyici Maksimum Hızı
ω	Etki Frekansı
ω_n	Doğal Dairesel Frekans
ξ	Sönüm Oranı
ξ_{eff}	Etkin Sönüm Oranı
Φ_k	Mod Şeklinin Deplasman Vektörü
η_{bi}	i'inci katta tanımlanan Burulma Düzensizliği Katsayısı
η_{ci}	i'inci katta tanımlanan Dayanım Düzensizliği Katsayısı
η_{ki}	i'inci katta tanımlanan Rijitlik Düzensizliği Katsayısı

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
TBDY-2018	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği - 2018
ÇYTHYE-2016	Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik - 2016
TS-498	Yapı Elemanlarının Boyutlandırılmasında Alınacak Yüklerin Hesap Değerleri
AMD	Aktif Kütle Sönümleyici Sistemler
ASCS	Aktif Rijitlik Değiştirici Sistemler
ATMD	Aktif Ayarlı Kütle Sönümleyici Sistemler
ATS	Aktif Tendon Sistemler
FD	Sürtünmeli Sönümleyiciler
FPB	Sürtünmeli Sarkaç Mesnetler
FVD	Akışkan Viskoz Sönümleyiciler
GTS	Geleneksel Taşıyıcı Sistemler
HDRB	Yüksek Sönümlü Kauçuk Mesnetler
HMRD	Hibrit Manyetoreolojik Sönümleyiciler
HTMD	Hibrit Kütle Sönümleyiciler
LDRB	Düşük Sönümlü Mesnetler
LRB	Kurşun Çekirdekli Kauçuk Mesnetler
LTD	Ayarlı Sıvı Sönümleyiciler
MD	Metalik Sönümleyiciler
MR	Manyetoreolojik Sönümleyiciler
R-FBB	Elastik Sürtünmeli Mesnetler
SKM	Sismik Kontrol Mekanizmaları
SMS	Akıllı Malzemeli Sistemler
TMD	Ayarlı Kütle Sönümleyiciler
VED	Visko-Elastik Sönümleyiciler
VOFD	Değişken Orifisli Hidrolik Sönümleyiciler
VSDS	Değişken Rijitlikli ve Sönümlemeli Sistemler
ZTS	Zenginleştirilmiş Taşıyıcı Sistemler

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Burulma Düzensizliği Düzlem Detayı (A1)	9
Şekil 2.2. Döşeme Süreksizlikleri (A2.1)	9
Şekil 2.3. Döşeme Süreksizlikleri (A2.2)	10
Şekil 2.4. Döşeme Süreksizlikleri (A2.3)	10
Şekil 2.5. Döşeme Süreksizlikleri (A3)	11
Şekil 2.6. Taşıyıcı Sistemin Düşey Elemanlarının Süreksizliği (B3)	12
Şekil 2.7. Çelik-Beton Kompozit Taşıyıcı Sistemler (Örnek)	18
Şekil 2.8.1. Betonla Çevrelenmiş Kompozit Kolonlar	19
Şekil 2.8.2. Beton Dolgulu Kompozit Kolonlar	20
Şekil 2.9.1. Çelik Kompozit Kirişler (Geleneksel)	21
Şekil 2.9.2. Beton Dolgulu Kompozit Kiriş Kesitleri	21
Şekil 2.10.1. Geleneksel Kompozit Döşeme Kesiti (Çelik Trapez Saç Levhalı)	23
Şekil 2.10.2. Kompozit Döşeme Kesitleri	23
Şekil 2.11.1. Kompozit Perde Kesitleri (Çelik Levha Kullanımı)	24
Şekil 2.11.2. Kompozit Perdeler (Boru, Kutu veya H Kesitli Çelik Profil Kullanımı) ..	24
Şekil 2.12.1. Karma Taşıyıcı Sistemler (Yüksek Katlı Yapılar - Örnek)	25
Şekil 2.12.2. Karma Taşıyıcı Sistemler (Endüstriyel Yapılar - Örnek)	26
Şekil 2.13. Sismik Kontrol Mekanizmaları (Taban - Seviye) / Periyot – İvme Değişimi	34
Şekil 2.14. Sismik Kontrol Mekanizmaları (Sönümleyiciler) / Periyot - İvme Değişimi	35
Şekil 2.15. Başakşehir Çam ve Sakura Şehir Hastanesi / İstanbul	36
Şekil 2.16. 15 Temmuz Şehitler Köprüsü (Boğaziçi) Güçlendirme Projesi / İstanbul ...	37
Şekil 2.17. Aktif Kontrol Mekanizmalarının Çalışma İlkesi	40
Şekil 2.18. Aktif Kütle Sönümleyici Sistem Uygulaması (AMD) Taipei 101 / Tayvan	41
Şekil 2.19. Aktif Tendon Sistemleri Uygulaması (ATS) Normandiya Köprüsü / Fransa	43
Şekil 2.20. Hibrit Kütle Sönümleyicileri Uygulaması (HTMD) Şanghay Kulesi / Çin .	47
Şekil 2.21. Düşük Sönümlü Kauçuk Mesnetler (LDRB)	50
Şekil 2.22. Yüksek Sönümlü Kauçuk Mesnetler (HDRB).	52
Şekil 2.23. Kurşun Çekirdekli Kauçuk Mesnetler (LRB)	54

Şekil 2.24. Sürtünmeli Sarkaç Mesnetler (FPB).....	56
Şekil 2.25. Elastik Sürtünmeli Sarkaç Mesnetler (R-FBB)	58
Şekil 2.26. Metalik Sönümleyiciler (MD / ADAS - BSD)	62
Şekil 2.27. Sürtünmeli Sönümleyiciler (FD)	63
Şekil 2.28. Visko-Elastik Sönümleyiciler (VED).....	65
Şekil 2.29. Ayarlı Kütle Sönümleyiciler (TMD) - Şanghay Dünya Finans Merkezi / Çin	66
Şekil 2.30. Ayarlı Sıvı Sönümleyiciler (LTD) - Comcast Merkezi / ABD.....	68
Şekil 2.31. Akışkan Viskoz Sönümleyici (FVD) Bileşenleri	69
Şekil 2.32. Akışkan Viskoz Sönümleyici Kesiti - Geçiş Çubuklu.....	73
Şekil 2.33. Akışkan Viskoz Sönümleyicilerin α Değerlerine Göre Kuvvet - Hız ve Yer Değiştirme - Kuvvet Diyagramları.....	75
Şekil 2.34. Taylor Devices Firmasına Ait Akışkan Viskoz Sönümleyicilerin Standart Üretim Mekanik Özellikleri	78
Şekil 2.35. Taylor Devices Firmasına Ait Akışkan Viskoz Sönümleyicilerin Standart Üretim Bağlantı Plakalarının Mekanik Özellikleri	78
Şekil 2.36. Akışkan Viskoz Sönümleyicileri Tasarım Yöntemleri.....	80
Şekil 2.37. Akışkan Viskoz Sönümleyicileri Kompakt Tasarım	81
Şekil 2.38. Akışkan Viskoz Sönümleyicileri Değiştirilmiş Chevron Tasarım	82
Şekil 2.39. Akışkan Viskoz Sönümleyicileri Chevron Tasarım	83
Şekil 2.40. Akışkan Viskoz Sönümleyicileri Diyagonal Tasarım	83
Şekil 2.41. Akışkan Viskoz Sönümleyicileri Seviye (Temel) Yalıtımlı Tasarım.....	84
Şekil 2.42. Akışkan Viskoz Sönümleyicileri Toggle Tasarımı.....	85
Şekil 2.43. Akışkan Viskoz Sönümleyicileri Tackle Tasarımı	86
Şekil 2.44. Akışkan Viskoz Sönümleyicilerin Depreme Dayanıklı Binalar Uygulaması (San Miguel Mall / PERU).....	87
Şekil 2.45. Akışkan Viskoz Sönümleyicilerin Yüksek Katlı Yapılar Uygulaması (181 Fremont Tower / ABD).....	88
Şekil 2.46. Akışkan Viskoz Sönümleyicilerin Güçlendirme Uygulaması - Çelik Yapılar (651 Gateway Blvd. / ABD).....	89
Şekil 2.47. Akışkan Viskoz Sönümleyicilerin Güçlendirme Uygulaması - Betonarme Yapılar (555 Capitol Mall / ABD)	89
Şekil 2.48. Akışkan Viskoz Sönümleyicilerin Köprü Uygulaması (Vincent Thomas Bridge / ABD).....	90

Şekil 2.49. Akışkan Viskoz Sönümleyicilerin Köprü Uygulaması (Santiago Creek Bridge / ABD).....	90
Şekil 2.50. Akışkan Viskoz Sönümleyicilerin Endüstri Tesisler Uygulaması (Bayer Cell Culture Technology Center / ABD).....	91
Şekil 3.1. Yapı Perspektif Görünümü.....	140
Şekil 3.2. Normal Kat Planı (10. Kat).....	141
Şekil 3.3. Podyum Kat Planı (4. Kat).....	142
Şekil 3.4. Garaj Kat Planı (1. Kat).....	143
Şekil 3.5. Heliport Plan Görünümü.....	144
Şekil 3.6. Heliport Perspektif Görünümü	145
Şekil 3.7. Perde ve Merdiven Perspektif Görünümleri	145
Şekil 3.8. Benzeştirilmiş İvme Değerleri Eğrisi (X-Doğrultusu / SeismoMatch)	149
Şekil 3.9. FVD Bağlantılarının Tanımlanma Yöntemleri (Etabs)	151
Şekil 3.10.1. FVD-17170 Karakteristik Özellikleri Tanımlanması (1)	152
Şekil 3.10.2. FVD-17170 Karakteristik Özelliklerinin Tanımlanması (2)	152
Şekil 3.11. Sabit ve Hareketli Yüklerin Kütle Katılım Oranları.....	153
Şekil 3.12. İkinci Mertebe Etkilerinin Tanımlanması (P-Delta).....	153
Şekil 3.13.1. Eşdeğer Deprem Yüklerinin Tanımlanması (X-Doğrultusu, EQX)	154
Şekil 3.13.2. Eşdeğer Deprem Yüklerinin Tanımlanması (Y-Doğrultusu, EQY)	155
Şekil 3.14. Mod Birleştirme Yöntemi (Eigen).....	155
Şekil 3.15. DD-2 (Ölçeklendirilmiş) Spektrum Eğrileri (RS-H-1,25, RS-V-1,25)	156
Şekil 3.16.1. DD-2 (Ölçeklendirilmiş) Spektrum Eğrisi Analiz (X-Doğrultusu, EX)..	156
Şekil 3.16.2. DD-2 (Ölçeklendirilmiş) Spektrum Eğrisi Analiz (Y-Doğrultusu, EY)..	157
Şekil 3.16.3. DD-2 (Ölçeklendirilmiş) Spektrum Eğrisi Analiz (Z-Doğrultusu, EZ)...	157
Şekil 3.17. Mod Birleştirme Yöntemi (Ritz)	158
Şekil 3.18. Zaman Tanım Alanında Analiz (Başlangıç Tanımı, TH-D).....	159
Şekil 3.19. DD-1 (Benzeştirilmiş) İvme Eğrileri (Matching DD-1 / Acceleration).	159
Şekil 3.20. Zaman Tanım Alanında Analiz (XY-Doğrultusu, TH-XY)	160
Şekil 3.21. Mod Birleştirme Yöntemi (Eigen) / FVD Bağlantılarının Aktifleştirilmesi	161
Şekil 3.22. Mod Birleştirme Yöntemi (Ritz) / FVD Bağlantılarının Aktifleştirilmesi .	162
Şekil 3.23. ZTS (1) Tasarım Görünümü	163
Şekil 3.24. ZTS (2) Tasarım Görünümü	164
Şekil 3.25. ZTS (3) Tasarım Görünümü	164

Şekil 3.26. ZTS (4) Tasarım Görünümü	165
Şekil 3.27. ZTS (5) Tasarım Görünümü	165
Şekil 3.28. ZTS (6) Tasarım Görünümü	166
Şekil 3.29. ZTS (7) Tasarım Görünümü	166
Şekil 4.1. Betonarme Kolon-Kiriş Taşıma Kapasitesi Oranları (GTS, 1. Kat).....	168
Şekil 4.2. Kompozit Kolon-Kiriş Taşıma Kapasitesi Oranları (GTS, 6. Kat).	168
Şekil 4.3. Kompozit Döşeme-Kiriş Taşıma Kapasitesi Oranları (GTS, 20. Kat)	169
Şekil 4.4. Yer Değiştirme - Zaman Grafikleri (Node: 634, 638, 646-7, 673).....	170
Şekil 4.5. Kat Yer Değiştirmeleri Analiz Sonuç Grafikleri (TH-XY).....	175
Şekil 4.6. Göreli Kat Ötelemeleri Analiz Sonuç Grafikleri (TH-XY).....	179
Şekil 4.7. Kat Kesme Kuvvetleri Analiz Sonuç Grafikleri (TH-XY).....	184
Şekil 4.8. Kat Moment Kuvvetleri Analiz Sonuç Grafikleri (TH-XY)	189
Şekil 4.9. Enerji Sönüm Miktarları Analiz Sonuç Grafikleri (TH-XY)	194
Şekil 5.1. ZTS (6) / FVD Eksenel Kuvvet Diyagramı (TH-XY).....	206

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Yapı Kat Yerleşiminin Fonksiyonel Organizasyonu ve Detaylar	139
Çizelge 3.2. Taşıyıcı Sistem Özellikleri ve Malzeme Sınıfları.....	140
Çizelge 3.3. Kolon Kesitleri Ölçüleri ve Özellikleri.....	141
Çizelge 3.4. Kiriş Kesit Ölçüleri ve Özellikleri	142
Çizelge 3.5. Perde Kesit Ölçüleri ve Özellikleri.....	143
Çizelge 3.6. Döşeme Kesit Ölçüleri ve Özellikleri.....	144
Çizelge 3.7. Kiriş ve Döşeme Türlerinin Yük Değerleri	147
Çizelge 3.8. Mod Birleştirme Yöntemi Eigen / Ritz Mod Sayıları.....	161
Çizelge 4.1. Doğal Titreşim Periyod Değerleri (Ritz)	171

1. GİRİŞ

Günümüzde inşaat mühendisliği alanında yaşanan teknolojik ilerlemeler, yapı güvenliğini artırmaya yönelik yenilikçi tasarım yaklaşımlarının ve ileri düzey yapısal sistemlerin uygulanmasını önemli ölçüde yaygınlaştırmıştır. Artan nüfus, yoğun kentleşme ve yüksek yapılara duyulan ihtiyaç doğrultusunda, yapı sistemlerinin yalnızca taşıma kapasitesi değil, aynı zamanda sismik performansı da öncelikli değerlendirme kriteri hâline gelmiştir. Özellikle son yıllarda art arda yaşanan büyük depremler, yapıların sismik etkiler karşısındaki davranışının ne denli kritik olduğunu bir kez daha gündeme taşımıştır.

Nitekim 6 Şubat 2023 tarihinde Kahramanmaraş merkezli olarak meydana gelen ve 11 ilde büyük yıkıma neden olan depremler sonrasında gerçekleştirilen teknik incelemelerde; düşük malzeme kalitesi, yetersiz proje denetimi, uygulama hataları ve kamu-özel sektörde görev yapan teknik personelin mesleki bilgi eksiklikleri gibi çok sayıda yapım ve tasarım sorunu belgelenmiştir. Tüm bu bulgular, deprem güvenliğine sahip, sürdürülebilir ve performansa dayalı yapı sistemlerinin kullanılmasının artık bir seçenek değil, mühendislik açısından zorunlu bir gereklilik olduğunu açıkça göstermektedir.

Bu bağlamda, çelik-beton kompozit taşıyıcı sistemler, yapı mühendisliğinde giderek daha fazla tercih edilen çağdaş sistemlerden biri olarak öne çıkmaktadır. Bu sistemler, çeliğin sünekliği ile betonun basınç dayanımı gibi iki farklı malzemenin avantajlarını bir araya getirerek; daha hafif, daha dayanıklı ve yüksek enerji sönümleme kabiliyetine sahip yapı çözümleri sağlamaktadır. Gerek yüksek taşıma kapasiteleri gerekse rijitlik ve süneklik dengesine katkı sağlamaları sayesinde, deprem etkilerine karşı dirençli yapı tasarımında önemli bir mühendislik alternatifi oluşturmaktadırlar.

Ancak bu sistemlerin depreme karşı daha etkin hâle gelmesi için, yalnızca taşıyıcı elemanların boyutlandırılması yeterli olmamakta; yapının genel sismik davranışının kontrol altına alınmasına yönelik ilave önlemlerin de alınması gerekmektedir. Bu noktada, akışkan viskoz sönümleyiciler (Fluid Viscous Dampers-FVD) gibi pasif enerji sönümleyici sistemler, yapıya ek rijitlik kazandırmadan sismik enerjiyi disipline etme

yetenekleri sayesinde önemli avantajlar sağlamaktadır. Özellikle yüksek yapılarda ve düzensiz rijitlik dağılımı gösteren sistemlerde, FVD'lerin entegrasyonu yapı performansını önemli ölçüde artırabilmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında, ülkemizde henüz yaygınlaşmamış olan akışkan viskoz sönümleyicilerin çelik-beton kompozit sistemlerle entegre edildiği Zenginleştirilmiş Taşıyıcı Sistem (ZTS) varyantlarının, Geleneksel Taşıyıcı Sistem (GTS) ile karşılaştırmalı olarak performansları analiz edilecektir. İncelemeler, kat yer değiştirme miktarları, görelî kat ötelemeleri, kat kesme kuvvetleri, kat moment dağılımları ve enerji sönümleme kapasiteleri gibi sismik performans parametreleri üzerinden yürütülecek; elde edilen bulgular yapısal davranış açısından karşılaştırmalı olarak değerlendirilecektir.

Çalışma kapsamında yapılacak analizler, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018) ile Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik (ÇYTHYE-2016) esas alınarak gerçekleştirilecektir. Böylece hem yönetmeliklerin öngördüğü güvenlik kriterlerine uygun hem de performansa dayalı çağdaş tasarım anlayışına hizmet eden sonuçlara ulaşılması hedeflenmektedir. Elde edilen veriler ışığında, FVD sistemlerinin yüksek yapılarda uygulanabilirliği, yapısal katkısı ve mühendislik pratiğine entegrasyonu değerlendirilecek; bu doğrultuda yapı mühendisliği literatürüne ve sektörel uygulamalara katkı sağlanacaktır.

1.1. Araştırmanın Amacı

Bu çalışmanın temel amacı, çelik-beton kompozit taşıyıcı sistemlerle entegre edilen akışkan viskoz sönümleyici bağlantıların sismik performans üzerindeki etkilerini belirlemek ve bu etkiyi çok yönlü bir biçimde analiz etmektir. Özellikle deprem etkilerine karşı yapıların dayanıklılığını artırma potansiyeli taşıyan bu sistemlerin mühendislik uygulamaları açısından değerlendirilmesi, çalışmanın odak noktasını oluşturmaktadır.

Bu doğrultuda gerçekleştirilen kapsamlı yapı analizleri ışığında, akışkan viskoz sönümleyicilerin yapıların sismik performansına sağladığı olumlu katkılar açık ve somut bir şekilde gösterilecektir. Söz konusu analizler, yalnızca teorik verilerle sınırlı kalmayıp,

pratik mühendislik uygulamalarında da kullanılabilecek yenilikçi çözüm önerilerinin geliştirilmesine olanak tanıyacaktır. Böylece, bu alandaki bilgi birikimi daha da zenginleştirilecek ve gelecekteki projelere rehberlik edecek nitelikte olacaktır.

Çalışma sonucunda elde edilecek bulgular, gelecekte meydana gelmesi muhtemel sismik olaylara karşı daha dayanıklı, güvenli ve uzun ömürlü yapıların inşa edilmesi yönünde önemli katkılar sağlayacaktır. Ayrıca, mevcut sismik tasarım kriterlerinin gözden geçirilmesi ve güncellenmesi açısından da değerli bir kaynak oluşturması hedeflenmektedir.

1.2. Çelik-Beton Kompozit Taşıyıcı Sistemlerin Önemi

Çelik-beton kompozit taşıyıcı sistemler, yüksek taşıma kapasiteleri ile birlikte, hafif yapı elemanları ve üstün dayanıklılık özellikleri sayesinde çağdaş yapı teknolojileri içerisinde öne çıkan sistemler arasında yer almaktadır. Bu yenilikçi sistemler, özellikle deprem tehlikesinin yüksek olduğu bölgelerde, güvenli ve dayanıklı yapıların inşası açısından kritik bir rol oynamaktadır. Depremlerin potansiyel yıkıcı etkileri göz önüne alındığında, çelik-beton kompozit yapıların sismik dayanımının artırılması, mühendislik uygulamaları açısından kaçınılmaz bir zorunluluk hâline gelmiştir.

Bu bağlamda, çelik-beton kompozit sistemlerin sismik performansını etkileyen parametrelerin belirlenmesi ve bu parametrelerin kapsamlı analizlere tabi tutulması hem yapı güvenliğinin sağlanması hem de ulusal ve uluslararası tasarım standartlarına uygun mühendislik çözümlerinin geliştirilmesi açısından büyük önem arz etmektedir. Söz konusu analizler, mühendis ve mimarların dayanıklı, sürdürülebilir ve ekonomik yapılar tasarlamalarına olanak sağlamakta; aynı zamanda toplumların güvenli yapılaşma gereksinimlerine etkin bir şekilde yanıt verilmesine katkı sağlamaktadır.

Teknolojik gelişmelerle birlikte, bu sistemlerin sağladığı avantajlar daha da belirginleşmekte; özellikle gelişmiş sismik analiz yöntemlerinin uygulanmasıyla yapısal performansın artırılması mümkün olmaktadır. Bu iyileştirmeler, yalnızca yapıların güvenlik seviyesini yükseltmekle kalmamakta, aynı zamanda inşaat mühendisliğine duyulan güveni de pekiştirmektedir.

Sonuç olarak, çelik-beton kompozit sistemlerin kullanımı, modern yapı teknolojilerinin vazgeçilmez bir parçası olmaya devam etmektedir. Bu çerçevede, disiplinler arası iş birliği, yeni yapı malzemelerinin geliştirilmesi ve bu malzemelerin uygulama alanlarının genişletilmesi gibi konular da önem kazanmaktadır. Böylece, bu sistemlerin etkinliği artırılarak, daha ileri düzeyde mühendislik çözümlerine ulaşılması mümkün olmaktadır.

Ayrıca, sürdürülebilir mimari yaklaşımlar ile çelik-beton kompozit sistemlerin bir araya getirilmesi, çevresel etkilerin azaltılmasına katkı sağlamakta ve ekonomik yönden daha verimli yapıların inşasını teşvik etmektedir. Bununla birlikte, mevcut inşaat uygulamalarının sürekli olarak gözden geçirilmesi ve güncellenmesi gerekliliği de göz ardı edilmemelidir. Bu nedenle, çelik-beton kompozit sistemlerin sürekli araştırma ve geliştirme süreçlerine entegre edilmesi, yapı güvenliği ve performansının artırılması açısından stratejik bir gerekliliktir.

Tüm bu değerlendirmeler ışığında, çelik-beton kompozit sistemlerin hem günümüz inşaat sektöründe hem de gelecekteki yapı projelerinde kilit bir rol üstlenmeye devam edeceği açıktır.

1.3. Akışkan Viskoz Sönümleyici Bağlantıların Sismik Performansa Etkisi

Akışkan viskoz sönümleyiciler (Fluid Viscous Dampers – FVD), yüksek yapılar, köprüler ve çeşitli mühendislik yapılarında, özellikle çelik, betonarme ve çelik-beton kompozit taşıyıcı sistemlerde etkin bir sismik kontrol elemanı olarak kullanılmaktadır. Bu sistemler, deprem sırasında yapıya etkiyen enerjiyi sönümleyerek yapıların sismik performansını artırmakta ve yapısal güvenliğe önemli katkılar sağlamaktadır.

FVD'ler, dinamik etkileri azaltma kapasitesi sayesinde yapıların dayanım, süneklik ve kullanım sürekliliği gibi özelliklerini geliştirmekte; performansa dayalı tasarım anlayışının gereksinimlerini karşılamaya yönelik etkili çözümler sağlamaktadır. Bu yönüyle FVD sistemleri, yalnızca uygulama düzeyinde değil, aynı zamanda kuramsal tasarım yaklaşımlarının da gelişmesine katkı sağlamaktadır.

1. GİRİŞ

Bu tez kapsamında, elik-beton kompozit sistemlerde kullanılan FVD bağlantılarının sismik performansa etkileri, farklı varyantlar üzerinden karřılařtırılmalđ olarak incelenecektir. Elde edilen analiz sonuçları, FVD uygulamalarının yapının genel davranışına olan katkılarını sayısal verilerle ortaya çıkaracak; sistemin mühendislik tasarımlarına entegrasyon potansiyeli değerlendirilecektir.

Çalışma, yapı mühendisliği alanında sismik tasarıma yönelik güncel yaklaşımların geliştirilmesine katkı sağlamayı hedeflemekte; güvenli, sürdürülebilir ve yüksek performanslı yapıların tasarımı için FVD sistemlerinin taşıdığı önemi teknik temellerle göstermeyi amaçlamaktadır.



2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1. Taşıyıcı Sistemler ve Tasarım İlkeleri

Taşıyıcı sistemler; yapının kendi ağırlığı ile birlikte sabit ve hareketli kullanım yüklerini, deprem, rüzgâr vb. doğal etkilerden kaynaklanan tekrarlı yükleri ve aynı zamanda diğer çevresel etkilerden kaynaklanan yükleri güvenli bir şekilde zemine aktarmak için kullanılan yapı elemanlarının ve bu elemanlar arasındaki bağlantıların oluşturduğu bütünsel sistemlerdir.

Depreme dayanıklı yapı tasarımı, taşıyıcı sistemin belirli prensiplere uygun olarak düzenlenmesini gerektirir. Bu ilkeler, yapının hem güvenliğini hem de ekonomik ve verimli bir şekilde tasarlanmasını sağlar. Birbirleriyle doğrudan veya dolaylı olarak bağlantılı olan bu ilkeler, yapı sisteminin bütünsel olarak değerlendirilmesini zorunlu kılar. Özellikle rijitlik, stabilite ve dayanım gibi kavramlar iç içe geçmiş olup, yapısal tasarımın temelini oluşturur. Doğangün (2024), sağlam ve güvenli yapı tasarımı için aşağıdaki ilkelerin her yapıda sağlanması gerektiğini belirtmiştir.

Yapı taşıyıcı sistemlerinin deprem etkilerine karşı ayakta kalabilmesi için vazgeçilmez nitelikte olan ve her yapıda mutlaka sağlanması gereken ilkeler;

- 1. Yeterli Dayanım:** Yapının taşıyıcı sistemi, deprem kuvvetlerine karşı yeterli direnci gösterecek şekilde tasarlanmalıdır. Malzeme seçimi ve kesit boyutları, yapının güvenliğini sağlayacak düzeyde olmalıdır.
- 2. Yeterli Rijitlik:** Yapının aşırı şekil değiştirmesini önlemek için taşıyıcı sistemin yeterli rijitliğe sahip olması gerekir. Rijitliği sağlamak, deprem sırasında konforu artırır ve yapının bütünlüğünü korur.
- 3. Yeterli Kararlılık:** Yapının genel stabilitesini sağlamak için taşıyıcı sistemin devrilme, burkulma veya göçme gibi olumsuz durumlara karşı dirençli olması gereklidir.

Yapıların daha ekonomik ve enerji tüketimini azaltacak şekilde tasarlanabilmesi için dikkat edilmesi gereken ilkeler;

4. **Yeterli Süneklik:** Deprem enerjisinin bir kısmını yapısal deformasyonlarla sönümleyebilmek için taşıyıcı sistemin sünek davranış sergilemesi gerekir. Sünek tasarım, kırılğan göçmelerin önüne geçerek yapıya ek bir güvenlik sağlar.
5. **Yeterli Uyum (Fazla-Bağlılık):** Yapının taşıyıcı elemanları, birbirleriyle uyumlu çalışarak yükleri güvenli bir şekilde aktarabilmelidir. Alternatif yük aktarım yolları içeren fazla-bağlı sistemler, olası yerel hasarların yayılmasını önler.
6. **Yeterli Sönüm:** Deprem sırasında oluşan enerjinin bir kısmının, yapı tarafından sönümlenmesi gerekmektedir. Yapısal sönümleme, titreşimleri azaltarak daha kontrollü bir deprem davranışı sağlar.

Yapı taşıyıcı sisteminin deprem etkilerini öngörülebilir hale getirmesi ve yük aktarımını güvenli bir şekilde gerçekleştirmesi için aşağıdaki ilkeler göz önünde bulundurulmalıdır;

7. **Sadelik ve Anlaşılabilirlik:** Yapının taşıyıcı sistemi, karmaşık olmaktan kaçınılarak, sade ve açık bir düzen içinde tasarlanmalıdır. Böylece deprem davranışı daha kolay analiz edilebilir.
8. **Düzenlilik ve Simetri:** Taşıyıcı sistemin düzenli ve simetrik olması, deprem yüklerinin yapı üzerinde dengeli dağılmasını sağlar. Düzensiz plan ve kesitler, kritik noktalarda aşırı gerilmeler oluşturarak riski artırabilir.

Son olarak, çoğu zaman göz ardı edilen ancak deprem güvenliği açısından oldukça önemli olan döşemeler için de şu ilke göz önünde bulundurulmalıdır;

9. **Döşemelerin Yatay Rijitliği ve Dayanımı:** Döşemeler, yatay yükleri düşey taşıyıcılara güvenle aktarabilecek rijitlikte ve dayanımda tasarlanmalıdır. Döşeme

diyaframlarının etkili çalışması, taşıyıcı sistemin bütünlüğünü koruyarak stabiliteyi artırır.

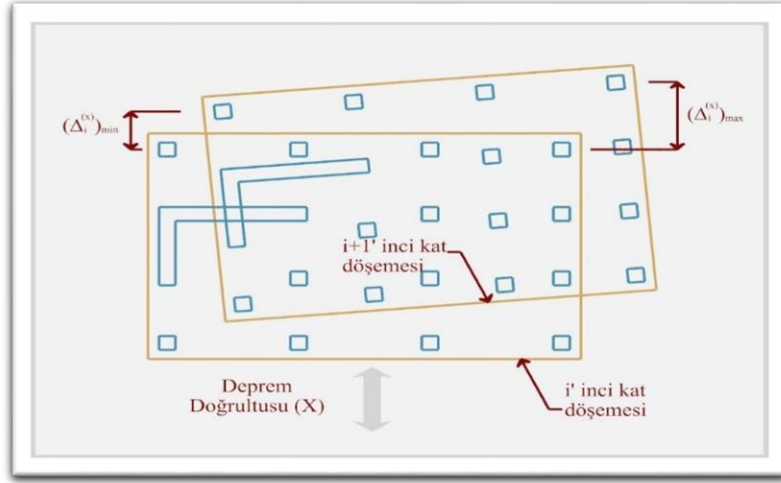
Bu ilkeler, deprem etkisi altında yapının güvenli ve dayanıklı bir şekilde tasarlanmasını sağlayarak, can ve mal kaybını en aza indirmeyi amaçlar. Bu nedenle yapı tasarım sürecinde, her bir prensibin dikkatlice değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır.

2.1.1. Taşıyıcı Sistem Düzensizlikleri

Yapı tasarım sürecinde, deprem kuvvetlerinin yapıya etkisini en aza indirmek için düzensizliklerden kaçınılmalıdır. Düzensiz taşıyıcı sistemler, yük aktarımında düzensiz stres dağılımına neden olarak yapının belirli bölgelerinde aşırı gerilmeler ve deformasyonlar oluşturabilir. Bu durum, yapının deprem performansını olumsuz etkileyerek beklenenden daha büyük hasarlara yol açabilir. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği - 2018 (TBDY-2018)' e göre düzensizlikler, plan düzlemi içerisinde ve taşıyıcı sistem düşey doğrultusunda olmak üzere iki grup altında aşağıda açıklanmıştır.

A. Planda Düzensizlik Durumları

A1. Burulma Düzensizliği: Herhangi bir yapının belirli bir katında, birbirine dik iki deprem doğrultusundan herhangi biri için en büyük görelî kat ötelemesinin ($\Delta_i(X)_{\max}$), aynı doğrultudaki ortalama görelî kat ötelemesine ($\Delta_i(X)_{\text{ort}}$) oranı burulma düzensizliği katsayısı (η_{bi}) olarak tanımlanır. Eğer bu oran 1,2'den büyük ise ilgili katta burulma düzensizliği olduğu kabul edilir. Hesaplamalar sırasında yapı üzerindeki burulma etkilerinin daha doğru değerlendirilebilmesi için $\pm\%5$ ek dış merkezlik etkileri de göz önünde bulundurulmalıdır.

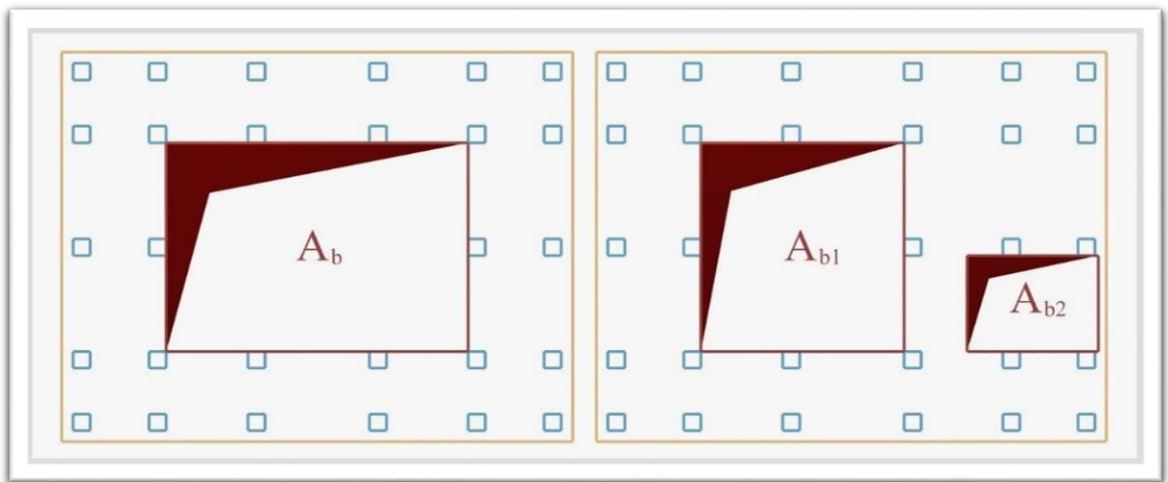


Şekil 2.1. Burulma Düzensizliği Düzlem Detayı (A1)

Kat döşemelerinin kendi düzlemlerinde rijit diyafram olarak çalıştığı kabul edilerek; $(\Delta_i^{(X)})_{ort} = 1/2 [(\Delta_i^{(X)})_{max} + (\Delta_i^{(X)})_{min}]$ $\eta_{bi} = (\Delta_i^{(X)})_{max} / \Delta_i^{(X)}_{ort} > 1,2$ (2.1)

A2. Döşeme Süreksizlikleri: Herhangi bir yapının belirli bir katındaki döşemesinde;

A2.1. Merdiven ve asansör boşlukları ile birlikte tüm boşluk alanları toplamının (A_b) kat toplam alanının (A) 1/3'ünden fazla olması durumu,

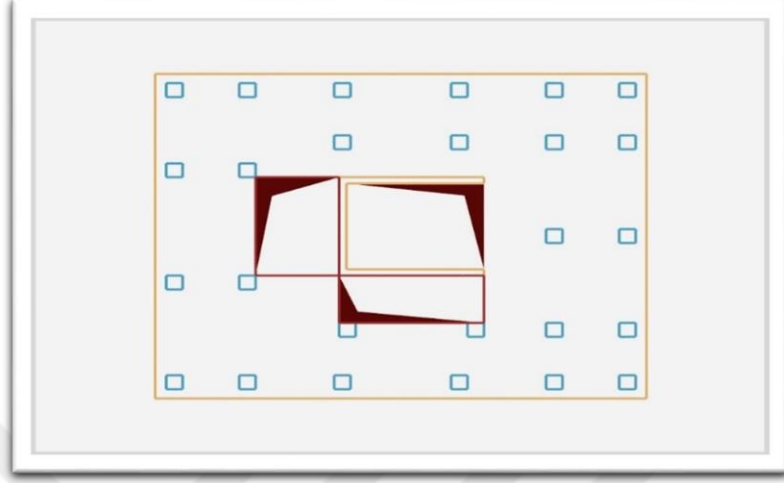


Şekil 2.2. Döşeme Süreksizlikleri (A2.1.)

$$A_b = A_{b1} + A_{b2} \quad A_b / A > 1/3 \quad (2.2)$$

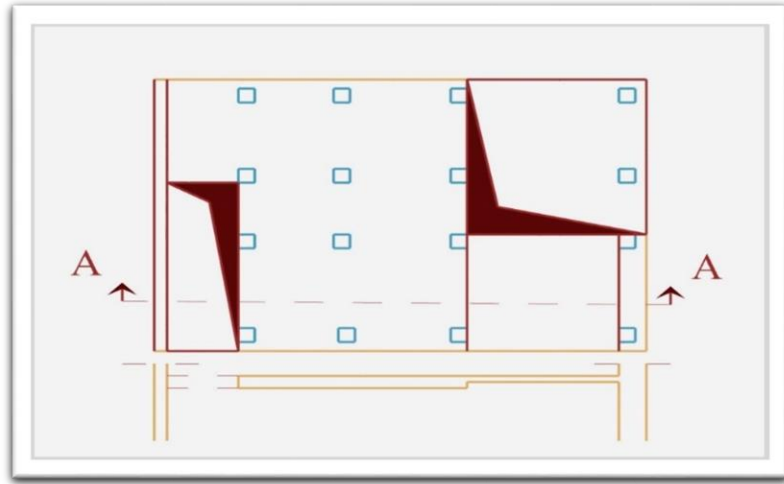
2. KAYNAK ÖZETLERİ

A2.2. Deprem etkilerinin düşey taşıyıcı yapı elemanlarına emniyetli bir şekilde iletilmesini güçleştiren kısmi döşeme boşluklarının bulunması durumu,



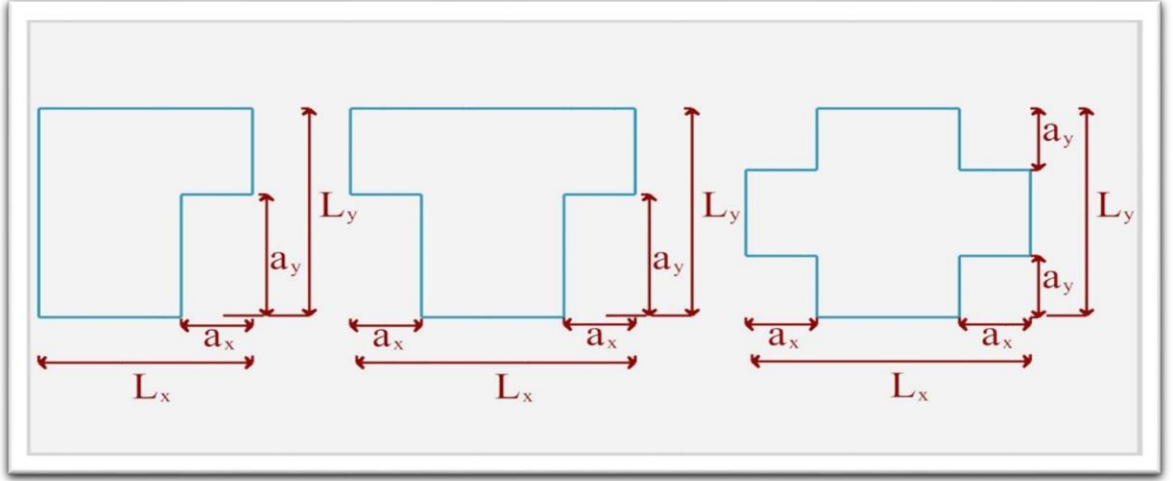
Şekil 2.3. Döşeme Süreksizlikleri (A2.2.)

A2.3. Döşemenin kendi düzlemi içerisinde rijitlik ve dayanımında ani kayıpların olması durumu,



Şekil 2.4. Döşeme Süreksizlikleri (A2.3.)

A3. Planda Çıkıntılar Bulunması: Yapı kat düzlemlerinde çıkıntı yapan bölümlerin birbirine dik iki doğrultudaki uzunluklarının her ikisinin de (a_x, a_y) , o kat düzleminin aynı doğrultulardaki toplam plan uzunluklarının (L_x, L_y) %20'sinden daha fazla olması durumu,



Şekil 2.5. Döşeme Süreksizlikleri (A3)

$$a_x > 0,2 L_x \quad a_y > 0,2 L_y \quad (2.3)$$

B. Düşeyde Düzensizlik Durumları

B1. Komşu Katlar Arası Dayanım Düzensizliği (Zayıf Kat): Herhangi bir betonarme yapının belirli bir katında, birbirine dik iki deprem doğrultusundan herhangi biri için toplam etkili kesme alanının, bir üst kattaki toplam etkili kesme alanına oranı dayanım düzensizliği katsayısı (η_{ci}) olarak tanımlanır. Eğer bu oran 0,80'den küçük ise ilgili katta dayanım düzensizliği olduğu kabul edilir. Hesaplamalar sırasında yapının katlar arası ani dayanım değişimlerinin neden olabileceği olumsuz etkiler göz önünde bulundurularak düşey taşıyıcı sistemin katlar arasındaki kesme dayanımı sürekliliği dikkatle değerlendirilmelidir.

Herhangi bir katta göz önüne alınan deprem doğrultusundaki toplam etkili kesme alanı ($\sum A_e$);

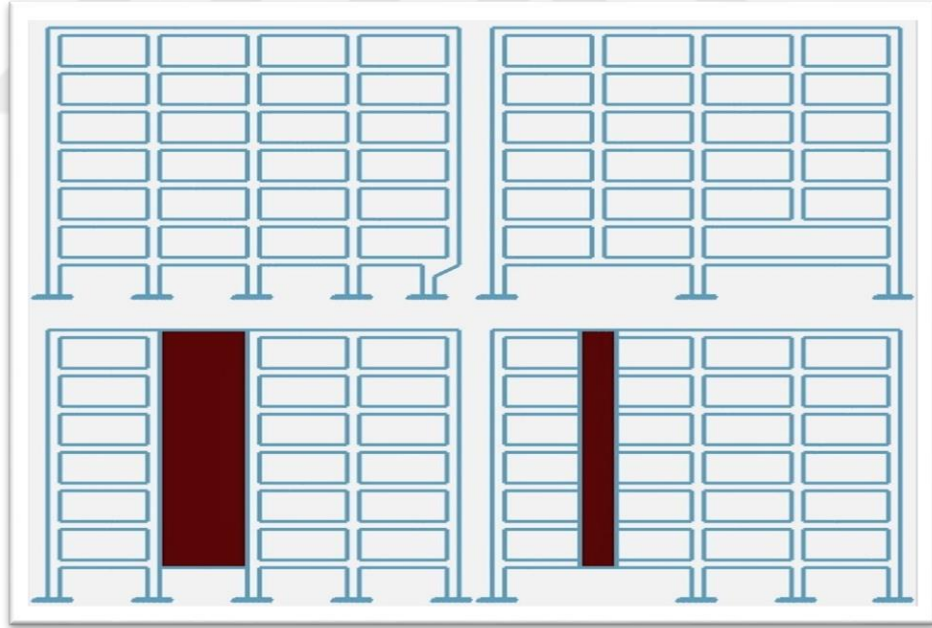
$$(\sum A_e)_i = (\sum A_w)_i + (\sum A_g)_i + (0,15 \sum A_k)_i \quad \eta_{ci} = (\sum A_e)_i / (\sum A_e)_{i+1} < 0,8 \quad (2.4)$$

B2. Komşu Katlar Arası Rijitlik Düzensizliği (Yumuşak Kat): Herhangi bir yapının bodrum katlar hariç belirli bir katında, birbirine dik iki deprem doğrultusundan herhangi biri için ortalama göreceli kat ötelemesi oranının, bir üst veya bir alt kattaki ortalama göreceli kat ötelemesi oranına bölünmesi Rijitlik Düzensizliği Katsayısı (η_{ki})

olarak tanımlanır. Eğer bu oran 2,0'den büyük ise ilgili katta rijitlik düzensizliği olduğu kabul edilir. Hesaplamalar sırasında yapı üzerindeki dayanım düzensizliği etkilerinin daha doğru tespit edilebilmesi için $\pm\%5$ ek dış merkezlik etkilerinin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

$$\eta_{ki} = (\Delta_i^{(X)} / h_i)_{ort} / (\Delta_{i+1}^{(X)} / h_{i+1})_{ort} > 2,0 \quad \eta_{ki} = (\Delta_i^{(X)} / h_i)_{ort} / (\Delta_{i-1}^{(X)} / h_{i-1})_{ort} > 2,0 \quad (2.5)$$

B3. Taşıyıcı Sistemin Düşey Elemanlarının Süreksizliği: Herhangi bir yapının bazı katlarda kolon veya perde gibi düşey taşıyıcı elemanlarının kaldırılarak üst kat döşemesinin yalnızca kirişler veya guseli kolonlar aracılığıyla taşınması, ya da üst kattaki perdelerin doğrudan alt kattaki kolonlara oturtulması durumu olarak tanımlanır. Bu tür düzenlemeler, yapıda ani rijitlik ve dayanım değişimlerine yol açarak deprem yüklerinin güvenli bir şekilde aktarılmasını zorlaştırabilir ve kritik taşıyıcı elemanlarda aşırı gerilme oluşumuna neden olabilir.



Şekil 2.6. Taşıyıcı Sistemin Düşey Elemanlarının Süreksizliği (B3)

Taşıyıcı sistemlerde hem plan hem de düşey doğrultuda anlatılan düzensizlikler, yapı hesap yöntemleri açısından oldukça önemlidir. Bu nedenle yapı mühendislerinin tasarım süreçlerinde dikkat etmesi gereken kurallar aşağıda belirtilmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

➤ Deprem hesap yönteminin belirlenmesinde A1 ve B2 türü düzensizlikler etkili olmaktadır.

➤ A2 ve A3 türü düzensizliklere sahip binalarda, kat döşemelerinin yatay düzlemde rijit diyafram gibi davranarak deprem yüklerini düşey taşıyıcı elemanlara güvenle aktarabildiğinin kanıtlanması gerekmektedir. Bu amaçla, yapı modeli oluşturulurken kat döşemeleri iki boyutlu levha (membran) veya kabuk sonlu elemanlar kullanılarak analiz edilmelidir.

➤ B1 türü düzensizlik içeren binalarda, i'inci kattaki toplam dolgu duvar alanı bir üst kata kıyasla daha fazla ise, bu durumda η_{ci} katsayısının hesaplanmasında dolgu duvarlar dikkate alınmayacaktır. En düşük η_{ci} değerinin bulunduğu kat göz önüne alındığında, $0,60 \leq (\eta_{ci})_{min} < 0,80$ ise, taşıyıcı sistem davranış katsayısı $1,25(\eta_{ci})_{min}$ değeri ile çarpılarak, her iki deprem doğrultusunda tüm bina için uygulanacaktır. Ancak, hiçbir koşulda $(\eta_{ci}) < 0,60$ olmayacaktır. Eğer bu sınırın altına düşülüyorsa, zayıf katın rijitliği ve dayanımı artırılarak deprem hesabının yeniden yapılması gerekmektedir.

➤ B3 türü düzensizlik içeren binalar için aşağıdaki koşullar geçerlidir:

✓ Yapıda herhangi bir kat seviyesinde kolonların konsol kirişlerin veya alttaki kolonlarda oluşturulan guselerin üzerine veya uç noktalarına oturtulmasına kesinlikle izin verilmez.

✓ Eğer bir kolon her iki ucundan mesnetli bir kiriş üzerine oturuyorsa, düşey deprem hesabı yapılması yeterli olacaktır.

✓ Üst katlarda yer alan perdelerin doğrudan alt kattaki kolonlara oturtulmasına hiçbir şekilde izin verilmez.

✓ Perdelerin herhangi bir katta, kendi düzlemi içinde açıklık ortasında kirişlerin üzerine oturtulması kesinlikle yasaktır.

2.1.2. Taşıyıcı Sistem Çeşitleri

2018-Türk Bina Deprem Yönetmeliği'ne göre Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı (R), Dayanım Fazlalığı Katsayısı (D) ve İzin Verilen Bina Yükseklik Sınıfları (BYS) göre aşağıda belirtildiği gibi özetlenebilir.

A. Yerinde Dökme Betonarme Bina Taşıyıcı Sistemleri

A1. Süneklik Düzeyi Yüksek Taşıyıcı Sistemler

- A11. Moment aktaran betonarme çerçeveler
- A12. Bağ kirişli (boşluklu) betonarme perdeler
- A13. Boşluksuz betonarme perdeler
- A14. Çerçeveler + bağ kirişli (boşluklu) perdeler
- A15. Çerçeveler + boşluksuz perdeler
- A16. Tek katlı, 12 m'yi aşmayan mafsallı kolon sistemleri

A2. Süneklik Düzeyi Karma Taşıyıcı Sistemler

- A21. Sınırlı sünek çerçeveler + bağ kirişli (boşluklu) perdeler
- A22. Sınırlı sünek çerçeveler + boşluksuz perdeler
- A23. Sınırlı sünek dolgulu/dolgunsuz tek doğrultulu döşemeli çerçeveler + bağ kirişli (boşluklu) perdeler
- A24. Sınırlı sünek dolgulu/dolgunsuz tek doğrultulu döşemeli çerçeveler + boşluksuz perdeler

A3. Süneklik Düzeyi Sınırlı Taşıyıcı Sistemler

- A31. Sınırlı sünek çerçeveler
- A32. Sınırlı sünek boşluksuz perdeler
- A33. Sınırlı sünek çerçeveler + sınırlı sünek boşluksuz perdeler

B. Ön Üretimli (Prefabrik) Betonarme Sistemler

B1. Süneklik Düzeyi Yüksek Taşıyıcı Sistemler

- B11. Moment aktaran önüretimli çerçeveler
- B12. Önüretimli çerçeveler + bağ kirişli (boşluklu) perdeler
- B13. Önüretimli çerçeveler + boşluksuz perdeler
- B14. Mafsallı önüretimli çerçeveler + boşluksuz veya bağ kirişli (boşluklu) perdeler
- B15. Tek katlı, 12 m'yi aşmayan mafsallı kolon sistemleri

B2. Süneklik Düzeyi Karma Taşıyıcı Sistemler

- B21. Sınırlı sünek önüretimli çerçeveler + bağ kirişli (boşluklu) veya boşluksuz perdeler

B3. Süneklik Düzeyi Sınırlı Taşıyıcı Sistemler

- B31. Sınırlı sünek önüretimli çerçeveler
- B32. Sınırlı sünek önüretimli çerçeveler + yerinde dökme sınırlı sünek boşluksuz perdeler
- B33. Önüretimli betonarme düşey çift cidarlı paneller
- B34. Önüretimli betonarme düşey tek cidarlı paneller

C. Çelik Bina Taşıyıcı Sistemleri

C1. Süneklik Düzeyi Yüksek Taşıyıcı Sistemler

- C11. Moment aktaran çelik çerçeveler
- C12. Dışmerkez veya burkulması önlenmiş merkezi çaprazlı çelik çerçeveler
- C13. Merkezi çaprazlı çelik çerçeveler
- C14. Çelik çerçeveler + dışmerkez veya burkulması önlenmiş merkezi çaprazlı çelik çerçeveler veya bağ kirişli (boşluklu) betonarme perdeler

2. KAYNAK ÖZETLERİ

- C15. Çelik çerçeveler + merkezi çaprazlı çelik çerçeveler veya boşluksuz betonarme perdeler
- C16. Tek katlı, 12 m'yi aşmayan mafsallı çelik kolon sistemleri

C2. Süneklik Düzeyi Karma Taşıyıcı Sistemler

- C21. Sınırlı sünek çelik çerçeveler + dışmerkez veya burkulması önlenmiş merkezi çaprazlı çelik çerçeveler veya bağ kirişli (boşluklu) betonarme perdeler
- C22. Sınırlı sünek çelik çerçeveler + merkezi çaprazlı çelik çerçeveler veya boşluksuz betonarme perdeler

C3. Süneklik Düzeyi Sınırlı Taşıyıcı Sistemler

- C31. Sınırlı sünek çelik çerçeveler
- C32. Sınırlı sünek merkezi çaprazlı çelik çerçeveler
- C33. Sınırlı sünek çelik çerçeveler + sınırlı sünek merkezi çaprazlı çelik çerçeveler

D. Hafif Çelik Bina Taşıyıcı Sistemleri

D1. Süneklik Düzeyi Yüksek: Vidalı, bulonlu sac, OSB / kontrplak duvar pan.

D2. Süneklik Düzeyi Sınırlı: Alçı levhalar içeren kaplamalı veya çaprazlı pan.

E. Yığma Bina Taşıyıcı Sistemleri

F. Ahşap Bina Taşıyıcı Sistemleri

2.2. Çelik - Beton Kompozit Taşıyıcı Sistemler

Çelik-beton kompozit taşıyıcı sistemler; çeliğin yüksek çekme dayanımı ile betonun yüksek basınç dayanımını bir araya getirerek yapı elemanlarının daha rijit, sünek ve dayanıklı çalışmasını sağlayan modern bir yapı sistemidir.

Bu sistemler, farklı malzemelerin en iyi özelliklerini bir araya getirerek yüksek mukavemet, süneklik ve uzun ömürlülük sağlamaktadır. Çeliğin yüksek çekme dayanımı ve sünekliği ile betonun yüksek basınç dayanımı ve yangına karşı koruyucu özellikleri birleştirildiğinde, mühendislik açısından dengeli, kararlı ve güçlü yapıların oluşumunu sağlamaktadır.

Kompozit taşıyıcı sistemlerin en büyük avantajlarından biri, malzemelerin birlikte çalışmasını sağlayarak yapısal verimliliği artırmasıdır. Geleneksel çelik ve betonarme yapılar belirli avantajlara sahip olsa da her biri tek başına bazı sınırlamalar içermektedir. Betonarme sistemler, ağır olmaları nedeniyle daha fazla deprem kuvvetine maruz kalırken, çelik yapılar yüksek süneklikleri nedeniyle daha büyük yer değiştirmelere sebep olabilmektedir. Bu bağlamda; çelik-beton kompozit sistemler, bu iki malzemenin güçlü yönlerini birleştirerek daha dengeli ve optimize edilmiş bir taşıyıcı sistem oluşturur. Böylece, daha küçük kesitlerle daha yüksek taşıma kapasitesi elde edilerek malzeme ekonomisi sağlarken, yapının genel rijitliği ve sünekliği artırılmaktadır.

Kompozit yapı sistemlerinin bir diğer önemli özelliği, yangına karşı dayanıklılığı artırmasıdır. Çelik elemanlar yüksek sıcaklıklara doğrudan maruz kaldıklarında mekanik özelliklerini kaybedebilirken, beton ile kaplanmaları durumunda bu risk önemli ölçüde azaltılmaktadır. Yangın dayanımı gerektiren yapılarda kompozit sistemlerin tercih edilmesi hem yapısal bütünlüğü koruma açısından hem de ek yalıtım maliyetlerini düşürme noktasında avantaj sağlamaktadır. Bunun yanı sıra, iç mekân düzenlemelerinde çelik elemanların duvarlar içine gömülebilmesi, daha düzgün ve geniş iç mekânların oluşturulmasını mümkün kılmaktadır. Bu özellik, özellikle ticari binalar, ofis yapıları ve büyük ölçekli projelerde daha esnek tasarım olanakları sağlamaktadır.



Şekil 2.7. Çelik-Beton Kompozit Taşıyıcı Sistemler (Örnek)

İnşaat yapım süreçlerinde sağladığı hız ve maliyet avantajı sayesinde kompozit sistemler, büyük ölçekli projelerde de giderek daha fazla tercih edilmektedir. Çelik elemanların ön üretimli olarak fabrikalarda hazırlanması, sahada montaj süresini önemli ölçüde kısaltmakta ve işçilik maliyetlerini azaltmaktadır. Böylece daha kısa sürede tamamlanan projeler, yatırım geri dönüş süresini kısaltarak ekonomik olarak da avantaj sağlamaktadır. Ayrıca, çelik malzemelerin geri dönüştürülebilir olması, çevresel sürdürülebilirlik açısından da önemli bir katkı sağlamaktadır.

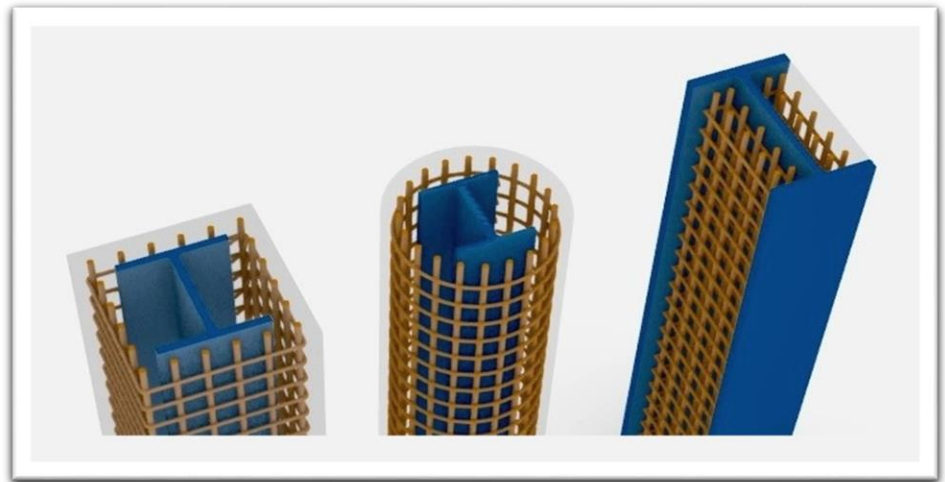
Yüksek katlı yapılar söz konusu olduğunda da taşıyıcı sistemin mukavemet ve rijitlik açısından daha güçlü olması gerekir. Bu tür yapılar için geleneksel yöntemlerde, çelik binalarda yüksek akma dayanımlı çelik profiller kullanılırken, betonarme binalarda daha yüksek dayanımlı beton ve büyük kesitli kolonlarla stabilite sağlanmaya çalışılır. Ancak sadece çelik çerçevelerin kullanıldığı sistemlerde, deprem yükleri altında meydana gelen göreceli kat ötelemelerinin sınırlandırılması zor olabilir. Bu noktada çelik ve betonun birlikte çalışmasını sağlayan kompozit sistemler, daha etkin ve verimli bir çözüm sunarak hem yüksek taşıma kapasitesi hem de optimum rijitlik sağlamaktadır. Özellikle merkezi ve dışmerkez çaprazlı çelik çerçevelerde, eksenel kuvvetlere karşı dayanım gerektiren

kolonların kompozit kesitlerle oluşturulması, deprem güvenliği açısından büyük bir avantaj sağlamaktadır. Bu sistemlerin sağladığı teknik ve ekonomik avantajlar, özellikle deprem riski yüksek bölgelerde ve yüksek yapılar inşa edilirken daha güvenli çözümler sunulmasını sağlamaktadır.

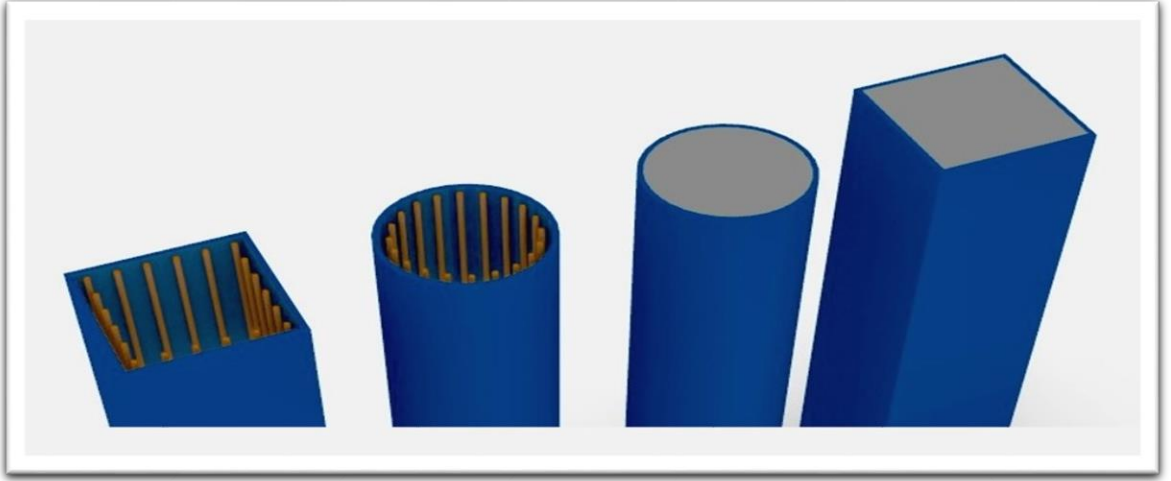
Geleneksel betonarme ve çelik yapılara kıyasla daha hafif, daha dayanıklı ve daha hızlı uygulanabilir olması, çelik-beton kompozit taşıyıcı sistemlerin gelecekte inşaat sektöründe daha yaygın hale gelmesini kaçınılmaz kılmaktadır. Deprem güvenliği, yangın direnci, maliyet verimliliği ve yapısal performans açısından sağladığı üstünlükler, bu sistemlerin mühendislik projelerinde tercih edilme oranını giderek artırmaktadır. Gelişen yapı teknolojileri ile birlikte, daha güvenli, ekonomik ve sürdürülebilir şehirler inşa etmek adına kompozit sistemlerin kullanımı, modern inşaat mühendisliğinde vazgeçilmez bir yapı çözümü olarak kabul edilmektedir.

2.2.1. Kompozit Kolonlar

Herhangi bir çelik profilinin etrafının tamamen veya kısmen betonla kaplanmasıyla oluşturulan betonla çevrelenmiş kompozit kolonlar ile boru veya kutu kesitli çelik profillerin içine beton doldurularak oluşturulan donatılı ya da donatısız beton dolgulu kompozit kolonlar olmak üzere uygulama yöntemlerine göre genel olarak iki çeşit kompozit kolon uygulaması bulunmaktadır.



Şekil 2.8.1. Betonla Çevrelenmiş Kompozit Kolonlar

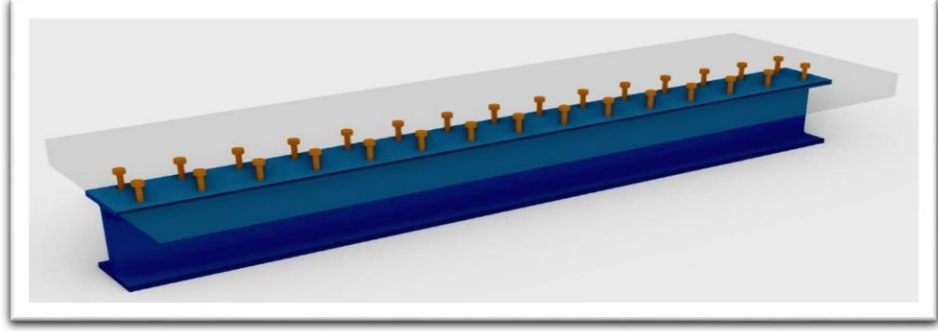


Şekil 2.8.2. Beton Dolgulu Kompozit Kolonlar

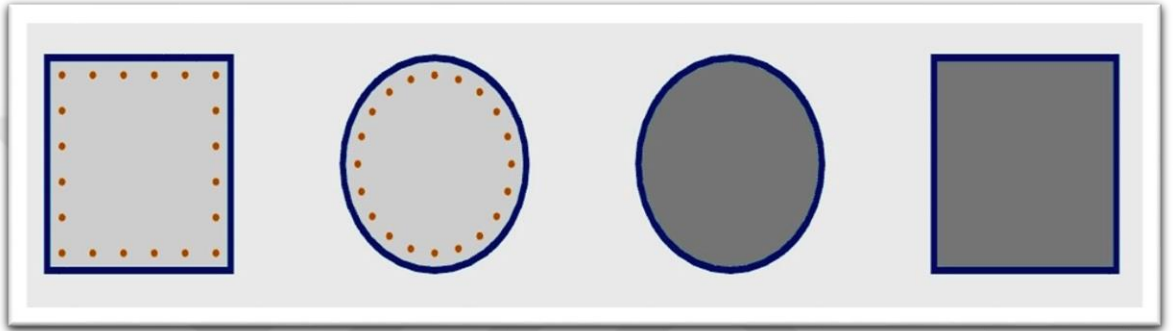
Ayrıca uygulama çeşitliliğine bağlı olarak, betonun kolon kesitinde tamamen veya kısmen yer alması, iç dolguda ilave donatı çubukları kullanılması ve çelik kesitlerin geometrik şekilleri gibi tasarım parametreleri, yapı mühendisleri tarafından tercih edilen farklı kompozit kolon uygulamalarının ortaya çıkmasını sağlamaktadır. Bu farklı uygulama türlerinde beton ve çeliğin birlikte etkin çalışmasını sağlayan aderans ve yük aktarımı gibi kritik unsurlar, kolonların yapısal performansını doğrudan belirleyen faktörlerdir.

2.2.2. Kompozit Kirişler

Herhangi bir çelik profilinin üzerine betonarme döşeme yerleştirilip bağlantı elemanları aracılığıyla birlikte çalışmasının sağlandığı betonarme döşemeli çelik kompozit kirişler ile boru veya kutu kesitli çelik profillerin içerisine beton doldurularak oluşturulan donatılı ya da donatısız beton dolgulu kompozit kirişler olmak üzere uygulama yöntemlerine göre genel olarak iki çeşit kompozit kiriş uygulaması bulunmaktadır. Ayrıca herhangi bir çelik profilinin etrafının tamamen veya kısmen betonla kaplanmasıyla oluşan betonla çevrelenmiş kompozit kiriş uygulamaları da yapı mühendisleri tarafından tercih edilirler.



Şekil 2.9.1. Çelik Kompozit Kirişler (Geleneksel)



Şekil 2.9.2. Beton Dolgulu Kompozit Kiriş Kesitleri

Kompozit kiriş uygulamalarında karşılaşılan önemli zorluklardan biri, yükler altında betonarme döşeme ve çelik kirişin ortak çalışmasını sağlamak amacıyla özel bağlantı elemanlarına ihtiyaç duyulmasıdır. Bu bağlantılar, kirişlerin yapısal davranışını doğrudan belirleyen kritik unsurlar olup betonarme döşeme ve çelik kiriş arasındaki kesme kuvvetlerinin etkin biçimde aktarılması da bu bağlantı elemanlarının kapasitesiyle ilişkilidir. Bu nedenle de söz konusu kapasiteye bağlı olarak tam kompozit davranış veya kısmi kompozit davranış olmak üzere iki farklı kompozit çalışma biçimi meydana gelir.

Çelik-beton kompozit yapı elemanlarında kesme kuvveti aktarımı için günümüzde en yaygın kullanım şekli olarak kesme çivisi adı verilen bağlantı elemanları kullanılır. Bu elemanlar, kompozit kirişte beton ve çelik arasında aderansı sağlar. Kesme çivilerine alternatif olarak daha üstün mekanik özelliklere sahip U-profil mekanik bağlantı elemanları da kullanılabilmektedir.

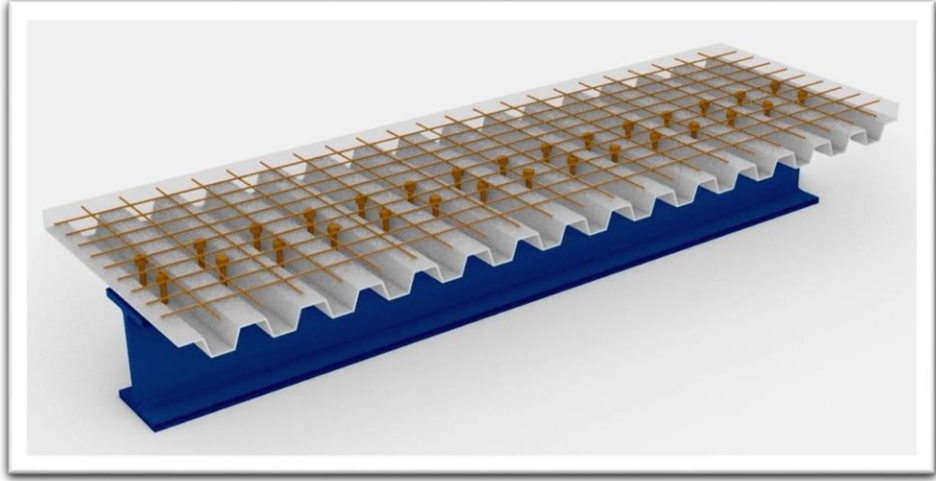
2.2.3. Kompozit Döşemeler

Kompozit döşeme sistemleri arasında tercih edilen en yaygın uygulama yöntemi, çelik trapez sac levhaların kullanıldığı geleneksel kompozit döşeme sistemidir. Bu yöntemde çelik kirişlerin üzerine yerleştirilen ve trapez formu verilmiş çelik sac levhaların üzerine beton dökülerek döşeme oluşturulmaktadır. Sac levhaların trapez formunda şekillendirilmesindeki amaç, çelik sac ile betonarme plak arasında aderansı artırmak, betonun yatay düzlemde kaymasını engellemek ve betonun, çelik sac düzlemine dik yönde ayrılma veya kalkma riskini ortadan kaldırmaktır. Ayrıca trapez saclar, kalıcı kalıp görevi görerek döşeme donatısının bir kısmını da karşılayabilmektedir.

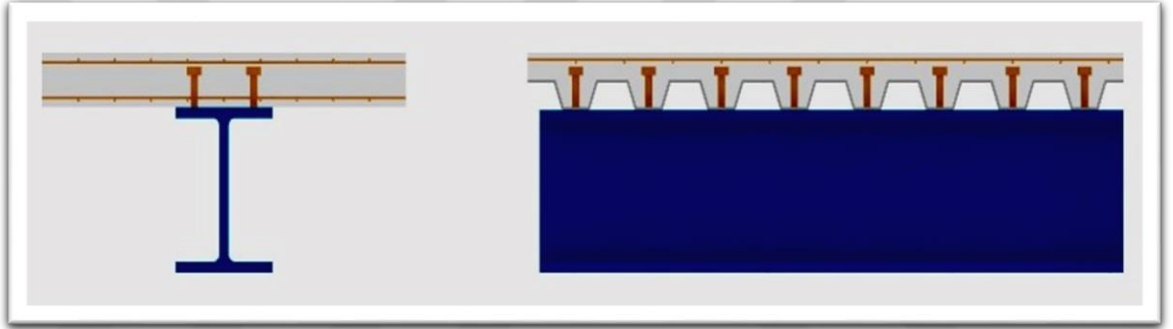
Betonarme ve çelik elemanların yükler altında birlikte çalışmalarını sağlayabilmek için, kompozit kirişler ve kısmen kompozit kolonlarda olduğu gibi kayma bağlantı elemanları kullanılmaktadır. Bu bağlantılar genellikle çelik kirişler üzerine kaynaklanarak monte edilir ve betonun priz almasıyla birlikte beton ve çelik sacın birlikte çalışması sağlanır.

Kompozit taşıyıcı sistemlerde yaygın olarak kullanılan bir diğer yöntem ise ön üretimli döşeme plakları ile gerçekleştirilen uygulamalardır. Ön üretimli döşeme plakları diğer kompozit döşeme sistemlerine göre şantiye koşullarında hızlı montaj imkânı sağladığı için inşaat süresini belirgin ölçüde kısaltarak üretim verimliliği sağlar.

Çelik trapez sac kullanılmayan diğer bir kompozit döşeme yöntemi ise betonarme döşeme plakları ile gerçekleştirilen ve doğrudan çelik kirişlerin üzerine yerleştirildiği uygulamalardır. Bu uygulama yönteminde de çelik kirişler ile betonarme döşeme plaklarının birlikte çalışabilmesi için kayma kuvvetini aktaran kayma bağlantı elemanları kullanılır.



Şekil 2.10.1. Geleneksel Kompozit Döşeme Kesiti (Çelik Trapez Saç Levhalı)



Şekil 2.10.2 Kompozit Döşeme Kesitleri

2.2.4. Kompozit Perdeler

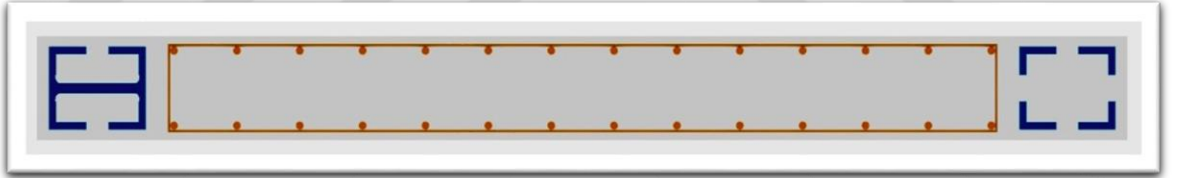
Yapı inşa süreçlerinde özellikle de betonarme yapıların imalat süreçlerinde en sık karşılaşılan problem, projelendirme esnasında donatı yerleşimlerinin sahada uygulanabilir olmayacak şekilde tasarlanmasıdır. Özellikle taşıyıcı elemanların kesit boyutlarının yetersiz olması, projedeki donatı çaplarının ve adetlerinin gerçek uygulamada birbirine uyumsuz olması gibi durumlar, yapım süreçlerinde ciddi sorunlara yol açmaktadır. Bu problemlerin önlenmesi için projelendirme aşamasında uygulama kolaylığı ve sahadaki gerçek koşulların göz önüne alınması, yapının taşıyıcı sistem türü, geometrisi veya kullanılan yapı malzemesine bakılmaksızın büyük önem taşımaktadır.

Uygulama zorlukları özellikle yüksek katlı betonarme yapılarda daha sık görülmektedir. Yüksek yapılarda deprem yükleri sebebiyle oluşan yüksek moment

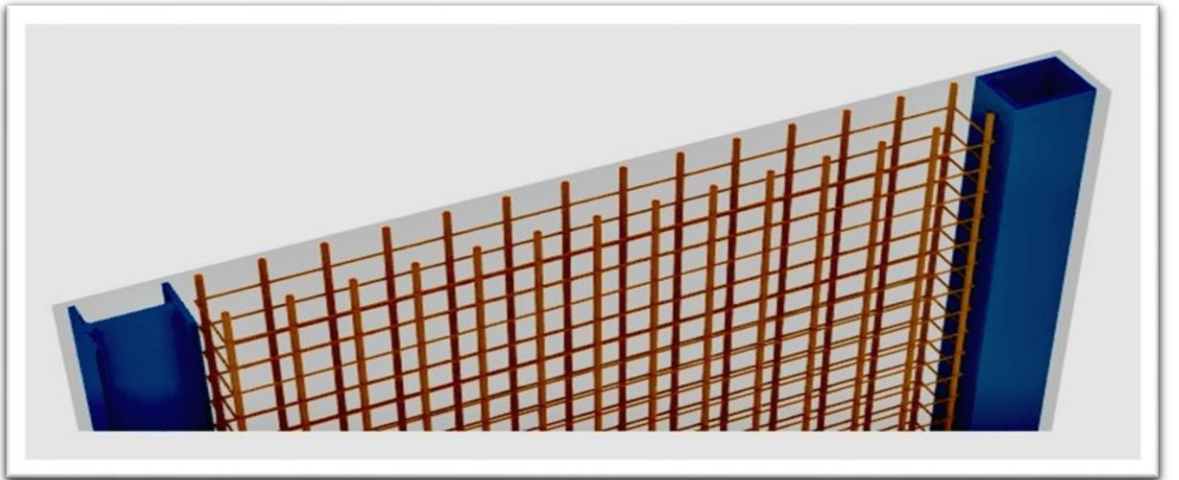
2. KAYNAK ÖZETLERİ

etkileri genellikle perde duvarlarla karşılanır. Perde elemanların uç bölgeleri, kolon benzeri davranış göstererek yapının deprem sırasında maruz kaldığı büyük moment ve normal kuvvetleri taşımada kritik bir rol oynar. Bu nedenle de söz konusu bölgelere fazla miktarda donatı yerleştirilmesi ihtiyacı oluşur ve imalat sırasında uygulama açısından büyük zorluklar oluşturur. Donatı yoğunluğunun yüksek olması betonun yerleşimini de güç hale getirir ve kesitte boşluklar oluşur. Bu durum betonun istenen mukavemete ulaşmasını engeller ve dayanım kayıplarına neden olur. Ayrıca yoğun donatı kullanımı, betonla donatı arasında aderans sorunlarını da beraberinde getirir. Bu bölgelere konulması gereken sık aralıklı enine donatı da uygulamayı iyice güçleştirir.

Bu sorunların önüne geçmek amacıyla, perde uç bölgelerinde klasik boyuna donatı yerine boru, kutu veya H kesitli çelik profiller kullanılması tercih edilebilmektedir. Ayrıca perde kesitlerinin çelik levhalarla çevrelenmesi veya perde uç bölgelerinde düşey donatı yerine çelik levhaların kullanılması gibi alternatif yöntemler de geliştirilmiştir. Böylelikle hem uygulama zorlukları azaltılmış olur hem de yapısal performans ve güvenlik artırılır.



Şekil 2.11.1. Kompozit Perde Kesitleri (Çelik Levha Kullanımı)



Şekil 2.11.2. Kompozit Perdeler (Boru, Kutu veya H Kesitli Çelik Profil Kullanımı)

2.2.5. Karma Taşıyıcı Sistemler

Karma taşıyıcı sistemler, çelik ve betonarme yapı elemanlarının uyumlu ve birbirini tamamlayıcı şekilde bir araya getirildiği yenilikçi mühendislik çözümleridir. Bu sistemlerin temel amacı, her iki malzemenin üstün yönlerinden eş zamanlı olarak faydalanmak ve böylece taşıyıcı sistemin dayanımını, performansını ve ekonomik verimliliğini optimize etmektir.

Çelik çerçeve ve betonarme çekirdek kombinasyonu, özellikle yüksek katlı binalarda, hem yatay yüklerin etkin bir biçimde taşınması hem de yapı davranışının kontrollü olması açısından tercih edilir. Çelik çerçevelerin hafifliği ve sünekliği sayesinde deprem ve rüzgâr gibi dinamik yükler altında esnek bir tepki sağlanırken, betonarme çekirdeklerin rijitliği ile yapının yanal deformasyonu ve titreşimleri azaltılır. Böylece kullanıcı konforu artırılır ve yapı güvenliği sağlanmış olur.



Şekil 2.12.1. Karma Taşıyıcı Sistemler (Yüksek Katlı Yapılar - Örnek)

Endüstriyel yapılarda sıkça tercih edilen çelik çatı sistemleri ile betonarme kolonların birlikte kullanımı ise geniş açıklıkların ekonomik ve fonksiyonel biçimde geçilmesine olanak tanır. Çelik çatılar, hafiflikleri ve hızlı montaj imkânları sayesinde büyük açıklıkları ekonomik olarak aşarken, betonarme kolonlar ise yapının stabilitesini artırır, yangın dayanımını sağlar ve uzun vadede bakım masraflarını minimize eder.



Şekil 2.12.2. Karma Taşıyıcı Sistemler (Endüstriyel Yapılar - Örnek)

2.2.6. Çelik - Beton Kompozit Taşıyıcı Sistemlerin Hesap ve Tasarım İlkeleri

Çelik-beton kompozit taşıyıcı sistem elemanlarının hesap ve tasarım ilkeleri, temel prensipler açısından benzerlik gösterse de, farklı ülkelerde yürürlükte olan yönetmeliklere göre değişiklikler içermektedir. Her ülke, kendi yapı dinamikleri, mühendislik yaklaşımları ve güvenlik kriterleri doğrultusunda kompozit sistemlerin hesap ve tasarım esaslarını belirlemiştir. Çelik-beton kompozit yapıların tasarımında kullanılan, gelişmiş bazı ülkelerde geçerli olan yönetmelikler aşağıda belirtilmiştir.

1- Amerika Birleşik Devletleri (USA)

- **AISC 360-22:2022** – Specification for Structural Steel Buildings
(Çelik Yapılar için Tasarım ve Uygulama Esasları Yönetmeliği)
- **AISC 341-22:2022** – Seismic Provisions for Structural Steel Buildings
(Çelik Yapılar için Deprem Tasarım Esasları Yönetmeliği)
- **ACI 318-19:2019** – Building Code Requirements for Structural Concrete
(Beton Yapılar için Yapı Yönetmeliği (ACI 318))
- **ASCE 7-22:2022** – Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures
(Binalar ve Diğer Yapılar için Minimum Tasarım Yükleri Yönetmeliği)
- **IBC:2021** – International Building Code
(Uluslararası Bina Yönetmeliği (IBC))

2- Avrupa Birliği Ülkeleri (European Norm)

- **EN 1994-1-1:2004 + A1:2015** – Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures – Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings
(Eurocode 4: Çelik-Beton Kompozit Yapıların Tasarım Kuralları)
- **EN 1992-1-1:2004 + A1:2014** – Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings
(Eurocode 2: Betonarme Yapıların Tasarım Kuralları)
- **EN 1993-1-1:2005 + A1:2014** – Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings
(Eurocode 3: Çelik Yapıların Tasarım Kuralları)
- **EN 1998-1:2004 + A1:2013** – Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance – Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings
(Eurocode 8: Depreme Dayanıklı Yapılar için Tasarım Kuralları)

3- Çin (China)

- **GB 50936:2014** – Code for Design of Composite Structures
(Çelik-Beton Kompozit Yapıların Tasarım Yönetmeliği (GB 50936))
- **GB 50010:2010** – Code for Design of Concrete Structures
(Betonarme Yapıların Tasarım Yönetmeliği (GB 50010))
- **GB 50017:2017** – Code for Design of Steel Structures
(Çelik Yapıların Tasarım Yönetmeliği (GB 50017))
- **GB 50011:2010** – Code for Seismic Design of Buildings
(Deprem Etkisi Altındaki Yapıların Tasarım Yönetmeliği (GB 50011))

4- Rusya (Russia)

- **SP 266.1325800:2016** – Composite Steel and Concrete Structures
(Çelik-Beton Kompozit Yapıların Tasarım Yönetmeliği)
- **SP 63.13330:2018** – Concrete and Reinforced Concrete Structures
(Beton ve Betonarme Yapılar için Tasarım Yönetmeliği)
- **SP 16.13330:2017** – Steel Structures
(Çelik Yapılar için Tasarım Yönetmeliği)
- **SP 14.13330:2018** – Building in Seismic Areas
(Deprem Bölgelerindeki Yapılar için Tasarım Yönetmeliği)

5- Türkiye (Turkey)

- **TS 500:2000** – Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları
(Turkish Code for Design and Construction of Reinforced Concrete Structures)
- **ÇYTHYE:2016** – Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik
(Turkish Code for Design, Calculation, and Construction of Steel Structures)
- **TBDY:2018** – Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
(Turkish Building Earthquake Code)
- **TS EN 1994-1-1** – Eurocode 4: Çelik - Beton Kompozit Yapıların Tasarım Kuralları

(Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures – Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings)

- **TS EN 1993-1-1** – Eurocode 3: Çelik Yapıların Tasarım Kuralları
(Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings)

Ülkemizde yürürlükte olan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği - 2018 kapsamında kompozit yapıların genel hesap ve tasarım ilkeleri özetle aşağıda belirtilmiştir.

➤ **Süneklik düzeyi yüksek moment aktaran çerçevelerde, betonla çevrelenmiş (çelik gömme) kompozit kolonlar için;**

(a) Betonarme kirişler ile çelik gömme kompozit kolonlardan oluşan süneklik düzeyi yüksek moment aktaran çerçevelerin kolonlarının enkesiti, düşey yükler altında TS 498’de hareketli yükler için tanımlanmış olan yük azaltma katsayıları da dikkate alınarak, düşey yükler ve depremin ortak etkisi altında $1,2G+Q+0,2S\pm E_d$ yük birleşimi ile hesaplanan eksenel basınç kuvvetlerinin en büyüğü N_{dm} olmak üzere;

$$N_{dm} \leq 0,40P_{no} \quad (2.6)$$

koşulunu sağlayacaktır. Burada, kompozit kolon enkesitinin eksenel basınç kuvveti dayanımı, P_{no} ;

$$P_{no}=0,85A_{cfck} + A_sF_y + A_{sr}F_{ysr} \quad (2.7)$$

(b) Her bir kolonun alt ve üst uçlarında özel sarılma bölgeleri oluşturulacaktır. Sarılma bölgelerinin her birinin uzunluğu döşeme üst kotundan yukarıya doğru ve kolona bağlı en derin kirişin alt yüzünden başlayarak aşağıya doğru ölçülmek üzere, kolon serbest yüksekliğinin 1/6’sından, kolon enkesitinin büyük boyutunun 1,5 katından ve 500 mm’den az olmayacaktır.

(c) Sarılma bölgelerinde 10 mm’den daha küçük çaplı enine donatı kullanılmayacaktır. Bu bölgede, boyuna doğrultudaki etriye ve çiroz aralığı kolon enkesitinin küçük boyutunun 1/3’ünden, boyuna donatı çapının 6 katından ve 150 mm’den daha büyük, 50 mm’den daha küçük olmayacaktır. Boyuna donatıyı saran etriye kollarının ve/veya

2. KAYNAK ÖZETLERİ

çirozların arasındaki yatay uzaklık, a, etriye çapının 25 katından daha büyük alınmayacaktır. Sürekli dairesel spirallerin adımı, göbek çapının 1/5'inden ve 80 mm'den daha büyük olmayacaktır. Dairesel kolonlarda tüm sargı donatısı çevreye yerleştirilen enine donatı ile sağlanacaktır.

(d) Kolon orta bölgesi, kolonun alt ve üst uçlarında tanımlanan sarılma bölgeleri arasında kalan bölgedir. Bu bölgede sargı donatısı aralığı (c)' de belirlenen aralığın iki katını aşamaz.

(e) Kolon ekleri TBDY-2018 / Madde: 9.2.10.2, 9.2.10.3 ve 9.3.5'te belirtilen koşulları sağlayacak şekilde boyutlandırılacaktır.

(f) Donatı çeliği ekleri TBDY-2018 / Bölüm: 7' de belirtilen koşulları sağlayacak şekilde oluşturulacaktır.

(g) Toplam boyuna donatı enkesit alanı A_{sr} , $0,01A_g < A_{sr} < 0,04A_g$ koşulunu sağlayacaktır. Burada A_g , kompozit kolonun toplam enkesit alanıdır. Bindirmeli ek yapılan kesitlerde toplam boyuna donatı enkesit alanı $0,06A_g$ değerini aşmayacaktır.

(h) Etriyeli kolonlarda eksenel kuvvetin $N_{dm} > 0,20P_{no}$ (basınç) olması durumunda sarılma bölgelerindeki minimum toplam enine donatı alanı A_{sh} ,

$$A_{sh} = 0,075sb_k [1 - ((F_y A_s) / P_{no})][(f_{ck}/F_{ysr})] \quad (2.8)$$

(i) Spiral donatılı dairesel kolonlarda $N_{dm} > 0,20P_{no}$ (basınç) olması durumunda sarılma bölgelerindeki enine donatının minimum hacimsel oranı ρ_s ;

$$\rho_s \geq 0,12[1 - ((F_y A_s) / P_{no})][(f_{ck}/f_{ywk})] \quad (2.9)$$

(i) $N_{dm} \leq 0,20P_{no}$ olması durumunda, kolon sarılma bölgelerinde (h) ve (i) ile verilen enine donatıların en az 2/3'ü, minimum enine donatı olarak kullanılacaktır.

(j) Enine donatı temelin içinde kolon minimum boyutundan küçük olmayan bir yükseklik boyunca devam ettirilecektir.

➤ **Süneklik düzeyi yüksek moment aktaran çerçevelerde, beton dolgulu kompozit kolonlar için;**

(a) Çelik kirişler ile beton dolgulu kompozit kolonlardan oluşan süneklik düzeyi yüksek moment aktaran çerçevelerin elemanlarında, başlık genişliği/kalınlığı, gövde yüksekliği/kalınlığı ve çap/et kalınlığı oranları TBDY-2018 / Tablo 9.3'te verilen λ_{hd} aşmayacaktır.

(b) Kolon enkesiti, düşey yükler altında TS 498'de hareketli yükler için tanımlanmış olan yük azaltma katsayıları da dikkate alınarak, düşey yükler ve depremin ortak etkisi altında $1,2G+Q+0,2S\pm E_d$ yük birleşimi ile hesaplanan eksenel basınç kuvvetlerinin en büyüğü N_{dm} olmak üzere;

$$N_{dm} \leq 0,40P_{no} \quad (2.10)$$

koşulunu sağlayacaktır. Bu denklemde, kompozit kolon enkesitinin eksenel basınç kuvveti dayanımı P_{no} ;

$$P_{no}=0,95A_{cfck} + A_sF_y + A_{sr}F_{ysr} \quad (2.11)$$

(c) Kompozit kolonun karakteristik kesme kuvveti dayanımı sadece yapısal çelik enkesitin etkin kayma alanı göz önüne alınarak hesaplanacaktır.

(d) Kolon ekleri TBDY-2018 / Madde: 9.2.10.2 ve 9.2.10.3'te belirtilen koşulları sağlayacak şekilde boyutlandırılacaktır.

(e) Kiriş-kolon birleşimleri, kiriş başlık hizalarında, kolon dışında veya kolon içinde olmak üzere, diyafram levhaları kullanılarak oluşturulacaktır. Bu levhaların kalınlıkları en az kiriş başlık kalınlığına eşit olarak alınacaktır. Diyafram levhaları tüm çevresi boyunca kolona, tam penetrasyonlu küt kaynak veya çift taraflı köşe kaynak kullanılarak bağlanacaktır. Kolon içinde teşkil edilen diyafram levhalarında beton geçişini sağlayacak boyutlarda dairesel boşluklar açılacaktır.

(f) Çelik kiriş-kompozit kolon birleşimleri en az 0.04 radyan görelî kat ötelemesi açısını (görelî kat ötelemesi/kat yüksekliği) sağlayabilecek kapasitede olacaktır. Bunun için, deneysel ve/veya analitik yöntemlerle geçerliliği kanıtlanmış yöntemler kullanılacaktır.

Ülkemizde yürürlükte olan Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik - 2016 kapsamında kompozit yapıların genel hesap ve tasarım ilkeleri ise aşağıda belirtilmiştir.

➤ **Kompozit elemanlarda malzeme sınırları;**

(a) Kompozit elemanların kapasitelerinin hesabında kullanılan karakteristik beton basınç dayanımı (f_{ck}); 20 MPa ile 70 MPa arasında olacaktır.

(b) Beton çeliğinin karakteristik akma gerilmesi (F_{ysr}); 500 MPa ile sınırlıdır.

(c) Yapısal çelik elemanların karakteristik akma gerilmesi (F_y); 460 MPa ile sınırlıdır.

➤ **Betonla çevrelenmiş (çelik gömme) kompozit elemanlar için tasarım sınırları;**

(a) Yapısal çelik çekirdeğın enkesit alanı, toplam kompozit enkesit alanının en az %1'i kadar olmalıdır.

(b) Kompozit kesitte boyuna ve enine donatı kullanılmalıdır. Enine donatı etriye veya spiral sargı şeklinde olabilir. Etriye kullanılması durumunda en az 10 mm çapında etriyeler en fazla 300 mm aralıkla, 12 mm veya daha büyük çaplı etriyeler en fazla 400 mm aralıkla teşkil edilmelidir. Etriye aralığı kompozit elemanın en küçük kenar uzunluğunun 0,5 katından daha fazla olamaz.

(c) ÇYTHYE-2016 / Denk. (2.1) ile tanımlanan boyuna donatı oranı (ρ_{sr}); minimum 0,004 olacaktır.

$$\rho_{sr} = A_{sr} / A_g \geq 0,004 \quad (2.12)$$

A_g : Kompozit elemanın toplam enkesit alanı

A_{sr} : Boyuna donatı alanı

➤ **Beton dolgulu kompozit elemanlar için tasarım sınırları;**

(a) Yapısal çelik enkesit alanı, toplam kompozit enkesit alanının en az %1'i kadar olmalıdır.

(b) Beton dolgulu kompozit elemanlar yerel burkulma sınır durumu açısından ÇYTHYE-2016 / Madde: 12.2.4'e uygun olarak sınıflandırılmalıdır.

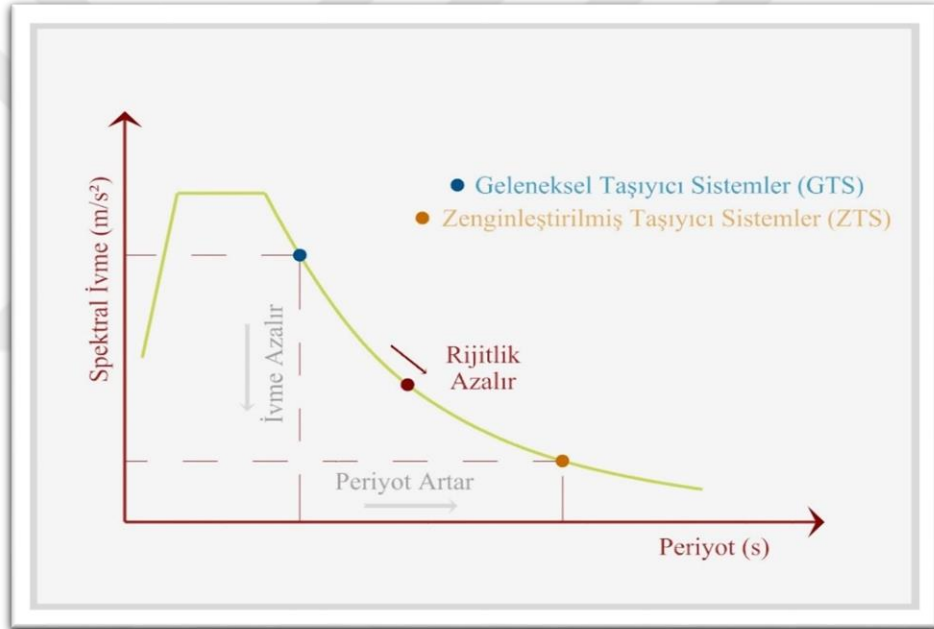
(c) Kompozit enkesitte boyuna donatı kullanılması gerekli değildir. Boyuna donatı kullanılması halinde de dayanım hesapları açısından enine donatıya gerek olmamaktadır.

2.3. Taşıyıcı Sistemlerde Sismik Kontrol Mekanizmaları

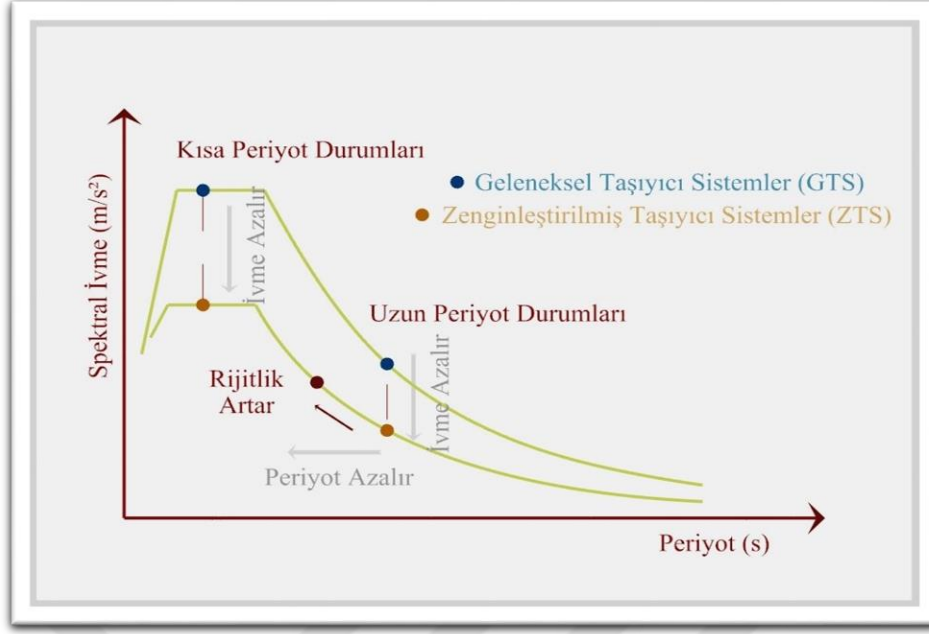
Yapı mühendisliği faaliyetleri kapsamında depreme dayanıklılık, tasarım ve yapım süreçlerinin en önemli unsurlarından biridir. Geleneksel Taşıyıcı Sistemler (GTS), yürürlükteki yönetmeliklere uygun tasarım ve yapım süreçleri ile sismik etkiler karşısında belirli bir dayanıklılık kapasitesine sahip olsa da özellikle fonksiyonlu yapılar için daha yüksek güvenlik sağlamak adına ileri mühendislik yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Dünya genelinde ve ülkemizde en yaygın tercih edilen ileri mühendislik yöntemlerinden biri ise sismik kontrol mekanizmalarıdır (SKM).

SKM'ler; taşıyıcı sistemlerin belirli bir seviyesinde alt ile üst yapı elemanlarını birbirinden ayıran yatay hareket kabiliyeti yüksek ürünler veya yapının üst taşıyıcı elemanlarına ilave edilen eksenel yük yaşama kapasitesi yüksek sönümleyici ürünler ile deprem enerjisinin yapıya aktarılmasını sınırlandırmayı amaçlayan depreme dayanıklı bir yapı tasarım yöntemidir. Bu tasarım yöntemi ile yapı mühendisleri, sismik etkilere karşı daha dirençli olan Zenginleştirilmiş Taşıyıcı Sistemler'in (ZTS) meydana gelmesini sağlar.

SKM'lerin taşıyıcı sistem içerisinde belirli bir seviyede (taban) uygulanması, yapıların deprem etkilerine karşı dayanıklılığını arttırmak yerine doğal titreşim periyotlarını uzatarak bu etkileri azaltma esasına dayanan bir tasarım yaklaşımıdır. Yapı mühendisleri bu yaklaşım sayesinde, yapıların ve olası deprem ivmelerinin özellikleri dikkate alınarak yalıtım seviyesinde yapıların yatay rijitliğinin azaltılması ve doğal periyotlarının artırılması ile taşıyıcı sistemlerin enerji sönüm kapasitesinin yükseltilmesini hedeflemektedir. Ayrıca bu mekanizmaların yapıların üst taşıyıcı elemanlarına sönümleyici olarak uygulanması ise, yapıların yatay rijitliğinin artırılması ve doğal periyotlarının azaltılması ile deprem etkilerine karşı taşıyıcı sistemlerin dayanıklılığının ve enerji sönüm kapasitesinin yükseltilmesi sağlanır.



Şekil 2.13. Sismik Kontrol Mekanizmaları (Taban - Seviye) / Periyot - İvme Değişimi

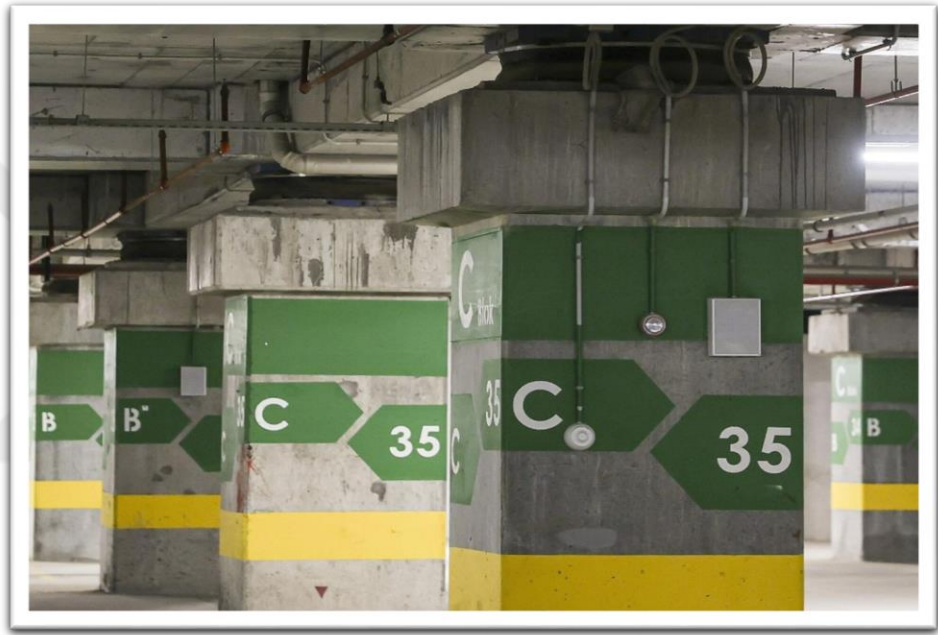


Şekil 2.14. Sismik Kontrol Mekanizmaları (Sönümleyiciler) / Periyot - İvme Değişimi

SKM'lerin tüm uygulama yöntemleri, yapıların görece kat ötelemelerini ve burulma miktarlarını azaltması ile taşıyıcı sistem bütünlüğünün sürekliliğini, sismik etkiler altında meydana gelebilecek yapısal hasarların ise önlenmesi veya minimum seviyeye indirgenmesini sağlar. Böylece, yapı içerisindeki eşyalar ve diğer donanımlar depremin olumsuz etkilerinden korunarak iç mekânlardaki kullanım sürdürülebilirliği de artırılmış olur.

Taşıyıcı sistemler, depremler sırasında yatay yükler altında büyük zorlamalara maruz kalırlar. GTS'ler belirli avantajlar sağlasa da, her iki malzemenin de tek başına bazı kusurları bulunmaktadır. Betonarme yapılar, ağırlıkları nedeniyle deprem kuvvetlerinden daha fazla etkilenirken, çelik yapılar ise yüksek süneklikleri nedeniyle büyük yer değiştirmeler gösterebilmektedir. Çelik - beton kompozit yapılar ise bu iki yapısal karakteristiği dengeleyerek taşıyıcı sistemlerin sismik etkilere karşı daha kontrollü bir davranış sergilemesini sağlar. Bu doğrultuda, sismik kontrol mekanizmaları ile meydana gelen ZTS'ler de benzer şekilde taban devrilme momentleri ve kesme kuvvetleri azaltılarak daha küçük taşıyıcı sistem eleman kesitleri ile daha yüksek sismik direnç elde edilmesi sağlanmış olur.

Zenginleştirilmiş taşıyıcı sistemlerin (ZTS) en önemli avantajlarından bir diğeri de yapıların depremler sonrasında da kullanılabilir durumda olmalarını sağlamalarıdır. Özellikle yapım maliyeti yüksek olan ya da içerisinde maddi veya manevi kıymetli donanımlara sahip yüksek yapılar, hastaneler, bilgi merkezleri, nükleer santraller, köprüler ve kritik altyapılar gibi kesintisiz çalışması gereken fonksiyonlu yapılar için sismik kontrol mekanizmaları büyük önem taşımaktadır. Bu tasarım yaklaşımı da yapısal ve yapısal olmayan elemanların sismik etkiler altında hasar düzeyini düşürdüğü için maliyetli onarımların ve iş gücü kayıplarının da önüne geçmektedir.



Şekil 2.15. Başakşehir Çam ve Sakura Şehir Hastanesi / İstanbul

SKM'ler, sadece yeni yapıların tasarımında değil, aynı zamanda mevcut yapıların güçlendirilmesinde de ülkemizde henüz yaygın olmamakla birlikte etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Özellikle deprem riski yüksek bölgelerde bulunan eski veya yetersiz taşıyıcı sisteme sahip yapıların uygun konumlarına ilave edilerek mevcut taşıyıcı sistemin zenginleştirilmesine de olanak sağlar. Mevcut yapıların güçlendirme tasarımlarında kullanılan sismik kontrol mekanizmaları, taşıyıcı sistemin belirli bir seviyesine yerleştirilerek yapının deprem esnasında maruz kaldığı ivmeleri azaltırken, enerji sönümleyiciler ise görelî kat ötelemeleri ve titreşimleri minimize ederek taşıyıcı sistem üzerindeki gerilimi düşürmektedir. Böylece taşıyıcı sistem elemanları deprem sırasında daha düşük iç kuvvetlere maruz kalır ve yapının hasar olasılığı önemli ölçüde azaltılır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

SKM'ler, taşıyıcı sistemlerin kendi doğal yükleri altında ve küçük sarsıntılar, günlük rüzgâr etkileri gibi düşük seviyeli hareketlerde gereksiz titreşimler oluşturmamasını önlemek amacıyla günlük hareketler doğrultusunda rijitliği başlangıçta yüksek olan ancak belirli bir yükleme seviyesinden sonra da esneklik kazanabilen özelliklere sahip olmalıdır. Böylece yapı, sadece depremler gibi sismik veya ileri düzey rüzgâr hareketleri sırasında yalıtım sistemini devreye alarak günlük titreşimlere karşı taşıyıcı sistemin gereksiz salınımlar yapmasını engeller ve yapının emniyetli bir şekilde uzun süre hizmet vermesine olanak sağlar.



Şekil 2.16. 15 Temmuz Şehitler Köprüsü (Boğaziçi) Güçlendirme Projesi / İstanbul

Ayrıca sismik kontrol mekanizmalarının sahip olması gereken en önemli özelliklerden bir diğeri de geri merkezlenme fonksiyonudur. Bu fonksiyon, taşıyıcı sistemin deprem veya ileri düzey rüzgâr hareketleri sonrasında eski konumuna dönmesini sağlayarak kalıcı yer değiştirmelerin oluşumunu engeller ve yapının uzun vadeli stabilitesi korunarak konforlu hizmet süresi sağlar.

SKM'ler, modern yapı teknolojileriyle uyumlu yapısıyla yapı tasarım süreçlerinde giderek daha geniş bir kullanım alanı bulmaktadır. İlerleyen yıllarda, gelişen malzeme bilimi ve mühendislik teknikleriyle birlikte sismik kontrol mekanizmaları ile oluşturulan ZTS'lerin de daha ileri seviyeye taşınması beklenmektedir. Daha güvenli, ekonomik ve

sürdürülebilir şehirler inşa edebilmek için zenginleştirilmiş taşıyıcı sistemler daha da yaygın hale gelecek ve deprem riskine karşı daha dirençli yapılar inşa etmek mümkün olacaktır.

Sismik koruma mekanizmaları (SKM), yapıların deprem etkilerine karşı daha güvenli hale getirilmesini sağlayan çeşitli yöntem ve sistemleri kapsar. SKM'ler, farklı kriterlere göre sınıflandırılabilir. Şekil ve boyutları, üretildikleri malzeme, kullanım alanları, kullanım amaçları ve çalışma metodu gibi faktörler, sınıflandırma sürecinde dikkate alınan başlıca unsurlardır. Ancak, en yaygın kullanılan sınıflandırma yöntemi **“Çalışma İlkelerine Göre Sınıflandırma”** olarak öne çıkmaktadır. Bu yöntemle göre sismik kontrol mekanizmaları aşağıda belirtildiği gibi sınıflandırılabilirler.

2.3.1. Aktif - Yarı Aktif ve Hibrit Kontrol Mekanizmaları

Aktif kontrol sistemleri, yapıya gelen dinamik etkileri sensörler aracılığıyla sürekli olarak ölçerek, elde edilen verilere göre yapı hareketine ters yönde kontrol kuvvetleri uygular. Başka bir deyişle gerçek zamanlı olarak çalışarak, yapının titreşimlerini anında dengeleyebilme yeteneğine sahiptirler. Kontrol kuvvetlerinin oluşturulmasında genellikle hidrolik veya elektromekanik aktüatörler kullanılır. Yüksek performans sağlamaları nedeniyle avantajlı olmalarına rağmen, enerji tüketimlerinin yüksek olması dezavantaj teşkil etmektedir. Aktif kütle sönümleyicileri (AMD), aktif rijitlik değiştirici sistemler ve aktif tendon sistemler bu sistemlere örnek olarak gösterilebilir.

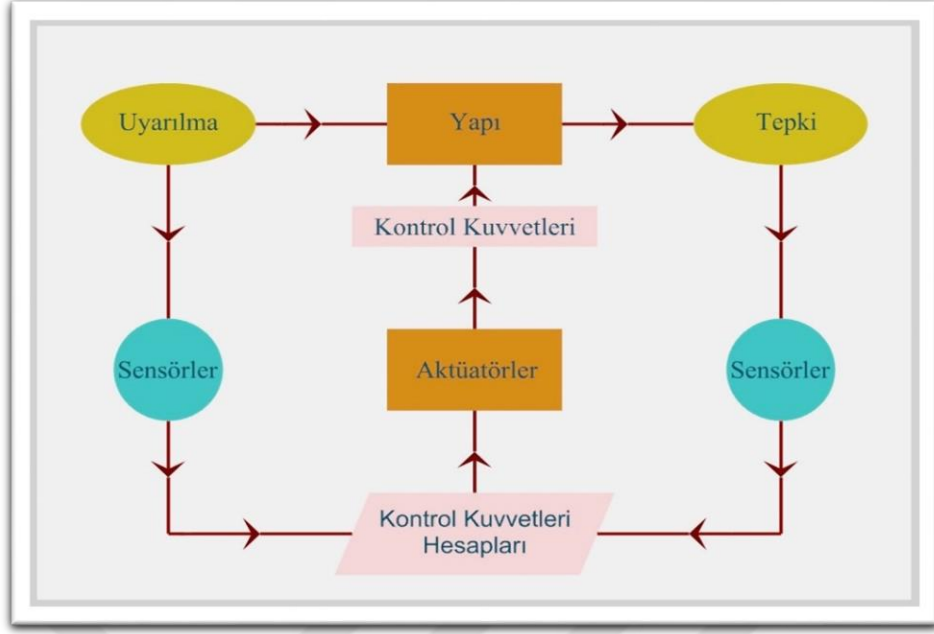
Yarı aktif kontrol sistemleri ise aktif sistemlere kıyasla daha düşük enerji tüketimine sahiptir ve dinamik etkilerin değişimlerine göre kendilerini adaptif bir şekilde düzenlerler. Bu sistemlerde kullanılan yay ve sönümleyici elemanlar, maruz kaldıkları dış yüklere göre karakteristiklerini değiştirme yeteneğine sahiptir. Böylelikle yapıya gelen titreşim enerjisini etkin bir biçimde azaltırlar. Yarı aktif sistemlere örnek olarak manyetoreolojik (MR) sönümleyiciler, değişken rijitlikli ve sönümlemeli sistemler ve değişken orifisli hidrolik sönümleyiciler gösterilebilir.

Hibrit kontrol sistemleri ise aktif ve yarı aktif sistemlerin avantajlarını bir araya getiren karma sistemlerdir. Bu sistemler, yüksek performans ile enerji tüketiminde verimliliği bir arada sunarak, güvenilir bir kontrol sağlarlar. Bununla birlikte, sistemlerin kurulum maliyetleri ve kontrol algoritmalarının karmaşıklığı dezavantaj olarak değerlendirilebilir. Hibrit kütle sönümleyiciler, aktif kontrol aktüatörler ile yarı aktif sönümleyici elemanların bir araya getirilmesiyle oluşturulan tipik örneklerdendir.

Bu kontrol mekanizmalarında, çalışma ilkeleri bakımından üç farklı yöntem kullanılabilir. Bunlar;

- **Kapalı Döngü** (Geri Besleme - Feedback): Yapının ölçülen tepkisine göre kontrol kuvvetleri belirlenir.
- **Açık Döngü** (İleri Besleme - Feedforward): Yapıya gelen dış kuvvetler ölçülerek kontrol kuvvetleri uygulanır.
- **Kapalı-Açık Döngü** (Geri ve İleri Besleme - Feedback and Feedforward): Yapı tepkisi ve dış etkilerin ölçümleri birlikte kullanılarak kontrol kuvvetleri hesaplanır.

Yapı parametrelerinin tam olarak bilinmediği durumlarda adaptif kontrol yaklaşımı kullanılır. Bu yaklaşım ise, ölçülen gerçek tepki ile tahmin edilen tepki arasındaki hata üzerinden parametrelerini güncelleyerek yapısal tepkinin etkin biçimde kontrol edilmesini sağlar.



Şekil 2.17. Aktif Kontrol Mekanizmalarının Çalışma İlkesi

2.3.1.1. Aktif Kütle Sönümleyici Sistemler (AMD - Active Mass Dampers)

Aktif kütle sönümleyici sistemler (AMD), yüksek yapılar ve kulelerde deprem ve rüzgâr gibi dış etkilerin neden olduğu titreşimleri azaltmak amacıyla kullanılan gelişmiş bir yapısal kontrol mekanizmasıdır. Bu sistemlerin çalışma prensibi, yapıya entegre edilen büyük bir kütlenin, kontrol mekanizması ve aktüatörler aracılığıyla hareket ettirilmesine dayanır. Sistemdeki kütle, deprem veya rüzgâr nedeniyle oluşan titreşimlere ters yönde kuvvet uygulayarak yapının salınımlarını önemli ölçüde azaltır.

AMD'lerin önemli avantajlarından biri, yüksek yapıların salınım hareketlerini etkin şekilde kontrol edebilmeleridir. Ayrıca farklı yapı tiplerine kolaylıkla uygulanabilir olmaları da önemli bir avantajdır. Güçlü ve hassas kontrol mekanizmaları sayesinde, çeşitli dış yük ve durumlara karşı hızlı ve doğru tepki vererek yapısal güvenliği üst düzeye çıkarırlar.

Dünya genelinde birçok önemli yapı, aktif kütle sönümleyici sistemleri kullanmaktadır. Örneğin, Taipei 101 gökdeleni, büyük bir aktif kütle sönümleyiciye sahiptir ve bu sistem sayesinde yapısal titreşimlerini minimize etmektedir.



Şekil 2.18. Aktif Kütle Sönümleyici Sistem Uygulaması (AMD) Taipei 101 / Tayvan

2.3.1.2. Aktif Ayarlı Kütle Sönümleyici Sistemler (ATMD - Active Tuned Mass Dampers)

Aktif ayarlı kütle sönümleyiciler (ATMD), yüksek binalar ve köprüler gibi büyük yapıların deprem ve rüzgâr gibi dış kaynaklı dinamik yüklerden kaynaklanan titreşimlerini azaltmak için tasarlanmış gelişmiş yapı kontrol sistemleridir.

Aktif ayarlı kütle sönümleyiciler, standart aktif kütle sönümleyicilere göre daha gelişmiş özelliklere sahiptir. Bu sistemler, temel çalışma prensibi olarak aktif kütle sönümleyicilerle benzerlik gösterse de, ek olarak frekanslarının aktif olarak ayarlanabilmesi sayesinde farklılık oluşturur. Aktif ayarlı kütle sönümleyiciler, gerçek zamanlı analizlerle sismik kuvvetleri sürekli izleyerek, deprem sırasında yapının titreşim frekansını anlık olarak değiştirebilir ve titreşimlere en etkili tepkiyi verir.

ATMD'lerin en büyük avantajı, standart aktif kütle sönümleyicilere göre daha yüksek bir titreşim sönümleme oranına sahip olmalarıdır. Aktif frekans ayarlama özelliği sayesinde, deprem koşullarındaki ani değişimlere uyum sağlayarak çeşitli frekanslarda çalışabilir ve geniş bir deprem spektrumuna adapte olabilir. Bu özellik, sistemin çok farklı yapı türlerinde ve çeşitli dinamik yük koşullarında etkili olmasını sağlar.

Bu sistemlerin kullanım alanları arasında yüksek binalar ve asma köprüler öne çıkar. Özellikle rüzgâr ve deprem kuvvetlerine karşı adaptif bir çözüm sağlaması, yapı güvenliğini önemli ölçüde artırır. Yapı mühendisliği alanında ATMD'ler, giderek daha fazla yapıda tercih edilmekte ve yapı mühendisliğinde yenilikçi bir çözüm olarak kabul edilmektedir.

2.3.1.3. Aktif Tendon Sistemler (ATS - Active Tendon Systems)

Aktif tendon sistemleri, yapıların özellikle yatay hareketlerini ve titreşimlerini kontrol etmek amacıyla tasarlanan gelişmiş yapısal kontrol yöntemlerinden biridir. Bu sistemler, yapı içine yerleştirilen yüksek dayanımlı kablolar (tendon) ile çalışır. Tendonlara bağlı aktüatörler, yapının hareketlerine karşı kontrollü kuvvetler uygulayarak titreşimleri ve salınımları azaltır. Bu işlem, sensörler ve gelişmiş kontrol algoritmaları tarafından yönlendirilen hidrolik pistonlar sayesinde hassas bir şekilde gerçekleştirilir.

Aktif tendon sistemlerinin öne çıkan avantajları arasında, yapıların sismik etkiler altında esnek davranmasını sağlayarak olası hasar ve kırılmaları önlemesi bulunmaktadır. Ayrıca bu sistemler, özellikle uzun açıklıklı köprülerde yapı stabilitesini önemli ölçüde artırır ve hafif, yüksek mukavemetli enkesitleri sayesinde yüksek katlı binalarda da etkili biçimde kullanılabilir. ATS'lerin kullanımında karşılaşılan en önemli olumsuzluk ise, özellikle rüzgâr ve araç geçişleri gibi çeşitli kombine yükler altında tendonların doğrusal olmayan davranışlarını kontrol etmektir. Bu nedenle sistemlerin tasarımı ve uygulanmasında hassas analizler ve gelişmiş mühendislik yaklaşımları gereklidir.

ATS'ler, genellikle eğik askılı köprüler ve büyük ölçekli mühendislik projelerinde tercih edilir. Aktif tendon sistemlerinin en açıklayıcı örneklerinden biri askı ve kontrol kablolarının birleşimiyle donatılarak dinamik yüklerin ve titreşimlerin etkin biçimde yönetildiği Normandiya Köprüsü'dür.



Şekil 2.19. Aktif Tendon Sistemleri Uygulaması (ATS) Normandiya Köprüsü / Fransa

2.3.1.4. Aktif Rijitlik Değiştirici Sistemler (ASCS - Active Stiffness Control Systems)

Aktif Rijitlik Değiştirici Sistemler, yapıların deprem etkileri karşısındaki davranışlarını kontrol etmek ve performanslarını artırmak amacıyla kullanılan gelişmiş mühendislik çözümleridir. Bu sistemler sayesinde yapının genel rijitliği, dış etkilere bağlı olarak aktif kontrol mekanizmaları ve aktüatörler aracılığıyla ayarlanabilmektedir. Yapıya entegre edilen sensörler, deprem hareketlerini anlık olarak algılayarak sisteme gerekli bilgileri iletir ve bu bilgilere göre rijitliği artırarak veya azaltarak yapısal davranışı optimize eder.

Aktif rijitlik değiştirici sistemlerde; rijitliğin artırılması, küçük ve orta büyüklükteki hareketlerde hızlı ve etkili bir şekilde enerji sönümleyici bir etki sağlayarak yapısal deformasyonları minimize eder. Aksi durumda rijitliğin azaltılması ile de yapı esnek bir hale gelir ve deprem enerjisini daha geniş bir alana yayarak yapı elemanları üzerindeki yükü azaltır.

ASCS'lerin başlıca avantajları arasında, yapısal elemanlar üzerindeki yüklerin optimize edilmesi ve kırılma risklerinin önemli ölçüde azaltılması bulunur. Aynı zamanda yapıların esneklik ve rijitlik dengesi hassas biçimde ayarlanabildiği için daha dayanıklı

ve uzun ömürlü yapılar inşa etmek mümkün olur. Bu avantajlar, aktif rijitlik değiştirici sistemlerin köprüler, büyük açıklıklı yapılar ve deprem yönetmeliklerine uygun olarak inşa edilen gökdelenlerde tercih edilmesini sağlar.

Aktif rijitlik değiştirici sistemlerin önemli bir alt kategorisi olan "Aktif Kiriş Rijitleştirici Sistemler" ise, özellikle kiriş elemanlarının davranışını kontrol etmeye odaklanır. Deprem sırasında kirişlerin rijitliği aktif olarak artırılarak yapısal deformasyonlar azaltılır ve böylece hasar riski minimize edilir. Bu sistem, kirişlere doğrudan müdahale ederek yapının taşıyıcı sistem performansını ve güvenliğini artırır.

Dünya genelinde birçok mühendislik projesinde aktif rijitlik değiştirici ve aktif kiriş rijitleştirici sistemler başarıyla uygulanmakta, yapısal güvenliği ve dayanıklılığı önemli ölçüde artırmaktadır.

2.3.1.5. Manyetoreolojik Sönümleyiciler (MR - Magnetorheological Dampers)

Manyetoreolojik sönümleyiciler, yapıların deprem veya rüzgâr gibi dinamik yüklere karşı korunmasında kullanılan yarı aktif kontrol mekanizmalarıdır. Bu sistemlerde, manyetoreolojik sıvılar önemli rol oynar. MR sıvılar, manyetik alan etkisi altında viskozite değerlerini hızlı ve kontrollü bir şekilde değiştirebilirler. Böylece deprem sırasında veya rüzgâr yükü altında, uygulanan manyetik alanın şiddetine göre sıvının akışkanlık özellikleri ayarlanarak etkin bir enerji sönümlemesi gerçekleştirilir.

MR sönümleyicilerin en önemli avantajları arasında düşük enerji tüketimine karşılık yüksek performans sağlamaları bulunmaktadır. Ayrıca bakım ihtiyaçları düşüktür ve geniş bir frekans aralığında etkili bir şekilde çalışabilirler. Bu özellikler sayesinde MR sönümleyiciler uzun ömürlüdür ve farklı tipteki yapı sistemlerine kolaylıkla entegre edilebilir.

Manyetoreolojik sönümleyiciler özellikle rüzgâr yüklerinin etkili olduğu büyük açıklıklı köprülerde, yüksek katlı yapılarda, gökdelenlerde ve korunması gereken tarihi yapılarda kullanılırlar.

2.3.1.6. Değişken Rijitlikli ve Sönümlemeli Sistemler (VSDS - Variable Stiffness and Damping Systems)

Değişken rijitlikli ve sönümlemeli sistemler, yapıların özellikle dinamik yükler karşısında daha etkili şekilde korunmasını sağlayan ileri teknolojiye yarı aktif kontrol sistemleridir. Bu sistemlerde, yapıdaki titreşim seviyesi sensörler aracılığıyla sürekli olarak ölçülür ve analiz edilir. Sistem içerisinde bulunan aktüatörler ile yapıdaki rijitlik veya sönümleme oranları dinamik biçimde değiştirilerek, dış yüklerin etkisi optimum şekilde yönetilir. Sismik yükler esnasında sistem otomatik olarak rijitliği artırarak şok emici bir davranış sergiler ve titreşimlerin şiddetini azaltır. Tehlike geçtikten sonra ise sistem tekrar başlangıç ayarlarına dönerek yapının genel dengesini korur.

VSDS'lerin en önemli avantajları arasında esneklik ile rijitlik dengesini etkin biçimde sağlayarak yapısal stabiliteyi artırmak yer alır. Ayrıca, yapı elemanlarının ömrünü uzatarak kırılma ve hasar risklerini azaltır. Özellikle yüksek hassasiyet ve mühendislik gerektiren projelerde maksimum performans elde edilmesine olanak tanır.

Değişken rijitlikli ve sönümlemeli sistemler; havaalanı terminallerinde, köprü bağlantılarında ve büyük ölçekli yapı projelerinde tercih edilir. Ayrıca, tarihi binaları korumaya yönelik yenileme çalışmalarında bu sistemlerin uyarlanmış türleri başarıyla kullanılmaktadır.

2.3.1.7. Değişken Orifisli Hidrolik Sönümleyiciler (VOFD - Variable Orifice Fluid Dampers)

Değişken orifisli hidrolik sönümleyiciler (VOFD), yapıların dinamik yüklere karşı korunmasını sağlayan gelişmiş yarı aktif kontrol sistemleridir. Bu sistemlerin çalışma prensibi, hidrolik sıvının hareketini özel tasarım valfler aracılığıyla dinamik olarak kontrol etmeye dayanır. Valflerin açıklığı ayarlanarak sıvının akış hızı kontrol edilir ve bu sayede sönümleme kapasitesi istenilen seviyeye getirilebilir.

Geleneksel sabit sönümleyicilere kıyasla daha esnek ve adaptif bir performans sunan VOFD'ler, düşük bakım maliyetleri ve uzun vadede yüksek dayanıklılık sağlar.

Ayrıca, farklı büyüklüklerdeki deprem senaryolarına göre optimize edilerek yapıların dinamik yükler altında güvenliğini önemli ölçüde artırır.

Değişken orifisli hidrolik sönümleyiciler, özellikle uzun açıklıklı köprülerde ve tarihi yapılarda büyük bir avantaj sağlar. Aynı zamanda, yüksek katlı binalarda deprem yalıtım sistemleri içinde kullanılarak, yapısal bütünlüğün korunmasında kritik rol üstlenmektedir.

2.3.1.8. Akıllı Malzemeli Sistemler (SMS - Smart Material Systems)

Akıllı malzemeli sistemler (SMS), yapıların dinamik koşullara ve çevresel etkilere karşı performansını otomatik olarak optimize edebilen ileri düzey teknolojiye sahip yarı aktif kontrol sistemleridir. Bu sistemler, manyetoreolojik sıvılar gibi akıllı piezoelektrik veya elektro-reolojik malzemeler kullanılır. Bu malzemeler, dış ortam koşullarındaki değişikliklere anlık tepki vererek rijitlik ve sönümleme özelliklerini dinamik olarak ayarlayabilir. Bu sayede sistemler, kendi kendine adaptasyon sağlayarak sürekli ideal performansı korur.

Akıllı malzemeli sistemlerin en büyük avantajları arasında bakım ihtiyacını azaltmaları ve geleneksel pasif sistemlere göre daha uzun kullanım ömrüne sahip olmaları yer alır.

SMS'ler, hassas mühendislik uygulamalarına yönelik özelleştirilmiş çözümler sunarak yüksek performans ve güvenlik sağlar. Özellikle enerji santralleri, nükleer tesisler ve stratejik öneme sahip yapılarla birlikte, uzay ve havacılık mühendisliği projelerinde de kritik bir rol oynar.

2.3.1.9. Hibrit Kütle Sönümleyiciler (HTMD - Hybrid Tuned Mass Dampers)

Hibrit kütle sönümleyicileri (HTMD), pasif kütle sönümleme sistemlerini aktif kontrol bileşenleriyle destekleyerek yapıların titreşimlerini daha hassas bir şekilde yönetmeyi amaçlayan hibrit sismik kontrol sistemleridir. Deprem sırasında pasif elemanlar sismik enerjiyi sönümleyerek yapı üzerindeki ani yükleri azaltırken, aktif

2. KAYNAK ÖZETLERİ

kontrol bileşenleri ise sensörlerden gelen veriler doğrultusunda gerçek zamanlı müdahalede bulunarak titreşimi daha etkin bir şekilde düzenler. Böylece, yapının taşıyıcı sistem stabilitesi ve donanım sürdürülebilirliği artırılmış olur.

HTMD'lerin en büyük avantajlarından biri, farklı frekans aralıklarında daha geniş bir etki sağlayabilmeleridir. Geleneksel pasif kütle sönümleyiciler (TMD) yalnızca belirli frekanslarda maksimum verim sağlarken, hibrit sistemler aktif kontrol mekanizmaları sayesinde farklı dinamik koşullara uyum sağlayarak daha geniş bir etki alanı sağlar.

Hibrit kütle sönümleyiciler, yapı mühendisliği faaliyetleri kapsamında deprem ve rüzgâr yüklerinin özellikle etkili olduğu yüksek katlı yapılar ve gökdelenlerde yaygın bir şekilde kullanılırlar.



Şekil 2.20. Hibrit Kütle Sönümleyicileri Uygulaması (HTMD) Şanghay Kulesi / Çin

2.3.1.10. Hibrit Manyetoreolojik Sönümleyiciler (HMRD - Hybrid M. Dampers)

Hibrit manyetoreolojik sönümleyiciler (HMRD), manyetoreolojik sıvıların adaptif özelliklerini aktif kontrol sistemleriyle birleştirerek yapıların sismik ve rüzgâr etkilerine karşı daha güvenli hale gelmesini sağlar. Geleneksel pasif sönümleyicilerin aksine, manyetoreolojik sıvılar ve aktif kontrol mekanizmaları sayesinde anlık ayarlamalar yapabilen bu sistemler, büyük ölçekli yapılar için esnek ve dinamik bir çözüm sağlar.

Bu sistemin çalışma prensibi, manyetoreolojik sıvıların elektrik akımıyla manyetik alan değişimlerine tepki vermesi esasına dayanır. Manyetik alanın şiddeti artırıldığında sıvının viskozitesi değişerek sönümleme kuvveti kontrol edilebilir hale gelir. Böylece, deprem ya da güçlü rüzgârların oluşturduğu titreşimler ortama ve ihtiyaca bağlı olarak anlık şekilde yönetilebilir. Bu esneklik, yapısal güvenliği artırmanın yanı sıra uzun vadeli dayanıklılığı da garanti altına alır.

Hibrit manyetoreolojik sönümleyicilerin en büyük avantajlarından biri, yüksek hassasiyetle kontrol edilebilir olmalarıdır. Geleneksel pasif sistemler belirli bir frekansta çalışırken, HMRD'ler çevresel değişkenlere anında uyum sağlayarak çok daha etkin bir titreşim yönetimi sunar. Bu özellikleri sayesinde özellikle büyük ölçekli mühendislik projelerinde ve kritik altyapı sistemlerinde tercih edilmektedir.

Dünya genelinde özellikle de Amerika ve Japonya'daki bazı köprülerde, bu sönümleyicilerin kullanıldığı bilinmektedir. Deprem riskinin yüksek olduğu bölgelerde yer alan gökdelenler ve diğer mühendislik yapıları da bu sistemlerden faydalanarak hem uzun vadeli güvenlik hem de optimum taşıyıcı sistem stabilitesi elde etmektedir. Geleceğin yapı teknolojileri arasında önemli bir yer edinen hibrit manyetoreolojik sönümleyiciler (HMRD), modern yapı mühendisliğinin sağladığı yenilikçi ve ileri teknoloji çözümler arasında öne çıkmaktadır.

2.3.2. Pasif Kontrol Mekanizmaları

Pasif kontrol mekanizmaları, yapıya gelen dinamik etkileri doğrudan sönümleyerek, dış kuvvetlerin yapıya olan etkisini azaltan özel elemanlardan oluşur. Bu sistemler, aktif kontrol sistemlerinden farklı olarak gerçek zamanlı bir geri bildirim mekanizmasına sahip değildir; ancak, deprem ve rüzgâr gibi dış etkenlerden gelen enerjiyi sönümleyerek yapının dinamik yüklere karşı verdiği tepkiyi azaltır ve böylece dayanıklılık seviyesini daha üst düzeye gelmesini sağlarlar.

Pasif kontrol mekanizmaları, çalışmaları sırasında dış enerjiye ihtiyaç duymamaları ve bakım gereksinimlerinin de düşük olması en büyük avantajları arasındadır. Ancak aktif kontrol sistemleri kadar yüksek bir etkinlik gösteremezler. Bu sistemler, yapının ömrü boyunca karşılaşılabileceği deprem senaryolarına göre tasarımları gerçekleştirilse de etki kapasiteleri belirli tasarım koşullarına bağlı olup, çok büyük depremler karşısında yetersiz kalarak yapıda ciddi deformasyonlara sebep olabilirler. Bu nedenle, kullanım alanı ve yapısal gereksinimler dikkate alınarak uygun bir sismik kontrol stratejisi belirlenmelidir.

Yapının belirli bir seviyesinde uygulanan taban yalıtım sistemleri ile üst taşıyıcı sistem elemanlarına yerleştirilen viskoz veya sürtünmeli enerji sönümleyiciler pasif kontrol mekanizmalarına örnek olarak gösterilebilirler.

2.3.2.1. Düşük Sönümlü Kauçuk Mesnetler (LDRB - Low Damping Rubber Bearings)

Düşük sönümlü doğal ve sentetik kauçuk mesnetler, sismik yalıtım sistemlerinde uzun yıllardır kullanılan en eski elastomerik mesnet türlerinden biridir. Yapıların belirli bir seviyesinde özellikle de taban yalıtımı uygulamalarında geçmişte yaygın olarak tercih edilen bu sistemler, çevresel faktörlere ve zamana karşı dayanıklı yapıları sayesinde uzun ömürlüdür.

LDRB'ler, doğal veya sentetik kauçuk ile çelik plakaların birleşiminden oluşur. Özel üretim teknikleriyle belirli sıcaklık ve basınç altında şekillendirilen bu sistemler,

2. KAYNAK ÖZETLERİ

düşey yönde yüksek rijitlik sağlarken yatay hareket serbestliğini korur. Çelik plakalar, kauçuğun yanal deformasyonunu engelleyerek stabiliteyi artırırken, yatay rijitlik kauçuk tabakaların kalınlığı ve sayısına bağlıdır.

Yer değiştirme ile kuvvet arasında mükemmel doğrusallığa ve kararlı bir geri yükleme kuvvetine sahip olan bu mesnetler, yaklaşık %2-3 oranında düşük doğal sönüm kapasitesine sahiptir. Ayrıca büyük yer değiştirmeler durumunda düşey taşıma kapasitesi de azalabilir.



Şekil 2.21. Düşük Sönümlü Kauçuk Mesnetler (LDRB)

Düşük sönümlü kauçuk mesnetlerin genel tasarım ilkeleri ve avantajları aşağıda belirtildiği gibidir.

- ✓ **Rijitlik Kontrolü:** Kauçuk tabaka kalınlığı sabit tutularak tabaka sayısının değiştirilmesiyle yatay rijitlik tasarımı ayarlanır.
- ✓ **Burkulma Tasarım Sınırı:** İzolatör yüksekliği, burkulma riskini azaltmak için çapın yarısından fazla olmayacak şekilde sınırlandırılmıştır.
- ✓ **Mekanik Dayanım:** Çelik plakalar, kauçuk malzemesinin yanal deformasyonunu sınırlandırarak düşey rijitliği artırır, yatay yönde ise izolatörün esnekliğini korur.

- ✓ **Üretim ve Montaj Kolaylığı:** Standart üretim süreçlerine uygun olmakla birlikte ekonomik ve hızlı bir şekilde uygulaması yapılabilir.
- ✓ **Hesap ve Tasarım Uygunluğu:** Statik ve dinamik analizleri kolay bir şekilde yapılabilir ve yapı tasarımına kolay entegre edilebilir.
- ✓ **Çevresel Dayanıklılık:** Sıcaklık değişimlerinden minimum düzeyde etkilenmekte olup -17°C’de sertleşmeye başlarken, +82°C’ye kadar dayanıklılık sağlar.
- ✓ **Ek Sönümleme Gereksinimi:** Doğal sönüm kapasitesinin düşük olması, sismik risk taşıyan bölgelerde ek sönümleme sistemlerine ihtiyaç bulunmaktadır.

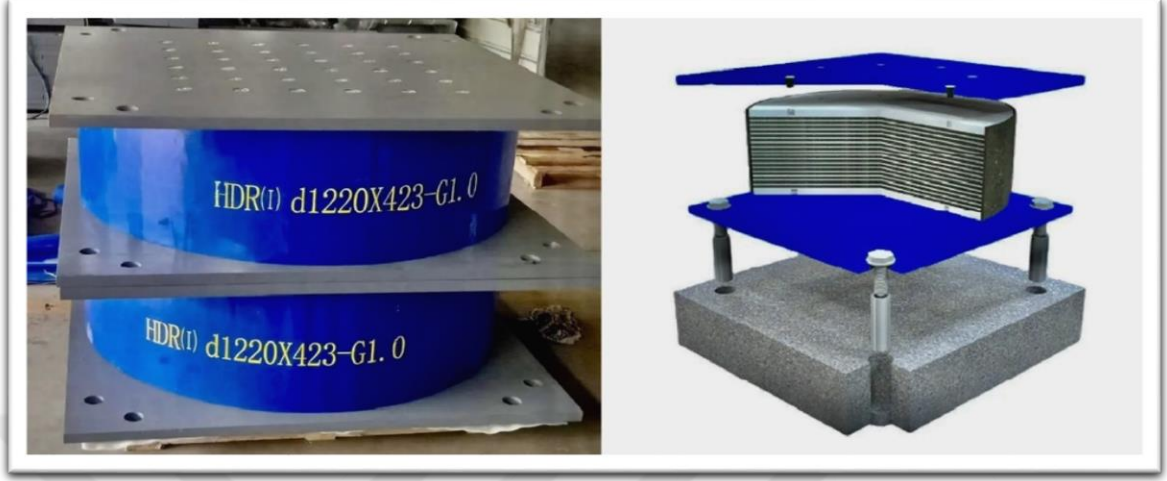
2.3.2.2. Yüksek Sönümlü Kauçuk Mesnetler (HDRB - High Damping Rubber Bearings)

Yüksek sönümlü kauçuk mesnetler (HDRB), doğal kauçuktan üretilen ve yüksek sönüm kapasitesi sayesinde ek sönümleyici sistemlere ihtiyaç duymayan izolatörlerdir. Düşük sönümlü mesnetlerle benzer bir yapıya sahip olup, üst ve alt kısımlarında geniş çelik plakalar bulunur. Kauçuk ve çelik plakaların sayısı, sistemin performansını doğrudan etkileyen parametrelerdendir.

HDBR’lerin sönüm kapasitesi, üretim aşamasında kauçuk malzemesine özel katkı maddeleri (saf karbon blok, yağlar, reçineler vb.) ilave edilerek artırılmaktadır. Yüksek seviyeli kayma deformasyonlarında bu katkı maddeleri sayesinde izolatörün sönüm oranı yaklaşık %15 seviyelerine ulaşmaktadır.

Yüksek sönümlü kauçuk mesnetler, küçük çevresel titreşimlere karşı filtre işlevi yaparak titreşimlerin yapıya iletilmesine engel olur. Bu fonksiyon sayesinde HDBR’ler metro hatları veya yoğun trafik gibi yüksek frekanslı düşey titreşimlerin bulunduğu ortamlarda konfor düzeyini de artırmaktadır. Bu sistemler, enerji sönümleme kapasitesi ve titreşimlerin yalıtımı özellikleri ile çoğu projelerde avantaj sağlarken, maliyet ve

sıcaklık hassasiyeti gibi faktörler nedeniyle de her yapı için uygun sismik kontrol tercihi olmayabilirler.



Şekil 2.22. Yüksek Sönümlü (Kauçuk) Mesnetler (HDRB)

Yüksek sönümlü kauçuk mesnetlerin genel tasarım ilkeleri ve avantajları aşağıda belirtildiği gibidir.

- ✓ **Rijitlik Kontrolü:** Yüksek sönümlü kauçuk mesnetlerde yatay rijitlik tasarımı, kauçuk tabaka kalınlığı sabit tutularak tabaka sayısının değiştirilmesiyle ayarlanır.
- ✓ **Burkulma Tasarım Sınırı:** İzolatör yüksekliği, burkulma riskini azaltmak için çapın yarısından fazla olmayacak şekilde sınırlandırılmıştır.
- ✓ **Mekanik Dayanım:** Çelik plakalar, kauçuk malzemesinin yanal deformasyonunu sınırlandırarak düşey rijitliği artırır, yatay yönde ise izolatörün esnekliğini korur.
- ✓ **Üretim ve Montaj Kolaylığı:** Standart üretim süreçlerine uygun olmakla birlikte, düşük sönümlü mesnetlere kıyasla montaj işçiliği ve üretim maliyetleri daha yüksektir.
- ✓ **Hesap ve Tasarım Uygunluğu:** Statik ve dinamik analizler kolay bir şekilde yapılabilir ve yapı tasarımına kolay entegre edilebilir.

- ✓ **Çevresel Dayanıklılık:** Yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklı olmakla birlikte, kauçuk bileşimine eklenen katkı maddeleri nedeniyle sıcaklık hassasiyeti farklı değer aralıklarında kauçuk malzemesinin mekanik özelliklerinin değişimine neden olabilir.
- ✓ **Ek Sönümleme Gereksinimi:** Doğal sönüm kapasitesinin artırılmış olması düşük sönümlü mesnetlerin aksine ek sönümleyici sistemlere ihtiyaç bulunmamaktadır.

2.3.2.3. Kurşun Çekirdekli Kauçuk Mesnetler (LRB - Lead Rubber Bearings)

Kurşun çekirdekli kauçuk mesnetler (LRB), diğer kauçuk mesnetlerden farklı olarak kauçuk tabakalar ve çelik plakalar ile birlikte merkezinde silindirik bir kurşun çekirdeğin yer aldığı sismik yalıtım sistemleridir. Bu tasarım, izolatörün hem yüksek rijitlik hem de enerji sönümleme kapasitesine sahip olmasını sağlar.

LRB'lerin en önemli bileşeni olan kurşun çekirdek, belirli bir yük altında plastik şekil değiştirebilen kristalize bir yapıya sahiptir. Deprem gibi dinamik yükler sırasında şekil değiştirerek enerjiyi sönümler ve sismik etkilerin yapıya doğrudan iletilmesine engel olur. Kurşun çekirdeğin boyutları, izolatörün başlangıç rijitliği ve ihtiyaç duyulan dayanım kapasitesine bağlı olarak belirlenir. Ayrıca kurşun çekirdek, yüksek kayma deformasyonlarını da sınırlandırarak izolatörün aşırı yer değiştirmesini engeller ve sönüm oranını yaklaşık %25 seviyelerine çıkararak yapının stabilitesini korumaya yardımcı olur.

Kauçuk tabakalar, kurşun çekirdeğin enerji sönümleme etkisini tamamlayarak, izolatörün deprem sonrası ilk konumuna geri dönmesini sağlar. Çelik plakalar ise yine diğer kauçuk mesnetlerde olduğu gibi kauçuk malzemenin yanıl deformasyonunu sınırlandırarak düşey yönde rijitliği artırırken yatay yönde de izolatörün esnekliğini korur.

LRB'ler, kauçuk ve kurşunun elasto-plastik özellikleri nedeniyle histerik sönümleyiciler gibi davranır. Bu tasarım, kuvvet - yer değiştirme ilişkisini doğrusal olmayan (non-lineer) duruma getirir ve böylece sistem büyük depremler sırasında etkili bir enerji sönümleme mekanizması oluşturur.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Kurşun çekirdekli kauçuk mesnetler, yüksek enerji sönümleme kapasitesi ve gelişmiş rijitlik kontrolü sayesinde büyük ölçekli yapılar ve deprem riski yüksek olan bölgelerde yapı mühendisleri tarafından tercih edilen en yaygın sismik yalıtım çeşidi olarak öne çıkmaktadır.



Şekil 2.23. Kurşun Çekirdekli Kauçuk Mesnetler (LRB)

Kurşun çekirdekli kauçuk mesnetlerin genel tasarım ilkeleri ve avantajları ise aşağıda belirtildiği gibidir.

- ✓ **Rijitlik Kontrolü:** Kurşun çekirdeğin boyutları ve kauçuk tabaka sayısı, ihtiyaç duyulan rijitlik ve yük taşıma kapasitesine göre optimize edilebilir.
- ✓ **Burkulma Tasarım Sınırı:** İzolatör yüksekliği, burkulma riskini azaltmak için çapın yarısından fazla olmayacak şekilde sınırlandırılmıştır.
- ✓ **Mekanik Dayanım:** Kurşun çekirdek, plastik şekil değiştirme kapasitesi sayesinde enerji sönümleyerek izolatörün yatay hareketlerini sınırlar ve dinamik yükler altında dayanımını artırır. Çelik plakalar ise, kauçuk malzemesinin yanal deformasyonunu engelleyerek düşey rijitliği artırırken, yatay yönde de esnekliği korur.

- ✓ **Üretim ve Montaj Kolaylığı:** Standart üretim süreçlerine uygun olup, yaygın kullanımı sayesinde diğer kauçuk mesnetli izolatörlere kıyasla üretimi ve montajı daha kolaydır.
- ✓ **Hesap ve Tasarım Uygunluğu:** Statik ve dinamik analizleri pratik bir şekilde yapılabilir ve yapı tasarımına kolay entegre edilebilir.
- ✓ **Çevresel Dayanıklılık:** Kauçuk malzemesi, -17°C ila $+82^{\circ}\text{C}$ dışında sıcaklık değişimlerinden etkilenebilir. Ancak, kurşun çekirdeğin değişken olmayan mekanik özellikleri sayesinde izolatör genel olarak dayanıklı bir performans sergiler.
- ✓ **Ek Sönümleme Gereksinimi:** Yüksek enerji sönümleme kapasitesi sayesinde ek sönümleme sistemlerine ihtiyaç bulunmamaktadır.

2.3.2.4. Sürtünmeli Sarkaç Mesnetler (FPB - Friction Pendulum Bearings)

Sürtünmeli sarkaç mesnetler (FPB), çelik malzemeden üretilmiş, düşük sürtünmeli ve yüksek yük taşıma kapasitesine sahip kayıcı yalıtım mekanizmalarıdır. Bu izolatörler, içbükey bir yatak üzerinde kayma hareketi sağlayan paslanmaz çelik mafsallarla çalışır. Sistem, sarkaç hareketi ve sürtünme mekanizması sayesinde sismik enerjiyi sönümleyerek yapının deprem sırasında daha güvenli bir şekilde salınım yapmasını sağlar.

FPB'lerin en önemli çalışma mekanizması, titreşim periyodunun yapı kütlesinden bağımsız olmasıdır. İzolatörün etkin rijitliği ve yalıtım periyodu, içbükey yüzeyin eğrilik yarıçapı ile belirlendiğinden yalnızca sarkaç yarıçapı değiştirilerek yalıtım periyodu ayarlanabilir. Bu durum yapı mühendislerine tasarım esnekliği sağlar. Deprem hareketi sırasında mafsallarda, içbükey kayma yüzeyi üzerinde kayarak üst yapının yükselmesine neden olur. Böylece kinetik enerji potansiyel enerjiye dönüşerek sismik etkiler etkin bir şekilde sönümlenir. Ayrıca izolatörün içbükey kayma yüzeyi dış çevresinde bulunan koruyucu çelik bariyer, deprem yüklerinin tasarım yüklerini aşması halinde izolatörün

2. KAYNAK ÖZETLERİ

ileri düzey yer deşiştirmelerini engelleyerek taşıyıcı sistem için önemli bir emniyet sağlamaktadır.

Sürtünmeli sarkaç mesnetlerin ikinci önemli çalışma mekanizması ise sürtünme kuvveti ile enerji sönümleyebilmesidir. Kayma yüzeyi yaklaşık %3,5 sürtünme katsayısına sahip teflon kaplama ile tasarlanarak, deprem kuvvetlerine karşı kontrollü bir enerji sönümleme süreci oluşturulmuştur. Yapı ağırlık merkezi ile mesnetlerin rijitlik merkezi düşey düzlemde birleşecek şekilde tasarlandığında, yapının burulma hareketi sınırlandırılmış ve taşıyıcı sistemin stabilitesi de sağlanmış olur.

Bunun yanı sıra, düzlemsel kayar mesnetler yapısal hareketlere izin vererek genellikle de yatay hareketleri kısıtlamadan düşey yükleri taşımak için tasarlanır. Düzlemsel kayar mesnetler, FPB'ler gibi kayma mekanizması ile çalışsa da, içbükey bir yüzey yerine düz bir kayma yüzeyi kullanır. Bu mesnetler, sıcaklık değişimlerinde kaynaklanan yapısal hareketlerin yönetilmesi gereken köprü ve büyük ölçekli bina projelerinde tercih edilmektedir.

FPB'ler, farklı yüzey malzemeleri ve geometri değişiklikleri ile çeşitli tasarım varyasyonlarına sahiptir. Bununla birlikte, yüksek düşey yüklerin söz konusu olduğu yapılarda, düşey tahribat riski olduğundan uygun konumlarda kauçuk izolatörler ile hibrit sistemler oluşturularak uygulanması tavsiye edilmektedir.



Şekil 2.24. Sürtünmeli Sarkaç Mesnetler (FPB)

Sürtünmeli sarkaç mesnetlerin genel tasarım ilkeleri ve avantajları ise aşağıda belirtildiği gibidir.

- ✓ **Rijitlik Kontrolü:** İzolatörün rijitliği ve yalıtım periyodu, sarkaç yarıçapının değiştirilmesiyle kolayca ayarlanabilir.
- ✓ **Burkulma Tasarım Sınırı:** Sistem mekanizması düşey hareketleri sınırlandırarak stabiliteyi artırarak izolatörün burkulma riskini minimize eder.
- ✓ **Mekanik Dayanım:** Sürtünme kuvveti ve sarkaç hareketi birleşimi sayesinde deprem enerjisini etkin bir şekilde sönmeler ve üst yapıya iletilen ivmeyi azaltır.
- ✓ **Üretim ve Montaj Kolaylığı:** Tasarım geometrisi sayesinde montajı kolay olup, mevcut yapılara da entegrasyonu sağlanabilir.
- ✓ **Hesap ve Tasarım Uygunluğu:** Statik ve dinamik analizleri pratik bir şekilde yapılabilir ve yapı tasarımına kolay entegre edilebilir.
- ✓ **Çevresel Dayanıklılık:** Yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklıdır, yangın sırasında ek bir önleme ihtiyaç duyulmadığı gibi yapının ısıl genleşmelerine uyum sağlar.
- ✓ **Ek Sönümleme Gereksinimi:** Doğal sürtünme mekanizması sayesinde ek sönümleyici sistemlere ihtiyaç bulunmamaktadır.

2.3.2.5. Elastik Sürtünmeli Mesnetler (R-FBB - Resilient-Friction Base Bearings)

Elastik sürtünmeli mesnetler (R-FBB), sismik yalıtım sistemlerinde kayıcı ve elastomerik davranışın bir araya getirildiği kayıcı yalıtım mekanizmalarıdır. Bu sistem, iç içe geçmiş teflon kaplamalı kayıcı plakalar ve merkezi bir kauçuk çekirdekten oluşmaktadır. Bu tasarım, kayma hareketi sırasında ortaya çıkan yüksek sürtünme katsayısının kontrol altına alınmasını ve sistemin kendini dengeleyerek dinamik yüklerden sonra ilk konumuna dönmesini sağlar.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

R-FBB'lerin temel çalışma ilkesi, izolatör içindeki çok katmanlı kayma yüzeyleri sayesinde kayma hızını düşürerek sürtünme katsayısını optimize etmektir. Üst ve alt yüzeyler arasındaki hız, ara yüzeylerin sayısına bölünerek dengeli bir kayma hareketi sağlanır. Merkezi kauçuk çekirdek ise sistemin düşey yük taşıma kapasitesine katkıda bulunmaz, ancak yatay yer değiştirme ve hızın izolatör boyunca eşit olarak yayılmasını sağlar. Ayrıca izolatörün yalıtım etkisini artırmak ve yük dağılımını iyileştirmek amacıyla, kauçuk çekirdeğin içine de merkezi bir çelik çubuk entegre edilmiştir. Böylece, kayma hareketi tek bir ara yüzeye yüklenmeden daha dengeli bir şekilde dağılır.

Elastik sürtünmeli mesnetlerde, sürtünme kuvveti ana enerji sönümleme mekanizmasını oluştururken, esnek kauçuk elemanlar ise kayıcı izolatörün ilk konumuna dönmesini sağlayarak sistemin stabilitesini artırır. Bu özellik, rijitlik merkezi ile kütle merkezinin yalıtım seviyesinde birleşmesini sağlayarak simetrik olmayan yapılarda da etkin bir şekilde kullanılmasını sağlar.



Şekil 2.25. Elastik Sürtünmeli Sarkaç Mesnetler (R-FBB)

Elastik sürtünmeli mesnetlerin genel tasarım ilkeleri ve avantajları ise aşağıda belirtildiği gibidir.

- ✓ **Rijitlik Kontrolü:** Kauçuk çekirdek ve kayıcı tabakalar, sistemin rijitliğini ve yalıtım performansını optimize edecek şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca sürtünme kuvveti, rüzgâr gibi düşük genlikli yatay hareketlerden yapıyı korur.

- ✓ **Burkulma Tasarım Sınırı:** Esnek kauçuk çekirdek, sistemin stabilitesini artırarak burkulma riskini sınırlandırmış olur.
- ✓ **Mekanik Dayanım:** Sürtünme kuvveti ve elastomerik elemanların birleşimi, sistemin sismik enerjiyi etkili şekilde sönümlemesini sağlar.
- ✓ **Üretim ve Montaj Kolaylığı:** Standart üretim süreçlerine uygun olup, mevcut yapılara da entegrasyonu sağlanabilir.
- ✓ **Hesap ve Tasarım Uygunluğu:** Statik ve dinamik analizleri pratik bir şekilde yapılabilir, yapı tasarımına kolay entegre edilebilir.
- ✓ **Çevresel Dayanıklılık:** Kauçuk çekirdeğin düşük sıcaklıklarda sertleşme, yüksek sıcaklıklarda ise elastikiyet kaybı gösterebileceği dikkate alınmalıdır.
- ✓ **Ek Sönümleme Gereksinimi:** Sürtünme mekanizması sayesinde ek sönümleyici sistemlere ihtiyaç bulunmamaktadır.

Elastomer (kauçuk) mesnetli sistemler ile kayıcı mesnetli sistemlerin dışında her iki mesnet türünün çalışma ilkeleri ve malzeme türleri bir araya getirilerek oluşturulan hibrit taban (seviye) yalıtım mekanizmalarına da "Elastomer - Kayıcı Karma Mesnetli Sistemler" adı verilir. Bu yalıtım mekanizmaları ve özellikleri aşağıda belirtildiği gibidir;

Taisei Deprem Süspansiyon Sistemi (TASS): Elastik sürtünmeli mesnetlere benzer tasarıma sahip olup düşey yükleri paslanmaz çelik - teflon elemanlar aracılığıyla taşıyan bir sismik yalıtım mekanizmasıdır. TASS'lerde, dinamik yükler sonrasında sistemi denge konumuna geri almak için düşey yük taşımayan kompozit neopren (sentetik kauçuk) mesnetler kullanılır. Elastomer (çelik - sentetik kauçuk) mesnetlerin düşey yük taşıyamaması, yatay yükler altında çekme gerilmelerine neden olur ve bu durum sistemin başlıca dezavantajlarından biridir. Ayrıca, kayma yüzeylerinin hassas hız ayarlarına bağlı olması, sistem tasarımının diğer taban (seviye) yalıtım türlerine göre daha karmaşık olmasına neden olur.

Fransa Elektrik Kurumu Sistemi (EDF): Fransız Elektrik Kurumu'nun desteğiyle nükleer santrallerde kullanıma yönelik olarak geliştirilmiş bir taban (seviye) yalıtım mekanizmasıdır. Bu sistem, tabakalı kauçuk mesnetlerin tasarımı ile benzer olup kompozit neopran tabakaları paslanmaz çelik ile temas halindeki kurşun-bronz alaşımıyla birleştirilerek kayma yüzeyleri meydana getirilmiş ve bu kayma yüzeyi de elastomerik izolatörün üstüne yerleştirilmiş olup sürtünme katsayısı ise 0.2 olarak belirlenmiştir. Bu değer, izolatörün servis ömrü boyunca kararlı bir performans göstermesi amacıyla tasarlanmıştır. EDF'ler, düşük bir yer değiştirme kapasitesine sahip suni kauçuk tamponlar içerir ve ± 5 cm'yi aşan yer değiştirmelerde kayıcı eleman devreye girerek ek hareket imkânı sağlar. Ancak, dinamik yükler sonrası izolatörü eski konumuna getiren herhangi mekanizma bulunmadığından kalıcı yer değiştirmeler meydana gelebilir. Bu nedenle de sistem günümüze kadar yalnızca Güney Afrika Cumhuriyeti'nde inşa edilen bir nükleer santralde uygulanmıştır.

Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi Sistemi (EERC): Elastomerik ve kayıcı mesnetlerin bir araya getirilmesiyle oluşturulan hibrit bir sismik yalıtım yöntemi olup Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi (EERC) / Kaliforniya Üniversitesi tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntemde yapının taşıyıcı sistem iç kolonları, paslanmaz çelikten üretilmiş teflon kaplı kayıcı mesnetler üzerine yerleştirilirken, dış kolonlar ise düşük sönümlü doğal kauçuk mesnetler ile desteklenmiştir. EERC'lerde, elastomerik izolatörler yapının burulma davranışını kontrol altına alırken, kayıcı elemanlar sürtünme yoluyla enerji sönümleme görevi üstlenir. Böylece izolatör, deprem sırasında hem sismik enerjiyi etkin bir şekilde sönümleme hem de sonrasında kendini başlangıç noktasına geri alma yeteneğine sahip olur. Bu sistem, Kaliforniya / Amerika Birleşik Devletleri'nde bir hastanenin güçlendirme çalışmalarında uygulanmıştır.

Ayrıca taban (seviye) yalıtım mekanizmaları sınıfı içerisinde, çalışma ilkeleri ve malzeme türü bakımından yukarıda anlatılan yalıtım sistemlerden farklı olarak yay tabanlı "Helisel Yay Mesnetler (HSB - Helical Spring Bearings)" sismik yalıtım sistemlerinde yatay hareketlerin yanı sıra düşey titreşimlerin de kontrol altına alınmasını sağlayan özel tasarımlar içerisinde yer alır. Geleneksel kauçuk esaslı ve kayıcı mesnetler genellikle yatay hareketlerin yalıtımı için kullanılırken, büyük makine titreşimlerinin olduğu enerji santralleri ve fabrikalar gibi yapılar için düşey yalıtım da önem

kazanmaktadır. Bu tür yapılarda sismik ve günlük çalışma faaliyetleri nedeniyle meydana gelen titreşimlerin düşey bileşenlerini sınırlamak amacıyla helisel yaylardan oluşan yalıtım sistemleri tercih edilmektedir.

HSB’lerde kullanılan çelik yaylar, yalnızca basınca dayanıklı olduğu için çekme gerilmelerine karşı zayıftır. Bu sorunu gidermek amacıyla, hem basınç hem de çekme kuvvetlerine dayanabilen viskoz sönümlü yay sistemleri geliştirilmiştir. Bu sistemler sayesinde düşey doğrultuda da sönümleme sağlanabilmektedir. Ayrıca, yaylar üst ve alt kısımlarından çelik plakalara vidalanarak da izolatöre çekme dayanımı kazandırılabilir.

Helisel yay mesnetlerde, düşey frekans ile yatay frekans arasındaki fark kauçuk mesnetlere göre daha azdır. Düşey frekans, yatay frekansa göre birkaç kat daha fazla büyüklükte olup, yalıtım etkinliği açısından dikkate alınması gereken bir parametredir.

HSB’lerin uygulanması sırasında yapının ağırlık merkezi ile rijitlik merkezinin aynı seviyede olması, sistemin daha dengeli çalışmasını sağlar. Ancak, yapının ivmesini yeterince azaltamaması ve şiddetli salınım hareketine neden olması nedeniyle binalarda kullanımı sınırlı kalmıştır. Günümüzde helisel yay mesnetler, özellikle endüstriyel tesisler ve ağır makineler içeren yapılar için optimize edilerek geliştirilmekte ve viskoz sönümleyicilerle birlikte kullanılarak daha dayanıklı hale getirilmektedir.

2.3.2.6. Metalik Sönümleyiciler (MD - Metallic Dampers)

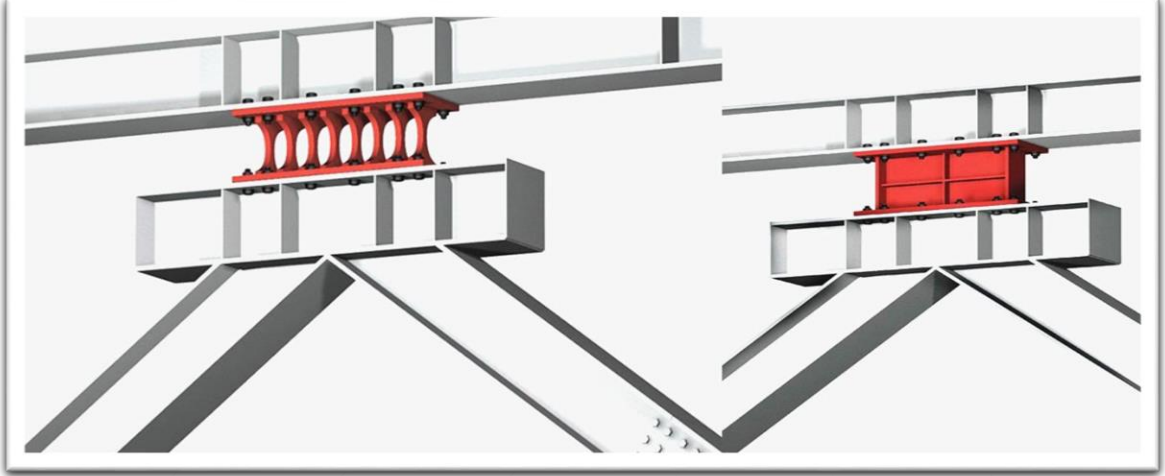
Metalik sönümleyiciler (MD), kurşun veya yumuşak çelik gibi sünek metallerin plastik deformasyon enerjisinden faydalanarak sismik enerjiyi dağıtan pasif sönümleyici mekanizmalardır. Bu sönümleme mekanizması, metalin akma davranışı ve şekil değiştirme kapasitesi üzerine kuruludur. Deprem etkileri sonrası şekil değiştiren sönümleyiciler kolayca değiştirilerek sistemin işlevselliği korunabilir.

MD’lerde yumuşak çelik tercih edilir, çünkü yüksek süneklik, daha fazla plastik deformasyon enerjisi sönümlenmesini sağlar. Çelik yapı malzemesinin içerisindeki karbon oranı arttıkça sertlik ve mukavemet miktarı artsa da süneklik azalır ve malzeme daha gevrek hale gelir, bu nedenle de düşük karbonlu çelikler daha uygundur. Ayrıca,

paslanmaya karşı dayanıklı malzemelerin kullanımı, sönümleyicilerin uzun ömürlü olmasını sağlar.

Metalik sönümleyiciler; taşıyıcı sistem içerisindeki yerleşim tasarımı, eksenel çalışan sönümleyiciler çapraz elemanlarla, kesme ve eğilmeye çalışanlar ise üst katın kirişleri ile düşey taşıyıcı elemanlar arasına yerleştirilerek yapılır. MD'ler; X, dikdörtgen veya üçgen plakalar şeklinde üretilerek gerilmelerin eşit dağılımı sağlanır ve üniform akma elde edilir. Yaygın olarak ADAS (Additional Damping and Stiffness) ve TADAS (Triangular - Plate Added Damping and Stiffness) tipi sönümleyiciler kullanılır. Bunların yanı sıra, kutu formunda üretilen BSD (Box - Shaped Damper) ve U, C, S şekilli akordeon tipinde tasarlanan AMD (Accordion Metallic Damper) sönümleyiciler de mevcuttur.

Metalik sönümleyicilerin avantajları arasında yüksek güvenilirlik, sıcaklık değişimlerine karşı dayanım ve mühendislik açısından iyi bilinen bir teknoloji olması yer alır. Dezavantajı ise, büyük depremler sonrası sönümleyicilerin zarar görebilmesidir.



Şekil 2.26. Metalik Sönümleyiciler (MD / ADAS - BSD)

2.3.2.7. Sürtünmeli Sönümleyiciler (FD - Friction Dampers)

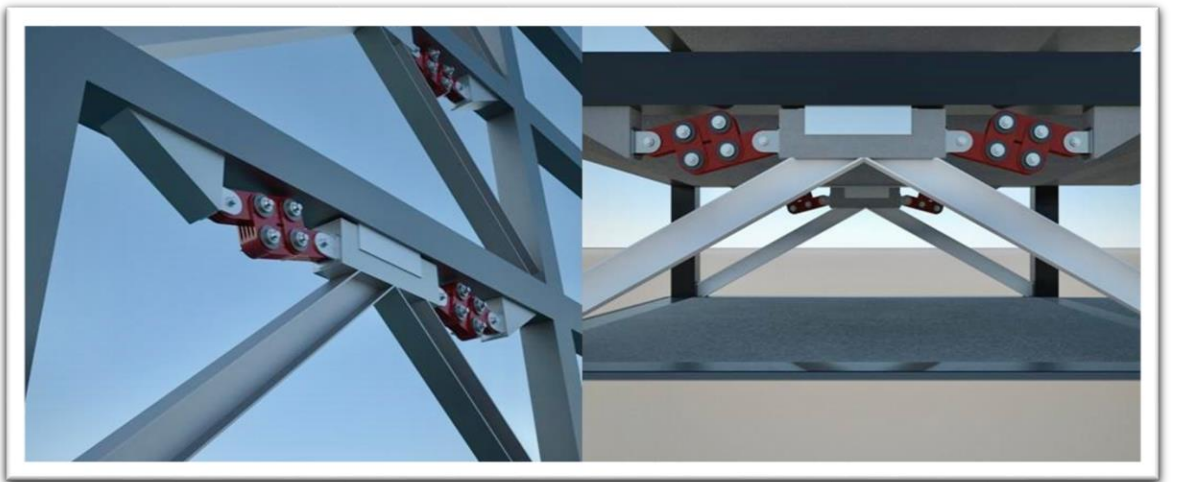
Sürtünmeli sönümleyiciler (FD), sistem içindeki kayma hareketiyle oluşan sürtünme enerjisini ısıya dönüştürerek sismik enerjiyi sönümleyen pasif kontrol mekanizmalarıdır. Araç fren sistemlerinden esinlenerek geliştirilen bu mekanizma,

yapıya gelen titreşimleri önlemek ve elastik deformasyon kapasitesini koruyarak kontrol sonrası eski konumuna döndürmek amacıyla tasarlanmıştır.

FD'ler, kat seviyelerinde bulunan çapraz elemanlar arasına yerleştirilerek kinetik enerjinin yapı içinde eşit dağılmasını sağlar ve sönüm kapasitesini artırır. Ancak, geri merkezlenme özelliğine sahip olmadıkları için büyük depremler sonrası kalıcı yer değiştirmelere neden olabilirler.

Sürtünmeli sönümleyiciler zaman içerisinde daha verimli ve düşük maliyetli olması amacıyla T şekilli plaka içeren yeni bir tasarım geometrisine sahip olmuştur. X şeklinde çapraz çelik çubuklardan oluşan sistemler en yaygın kullanılan modeller arasında olup, kayma yüzeyleri çelik, pirinç veya bronz malzemelerle kaplanarak aşınma direnci artırılmaktadır. FD'lerin performansı metal yüzeylerin özelliklerine, korozyona dayanıklılığına ve bakım süreçlerine bağlı olup yüksek krom içeren çelik malzemelerin, korozyona karşı daha dayanıklı olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca FD'lerde, pürüzsüz ve cilalı yüzeylerin, korozyonlu veya yağlanmış yüzeylere kıyasla yaklaşık %50 oranında daha az enerji kaybına neden olmaktadır.

Sürtünmeli sönümleyiciler, yüksek enerji sönümleme kapasitesine ve sıcaklık değişimlerine karşı dayanıklılığa sahiptir; ancak kayma yüzeylerinin zamanla aşınması ani kaymalara ve istenmeyen titreşimlere yol açması en önemli dezavantajlarıdır.



Şekil 2.27. Sürtünmeli Sönümleyiciler (FD)

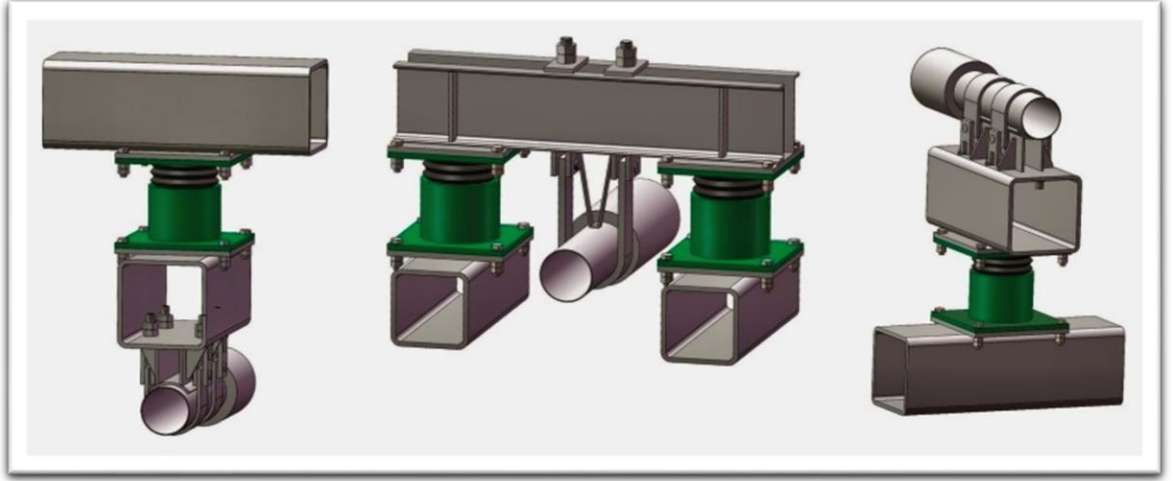
2.3.2.8. Visko-Elastik Sönümleyiciler (VED - Visco-Elastic Dampers)

Visko-elastik sönümleyiciler (VED), iki plaka arasına yerleştirilen visko-elastik malzemenin kayma deformasyonu ile sismik enerjiyi sönümleyen pasif kontrol mekanizmalarıdır. Plakalar bir piston gibi çalışarak hareket eder ve bu esnada kayma hareketinden doğan kinetik enerji, büyük oranda ısı enerjisine dönüştürülerek yapının titreşim kontrolü sağlanır.

VED'ler, hem sıvıların akışkanlık (viskozite) hem de katıların elastiklik özelliklerini gösteren karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu sönümleyiciler hıza bağlı çalışan sistemler olup, kullanılan malzemenin viskozitesine göre enerji sönümleme kapasitesi belirlenir. Genellikle karbon polimer esaslı katı malzemeler tercih edilir ve malzeme deformasyon hızına bağlı olarak farklı sönümleme özellikleri sergileyebilir.

VED'lerin performans kapasitesi, sıcaklık ve frekans değişimlerinden doğrudan etkilenmektedir. Sıcaklık arttıkça enerji yayılımı azalır ve sönümleme kapasitesi düşer. Bu nedenle, çevresel sıcaklık değişimleri visko-elastik sönümleyiciler için kritik bir tasarım parametresidir. Malzeme kauçuk türevleri ve polimer esaslı kompozit malzemelerden üretilmekte olup, plakalar arasına dikdörtgen, kare veya dairesel formda yerleştirilebilir. Bu sistemler, Columbia Center / Kolombiya ve Two Union Square / ABD gibi yapılarda, rüzgâr etkisini azaltmak için de tercih edilmiştir. Visko-elastik sönümleyiciler, yalnızca deprem etkilerine karşı değil, rüzgâr yüklerini de sönümleyerek yapısal titreşimleri azaltmada etkin bir rol oynamaktadır.

Visko-elastik sönümleyicilerin avantajları arasında, deplasman hareketlerinde aktif duruma gelmesi, yapısal modellemesinin kolay olması ve merkezlenme özelliğine sahip olması yer alır. Ancak, çevresel koşullara duyarlı olması, visko-elastik malzemenin zamanla plakalar arasından sıyrılma riski ve düşük deplasman kapasitesi, sistemin en önemli dezavantajları arasındadır.



Şekil 2.28. Visko-Elastik Sönümleyiciler (VED)

2.3.2.9. Ayarlı Kütle Sönümleyiciler (TMD - Tuned Mass Dampers)

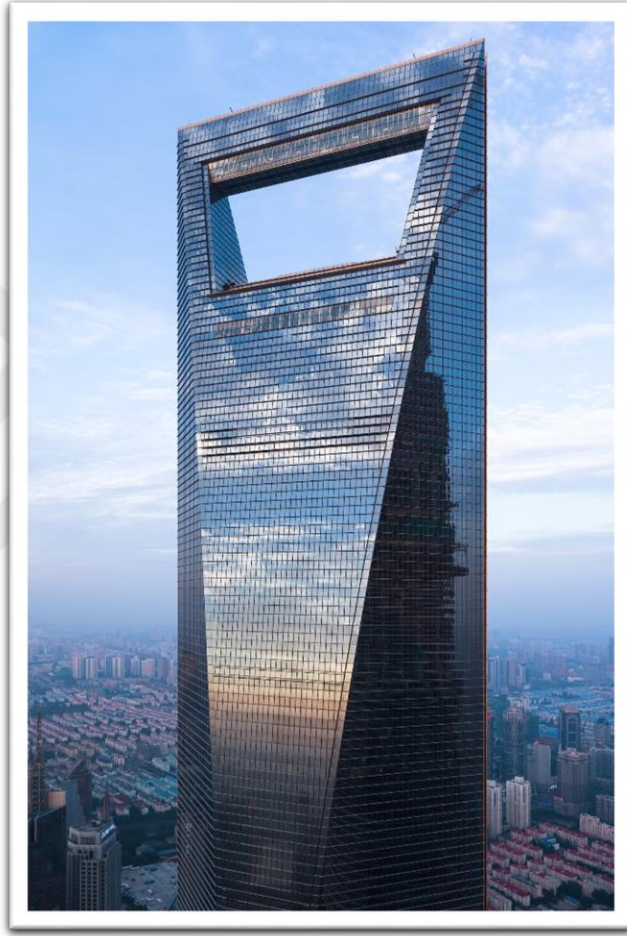
Ayarlı kütle sönümleyiciler (TMD), bir kütle, yay ve viskoz sönümleyiciden oluşan, yapıya gelen dinamik yükleri azaltmak için eklenen pasif kontrol mekanizmalarıdır. Bu sistemlerin temel çalışma ilkesi, yapının belirli bir titreşim moduna uyum sağlayarak, bu moddaki enerjinin bir kısmını sönümleyiciye aktarmak ve böylece yapı üzerindeki titreşim etkisini azaltmaktır.

Ayarlı kütle sönümleyici sistemlerde, katı bir kütle (çelik veya beton), bir yay ve bir sönümlenme mekanizması paralel olarak bağlanmıştır. TMD, ana yapı ile zıt fazda hareket ederek atalet kuvvetleri sayesinde enerjiyi sönümler. TMD'lerin etkinliği, sistemin frekansının yapının doğal frekansına yakın bir değerde ayarlanmasına bağlıdır. Doğru frekans seçimi ile TMD yapıya gelen dinamik yükleri karşılayarak yer değiştirme hareketine ters yönde çalışır ve sönümlenme sağlar.

TMD'lerin en yaygın kullanım alanları, rüzgâr ve deprem etkilerine maruz kalan yüksek yapılar, köprüler, kuleler ve bacalar ile araç, yaya ve makine titreşimlerinden etkilenen endüstriyel yapılardır. Özellikle yüksek genlikli rüzgâr yüklerine karşı etkili olan bu sistem, son yıllarda sismik kuvvetlerin kontrolü için de başarılı bir şekilde uygulanmaktadır. Dünya genelinde TMD'lerin kullanıldığı en önemli örnek, Şanghay Dünya Finans Merkezi'nin dinamik rüzgâr kuvvetlerinden kaynaklanan salınımını

azaltmak amacıyla 90. kat seviyesinde ve her biri 1500 kN ağırlığa sahip iki adet sönümleyici ünitesi yerleştirilmiştir.

Ayarlı kütle sönümleyiciler; basit tasarımı, düşük bakım gereksinimi ve geniş uygulama alanları sayesinde önemli avantajlar sağlamakla birlikte, sistemin verimli çalışabilmesi için doğru frekans ve kütle ayarlarının yapılması kritik öneme sahiptir.



Şekil 2.29. Ayarlı Kütle Sönümleyiciler (TMD) - Şanghay Dünya Finans Merkezi / Çin

2.3.2.10. Ayarlı Sıvı Sönümleyiciler (LTD - Tuned Liquid Dampers)

Ayarlı sıvı sönümleyiciler (TLD), ayarlı kütle sönümleyicilere benzer şekilde çalışan, ancak kütle olarak sıvı malzemeler kullanan pasif kontrol mekanizmalarıdır. Bu sistemlerin temel çalışma ilkesi; yapıya gelen titreşimler karşısında sistem içerisinde bulunan sıvının çalkalanma hareketi sayesinde enerjinin bir kısmı sönümlenerek yapı üzerindeki dinamik yük etkisi azaltılır.

TLD'ler, sıvının çalkalanma hareketini yapının doğal frekansına uygun şekilde ayarlayarak sönümleme sağlar. Bu sistem, özellikle rüzgâr kaynaklı titreşimleri azaltmada etkilidir. Genellikle kısmen doldurulmuş bir tank içindeki sıvının hareketiyle çalışır ve enerji dağıtımını optimize etmek için tank geometrisi ve sıvı viskozitesi dikkatle belirlenir.

Ayarlı sıvı sönümleyiciler, klasik salınım yapan sönümleyiciler ve U şeklinde ayarlı sıvı kollu sönümleyiciler olmak üzere iki gruba ayrılır. TLD'lerin sönümleme kapasitesi; kütle, frekans ve sıvının yoğunluk ile birlikte viskozitesi gibi özelliklerine bağlıdır. Kütle oranı genellikle %5 olarak alınsa da, %1 ila %4 arasında değişebilir. Optimum sönümleme, farklı yoğunluktaki sıvı karışımları veya tank içerisine eklenen katı bilyeler veya çubuklarla da artırılabilir. TLD'ler içerisindeki sıvı malzeme, çalkalanma hareketi sırasında belirli bir miktarı pasif kalarak ölü yük oluştururken, geri kalan kısmı aktif olarak hareket eder. Bu nedenle, tasarım sürecinde aktif ve pasif sıvı yükleri dikkate alınarak hesaplamalar yapılmalıdır.

Ayarlı sıvı sönümleyiciler, basit tasarımı, bakım gerektirmeyen yapısı ve rüzgâr ile deprem kaynaklı titreşimleri etkin bir şekilde azaltması nedeniyle avantajlı bir sistemdir. Ancak, sistemin optimum performansı için doğru frekans ayarı gerektirmesi, sıvının zamanla viskozitesinin değişebilmesi ve sınırlı yer değiştirme kapasitesine sahip olması gibi bazı dezavantajlara sahiptir.

LTD'lerin kullanıldığı önemli yapılar arasında yer alan Comcast Merkezi'nde, dinamik rüzgâr kuvvetlerinin neden olduğu salınımı azaltmak amacıyla en üst katta 1135,5 m³ hacme sahip bir sönümleyici ünite yerleştirilmiştir.



Şekil 2.30. Ayarlı Sıvı Sönümleyiciler (LTD) - Comcast Merkezi / ABD

2.3.2.11. Akışkan Viskoz Sönümleyiciler (FVD - Fluid Viscous Dampers)

Akışkan viskoz sönümleyiciler (FVD), yapıları deprem ve rüzgâr gibi dinamik ve termal etkilerden kaynaklanan taşıyıcı sistem hareketlerine karşı enerji sönümleyerek dayanımlarını daha ileri düzeye çıkarmak amacıyla geliştirilen pasif sismik kontrol mekanizmalarıdır.

İlk olarak 1960'lı yıllarda NASA tarafından uzay araştırmalarında kullanılmak üzere geliştirilmiş, ardından ABD (Amerika Birleşik Devletleri) Silahlı Kuvvetleri ve havacılık endüstrisinde kullanılmıştır. 1992 yılında, ABD'de Dr. Michael C. Constantinou (New York Eyalet Üniversitesi Buffalo Kampüsü'nde (University at Buffalo, SUNY) İnşaat, Yapısal ve Çevre Mühendisliği Bölümü, Profesör) ve Dr. Mark D. Symans (Rensselaer Politeknik Enstitüsü'nde (Rensselaer Polytechnic Institute) İnşaat ve Çevre Mühendisliği Bölümü, Profesör), viskoz sönümleyicilerin yapı mühendisliği

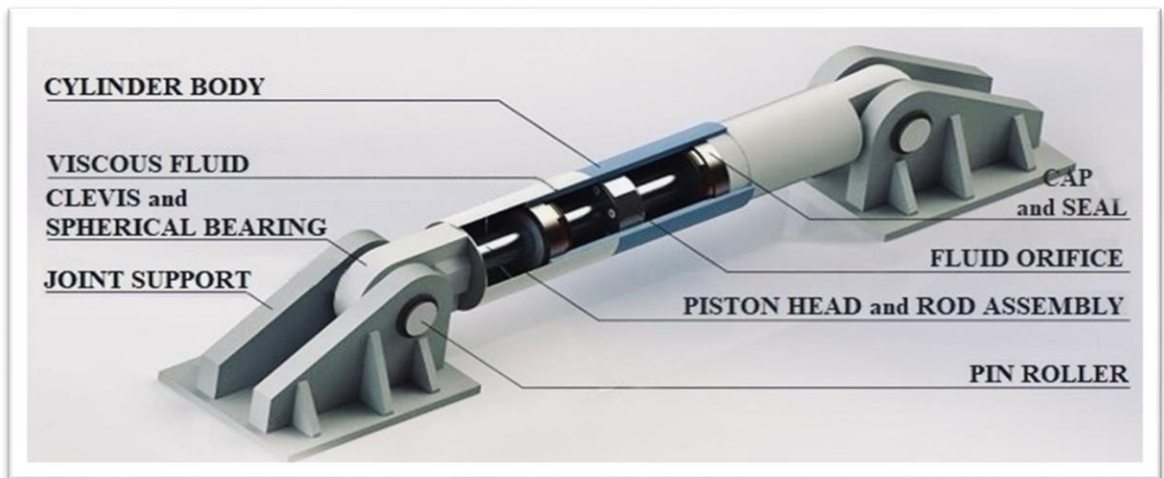
2. KAYNAK ÖZETLERİ

alanındaki potansiyelini araştırmıştır. Dr. Michael C. Constantinou ve Dr. Mark D. Symans, bu teknolojiyi yapı mühendisliği alanına uyarlayarak sismik performans üzerindeki etkilerini incelemiştir. Bu çalışmalar sonucunda, viskoz malzeme içeren ilk sönümleyici geliştirilmiş ve yapı mühendisliği alanında binalar, köprüler ve diğer ileri mühendislik yapılarında kullanılmasının önü açılmıştır.

Viskoz sönümleyiciler, visko-elastik sönümleyicilerle benzer şekilde hıza bağlı olarak çalışan ve enerjiyi kontrollü bir şekilde sönümleyen mekanizmalardır. Geleneksel yapısal sistemlerde enerji, malzemelerin plastik deformasyonu ile sönümlenirken, viskoz sönümleyiciler bu enerjiyi pistonlar arasında hareket eden akışkan viskoz sayesinde ısıya dönüştürerek taşıyıcı sistem elemanlarında ki muhtemel hasarları minimize eder.

Silikon tabanlı viskoz sıvının, pistonlar arasındaki itme-çekme hareketiyle direnç oluşturması prensibine dayanan bu sistem, yapıların uzun ömürlü ve güvenli olmasını sağlar. Viskoz sönümleyicilerin geniş bir frekans aralığında etkili olması, sıcaklık değişimlerine karşı dayanıklılığı ve darbelere karşı sıkıştırılmaz özelliği, onları yapı mühendisliği faaliyetlerinde önemli bir çözüm haline getirmiştir.

Başlangıçta havacılık ve askeri sanayide kullanılan bu teknoloji, zaman içerisinde yapı mühendisliğinde de kullanılmaya başlanmış ve yüksek binalar, köprüler ve kritik altyapı projelerinde tercih edilen bir sismik koruma yöntemi haline gelmiştir.



Şekil 2.31. Akışkan Viskoz Sönümleyici (FVD) Bileşenleri

Akışkan viskoz sönümleyiciler, aşağıda belirtilen bileşenlerden oluşmakta olup her bir bileşen titreşim enerjisinin verimli bir şekilde sönümlenebilmesi ve yapı üzerindeki dinamik yükleri dengeleyerek taşıyıcı sistem hasar düzeyinin azaltmasını sağlamak üzere tasarlanmıştır. FVD’lerde bulunan bileşenler ve özellikleri;

➤ **Silindir Gövdesi (Cylinder Body):** Akışkan viskoz sönümleyicinin temel bileşenlerinden biri olup, hidrolik akışkanın muhafaza edildiği ve basınç altında piston hareketinin gerçekleşmesini sağlayan yapıdır. Yüksek mukavemetli malzemelerden üretilerek değişken basınç koşullarına uyum sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Bu özellik, sönümleyicinin uzun ömürlü ve verimli çalışmasını destekler. İç yüzeyinde bulunan özel kaplamalar, sızdırmazlığı koruyarak sistemin güvenilirliğini artırırken, piston hareketi sırasında sürtünmeyi minimum seviyeye indirir. Böylece, enerji kayıpları azaltılarak daha kontrollü ve akıcı bir hareket sağlanır. Ayrıca, aşınmaya karşı dirençli bu kaplama, mekanik dayanıklılığı artırarak sistemin uzun vadede stabilitesini korur ve hidrolik akışkanın stabilitesini muhafaza etmesine katkıda bulunur.

➤ **Akışkan Viskoz (Fluid Viscous):** Akışkan viskoz, sönümleyici içerisinde enerjinin sönümlenmesini sağlayan temel bileşendir ve sistemin etkinliğini doğrudan belirleyen en kritik unsurlardan biridir. Genellikle yüksek viskoziteye sahip silikon tabanlı yağlar veya özel olarak formüle edilmiş viskoz polimerler kullanılarak üretilir. Bu akışkanların tercih edilme nedeni, yüksek sıcaklık stabilitesi, uzun ömürlü kullanım ve düşük bakım gereksinimi sağlamasıdır. Bu akışkanın en belirgin özelliği, sıcaklık değişimlerinden minimum düzeyde etkilenerek sabit akış direnci sağlamasıdır. Geleneksel hidrolik akışkanlardan farklı olarak, geniş sıcaklık aralıklarında viskozite değişimi göstermeyen özel bileşenlere sahiptir. Böylece, sönümleyici -40°C ila +70°C gibi geniş bir sıcaklık aralığında istikrarlı performans gösterebilir. Akışkanın bir diğer önemli özelliği düşük sürtünme katsayısına sahip olmasıdır, bu sayede hareketli bileşenler üzerinde aşınmayı azaltarak sistemin uzun ömürlü olmasını sağlar. Ayrıca, belirli bir elastikiyet katsayısına sahip olması, anlık yük değişimlerinde akışkanın darbe emici özellik göstermesine olanak tanır. Bu durum, özellikle sismik hareketler, rüzgâr yükleri veya dinamik titreşimler gibi ani yüklenmelerde enerji sönümleme kapasitesini artırarak yapısal stabiliteyi güçlendirir. Akışkan viskoz, piston başlığı içinden belirli daraltılmış geçiş deliklerinden (fluid orifice) akarak kinetik enerjiyi hidrolik direnç

oluşturarak ısı enerjisine dönüştürür. Bu mekanizma, deprem gibi dinamik yüklerin kontrollü bir şekilde sönümlenmesini sağlar ve yapı elemanlarının maruz kaldığı deformasyonları sınırlandırarak taşıyıcı sistemin güvenliğini artırır.

➤ **Piston Başlığı ve Mil Grubu (Piston Head and Rod Assembly):** Piston başlığı, akışkan viskoz içerisinde hareket ederek enerjinin kontrollü bir şekilde sönümlenmesini sağlar. Piston mili ise, paslanmaz çelikten üretilmiş olup, yükleri minimum deformasyon ile taşıyacak şekilde tasarlanmıştır. Bu bileşenler, sistem içerisindeki basınç farklarının düzenlenmesini sağlayarak sönümleme performansını optimize eder. Hidrolik basıncı mekanik harekete dönüştüren piston, sönümleyici sistemin en kritik bileşenlerinden biridir. Silindir gövdesi içerisinde doğrusal hareket gerçekleştirerek titreşimlerin etkin bir şekilde sönümlenmesine katkı sağlar. Piston yüzeyi, sürtünme kayıplarını minimize edecek şekilde işlenmiş olup, dinamik yükleri etkili bir şekilde dağıtarak yapının stabilitesini rijitliği artırmadan korur. Pistonun hareketini doğrudan ileten piston mili, yüksek mukavemetli çelikten üretilmiş olup, eğilme ve burulma gibi dış etkilere karşı maksimum direnç gösterecek şekilde tasarlanmıştır. Sönümleyicinin dayanıklılığını artıran bu bileşen, hidrolik sistemin genel performansını iyileştirirken enerji kayıplarını da minimize eder. Milin yüzeyi aşınmaya karşı özel bir kaplama ile korunarak uzun vadeli kullanım ömrü sağlanmış ve bakım ihtiyacı azaltılmıştır. Piston milinin uzun ömürlü ve verimli çalışmasını sağlamak amacıyla, dış ortamdan gelen toz, kir ve mekanik aşınmalara karşı koruma sağlayan piston mil koruyucu kapsülü entegre edilmiştir. Bu kapsül, piston milini dış etkenlerden izole ederek sistemin stabilitesini artırırken, sürtünme ve deformasyonu minimize ederek bakım gereksinimlerini azaltır. Böylece sönümleyici, zorlu çevresel koşullarda dahi etkin performans sergilemeye devam eder.

➤ **Akışkan Geçiş Deliği (Fluid Orifice):** Akışkanın belirli bir dirençle hareket etmesini sağlayan daraltılmış geçiş bölgeleridir. Pistonun hareketi sırasında akışkan viskoz bu deliklerden geçerken hidrolik direnç oluşur ve kinetik enerji ısı enerjisine dönüşerek sönümleme gerçekleştirilir. Akışkan viskoz sönümleyiciler, genellikle piston başlığı ve akışkan geçiş delikleri aracılığıyla enerjiyi sönümler. Ancak bazı özel tasarımlarda, akümülatörlü viskoz sönümleyiciler de bulunur. Bu sistemlerde akümülatör ise, piston hareketi sırasında hacim değişikliklerini dengelemek ve basınç düzenlemesi sağlamak amacıyla kullanılır.

➤ **Kapak ve Conta (Cap and Seal):** Sönümleyici içindeki akışkanın sızmasını önleyen ve sistemin uzun süreli dayanıklılığını koruyan elemanlardır. Yüksek basınç ve sıcaklık değişimlerine karşı dirençli malzemelerden üretilerek akışkanın muhafaza edilmesini sağlar.

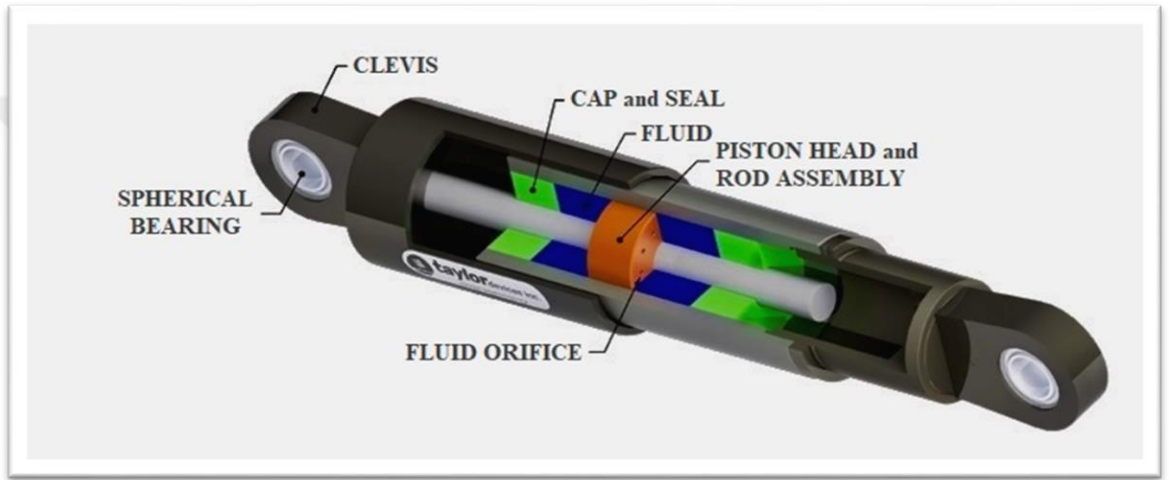
➤ **Bağlantı Ucu ve Küresel Yatak (Clevis and Spherical Bearing):** Bağlantı ucu, sönümleyicinin taşıyıcı sisteme güvenli bir şekilde bağlanmasını sağlayan temel elemandır. Hareketli bileşenlere monte edilerek yük transferinin kontrollü bir şekilde gerçekleşmesine olanak tanır. Küresel yatak ise, montaj noktalarında açısal hareket serbestliği sağlayarak gerilme birikimini önler ve sistemin uzun vadeli dayanıklılığını artırır. Düşük sürtünme özelliği sayesinde yükleri dengeli bir şekilde dağıtarak sönümleyicinin etkinliğini korumasına katkıda bulunur. Dinamik yükler altında esneklik sunarak deformasyon riskini azaltan bu bileşenler, yapısal stabilitenin sürdürülmesinde kritik bir rol oynar.

➤ **Serbest Pim (Pin Roller):** Hareketli bağlantı noktalarındaki sürtünmeyi azaltmak ve sistemin daha akıcı çalışmasını sağlamak amacıyla tasarlanan makaralı pim, hidrolik sönümleyicilerin bağlantı mekanizmalarında önemli bir rol oynamaktadır. Döner eklemlerinde bulunan bu bileşen, yük aktarımlarının daha kontrollü gerçekleşmesini sağlayarak sistemin genel stabilitesini artırır. Yapısal titreşimleri minimuma indirgeyerek sönümleme sürecinin daha etkin bir şekilde gerçekleşmesine katkıda bulunur.

➤ **Birleşim Destek Plakası (Joint Support):** Sönümleyicinin taşıyıcı sistemle sabitlenmesini sağlayan bağlantı pimi, yük transferinin güvenli bir şekilde gerçekleştirilmesi için kritik bir bileşen olarak işlev görmektedir. Yapıya iletilen kuvvetlerin dengeli bir şekilde dağıtılmasını sağlayarak bağlantı noktalarında aşırı gerilme birikimini önler. Bu bileşenin yüksek dayanımlı çelik alaşımlarından üretilmesi, uzun ömürlü kullanım için önem arz etmektedir.

Bu bileşenlerin bir araya gelmesiyle oluşturulan viskoz sönümleyiciler, yapıların dinamik yüklerden korunmasını sağlarken, titreşimleri etkili bir şekilde sönümleyerek yapısal bütünlüğün korunmasına katkıda bulunur.

FVD'lerin temel çalışma ilkesi, akışkan viskoz hareketi sırasında oluşan hidrolik direncin enerjiyi kontrollü bir şekilde sönümlemesine dayanır. Akışkan viskoz sönümleyiciler genellikle akümülatörlü veya piston geçiş çubuklu olarak tasarlanır. Akümülatörlü sistemlerde, silindir içindeki akışkan viskoz, piston başlığında bulunan delikler aracılığıyla bir hazneden diğerine yönlendirilir. Piston geçiş çubuklu sistemlerde ise akışkan, piston başı ile silindir arasındaki boşluklardan geçerek hacim değişikliklerini dengeler. Her iki sistem de akışkanın kontrollü hareketi sayesinde sönümleme etkisi oluşturur.



Şekil 2.32. Akışkan Viskoz Sönümleyici Kesiti - Geçiş Çubuklu (Taylor Devices Inc., 2025)

Taşıyıcı sistem elemanlarından sönümleyicinin kenetlenme noktalarına aktarılan kuvvet, piston kolu ve başlığını ileri doğru harekete geçirerek viskoz sıvıya iletilir. Silindir içerisinde sıkışan viskoz sıvının, akış yolları aracılığıyla bölmeler arasındaki geçişi sırasında oluşan basınç farkı sönümleyicinin direnç kapasitesini belirler ve böylece dinamik enerji sönümlenerek yapısal stabilite ileri düzeye çıkarılır.

Akışkan viskoz sönümleyicilerin temel yapısal avantajı, farklı taşıyıcı sistem tasarımlarına uyum sağlayarak geniş bir kullanım alanına hitap etmesidir. Böylece, deprem, rüzgâr ve termal yükler gibi çeşitli etkilere karşı yapıların korunmasına katkı sağlar.

Akışkan viskoz sönümleyiciler, özellikle sismik olaylar sırasında yapıların enerji dağıtımını optimize ederek yeni ve mevcut yapıların dayanım kapasitesini artıran etkili, ileri mühendislik çözümleridir. Hıza duyarlı çalışma prensipleri sayesinde, bu sönümleyiciler deprem gibi dinamik olaylar sırasında yapısal davranışa özgü bir tepki mekanizması geliştirir. Yapının maksimum yer değiştirdiği anlarda hız sıfır olduğu için sönümleme kuvveti de sıfır olur. Buna karşılık, hızın en yüksek olduğu anlarda ise sönümleme kuvveti maksimum seviyeye ulaşır. Bu özellik, taşıyıcı sistem bünyesinde ek rijitlik oluşturmada sismik enerjinin kontrollü bir şekilde sönümlemesine olanak tanır ve böylece yapısal güvenliğin artırılmasını sağlar.

Akışkan viskoz sönümleyicilerin sönümleme kuvveti hesaplamalarına ilişkin denklemler ve kritik parametreler aşağıda detaylı olarak belirtilmiştir. (Taylor Devices Inc., 2025)

➤ **FVD'nin Temel Denklem ve Kuvvet Hesabı:** FVD'nin ürettiği sönümleme kuvveti aşağıdaki denklem ile ifade edilir;

$$F = C \cdot V^\alpha \quad (2.13)$$

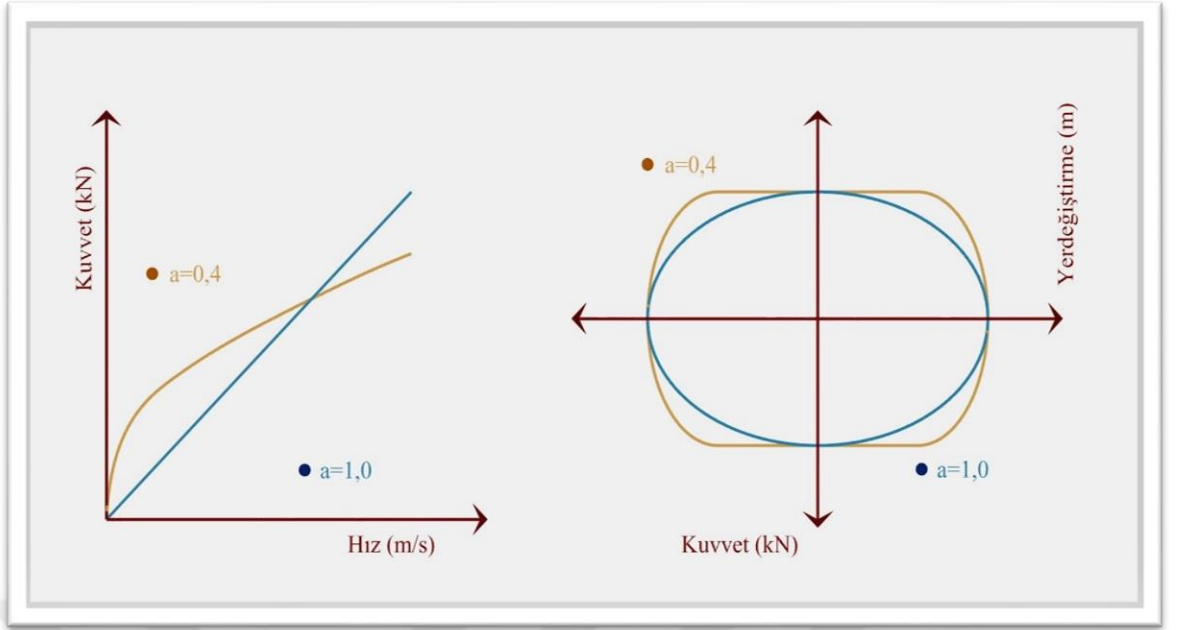
✓ **F:** Sönümleme kuvveti (kN)

✓ **C:** Sönümleme katsayısı (kNs/m)

✓ **V:** Hız (m/s)

✓ **α :** Hız üssü ($0,3 \leq \alpha \leq 1,0$)

Akışkan sismik sönümleyicilerde $\alpha = 1$ değeri, kuvvet ile hız arasındaki ilişkinin doğrusal olduğunu göstermektedir. Bu doğrusal özellik, düşük hızlarda istikrarlı bir sönümleme sağlarken, yüksek hızlarda nonlineer (doğrusal olmayan) sönümleyicilere kıyasla daha az etkili olabilir. Bu nedenle, yüksek hızlı titreşimler için doğrusal olmayan sönümleyiciler daha uygun bir seçenek sunar. Küçük bağıl hız değerlerinde, daha düşük α değerine sahip sönümleyiciler, daha yüksek α değerlerine kıyasla daha büyük bir sönüm kuvveti üretebilir. Bu durum, yapıların dinamik yükler altında daha etkin bir enerji sönümleme mekanizmasına sahip olmasına katkıda bulunur.



Şekil 2.33. Akışkan Viskoz Sönümleyicilerin α Değerlerine Göre Kuvvet - Hız ve Yer Değiştirme - Kuvvet Diyagramları

Histerezis eğrisinin şekli, sönümleyicinin davranışını anlamak açısından kritik bir parametredir. Yapısal sönümleyiciler için α değerinin 0,3 ile 1,0 arasında olması önerilir. $\alpha > 1,0$ olduğunda, sistemin performansı düşebilir, çünkü sönümleyici kuvveti ile yapısal kuvvet arasındaki etkileşim etkinliğini kaybeder. Daha küçük α değerleri (örneğin, 0,3 civarı) tercih edildiğinde, Kuvvet-Yer değiştirme eğrisi dikdörtgen formuna yaklaşarak daha fazla enerji sönümleme kapasitesine işaret eder. $\alpha \approx 1,0$ olduğunda ise eğri elipsoit şekline yaklaşır. Bu farklılık, sönümleyicinin sistem içindeki rolünü belirlemede önemli bir kriterdir.

➤ **Kritik Sönümleme Katsayısı ve Gerçek Sönümleme Katsayısı:** Sönümleyici tasarımında, kritik sönümleme katsayısı aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$C_{cr} = 2.m.\omega_n \quad (2.14)$$

✓ C_{cr} : Kritik sönümleme katsayısı (kNs/m)

✓ m : Yapı kütlesi (kg)

✓ ω_n : Doğal dairesel frekans (rad/s)

ω_n ise, yapı rijitliği (k) ve kütlesi (m) arasındaki ilişki ile belirlenir;

$$\omega_n = \sqrt{(k/m)} \quad (2.15)$$

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Gerçek sönümleme katsayısı ise kritik sönümleme katsayısının belirli bir oranı olarak tanımlanır;

$$C = \xi \cdot C_{cr} \quad (2.16)$$

✓ ξ : Sönüm oranı (Yapı mühendisliğinde faaliyetlerinde 0,2 - 0,4 seçilir)

➤ **Ön Boyutlandırma İçin Sönümleme Katsayısı Hesabı:** Sönüm katsayısı, mod şekillerine göre aşağıdaki denklemle hesaplanır;

$$C_j(L) = (2 \cdot \xi_j \cdot m_j \cdot \omega_j) / \sum (\Gamma_k \cdot \Phi_k) \quad (2.17)$$

✓ $C_j(L)$: Mod şekline bağlı sönümleme katsayısı

✓ ξ_j : Viskoz sönüm oranı

✓ m_j : Kat kütlesi (kg)

✓ ω_j : Katın doğal frekansı

✓ Φ_k : Mod şeklinin deplasman vektörü

✓ Γ_k : Etkin modal kütle oranı

➤ **Sönümleyicinin Zamanla Değişen Kuvveti:** Sönümleyicinin anlık kuvveti, hızın zamana bağlı değişimine göre hesaplanır:

$$V(t) = V_0 \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (2.18)$$

✓ V_0 : Maksimum hız (m/s)

✓ ω : Etki frekansı (rad/s)

✓ t : Zaman (s)

Buna bağlı olarak sönümleyicinin anlık kuvveti şu şekilde ifade edilir:

$$F(t) = C \cdot (V_0 \cdot \sin(\omega \cdot t))^\alpha \quad (2.19)$$

Bu denklemler, sismik analizlerde sönümleyicilerin etkisini belirlemek için kullanılır.

➤ **Yapıya Etkisi ve Etkin Sönüm Oranı:** Sönümleyicinin yapıya kazandırdığı etkin sönüm oranı aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\xi_{\text{eff}} = C / (2 \cdot m \cdot \omega_n) \quad (2.20)$$

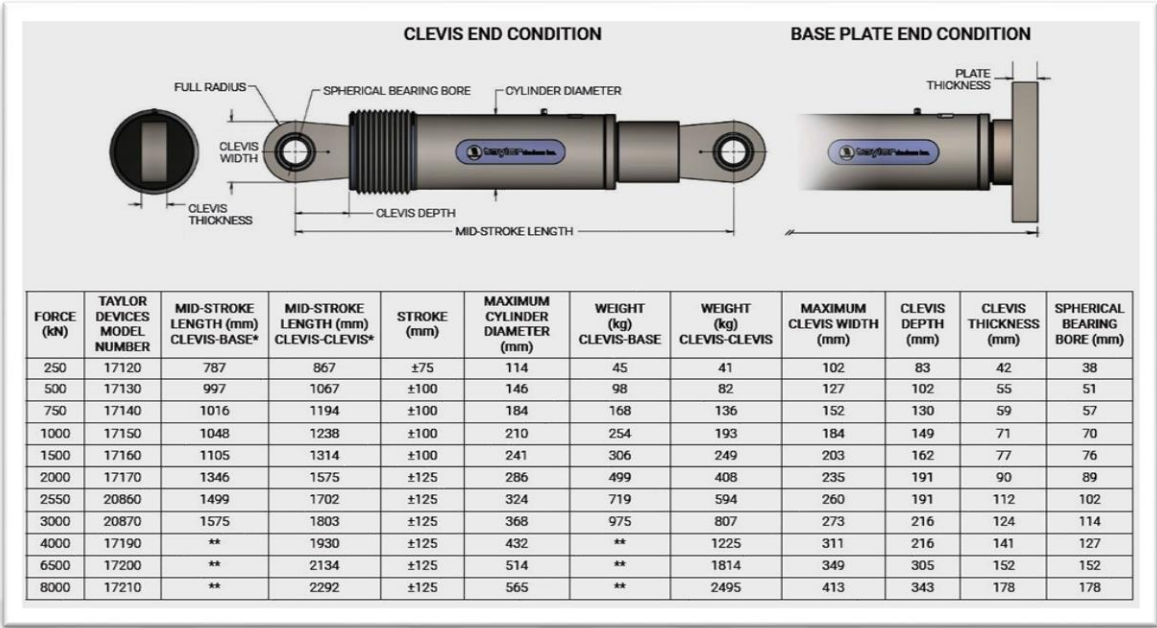
- ✓ ξ_{eff} : Etkin sönüm oranı
- ✓ **m**: Yapı kütlesi (kg)
- ✓ ω_n : Yapının doğal frekansı (rad/s)

Yapı analiz ve tasarım süreçlerinde, akışkan viskoz sönümleyicilerin doğrusal ve doğrusal olmayan modelleri kullanılarak yapı taşıyıcı sistemlerinin sismik ve rüzgâr yüklerine karşı enerji sönümleme kapasitesi artırılmış olur. FVD'lerin, her projenin kendi gereksinimlerine bağlı olarak doğru şekilde modellenmesi ve uygun sönümleme parametrelerinin kullanılması önemlidir.

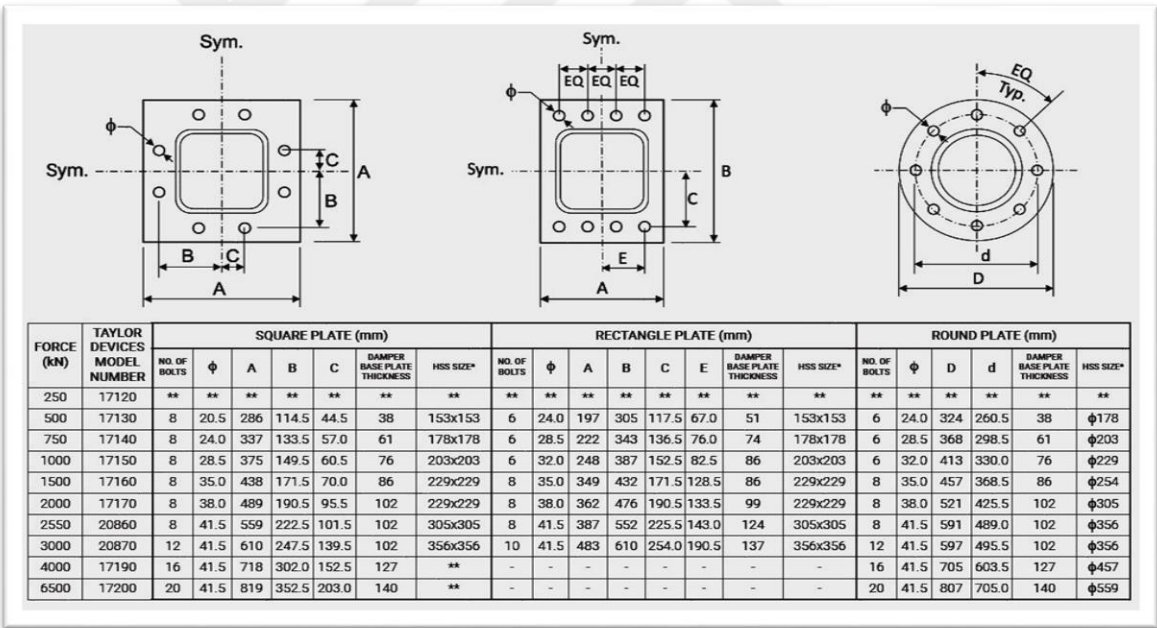
Ülkemizde, yapıların deprem ve diğer dinamik yükler karşısındaki dayanımını artırmak amacıyla yaygın olarak Taylor Devices, Fago, Hirun ve Fuji gibi tanınmış markalara ait akışkan viskoz sönümleyiciler kullanılmakta olup bu firmaların yanı sıra Laibin, Emke ve Pais gibi firmalar da bu alanda bilinen diğer üreticiler arasında yer almaktadır. Her markanın geliştirdiği sönümleme ürünleri; standart ölçüler, sönüm kuvvet kapasiteleri ve mekanik özellikler açısından farklılık gösterebilmektedir. Ayrıca üretici firmaların, uygulaması yapılacak yapı taşıyıcı sistemlerine uygun olarak ihtiyaç duyulan mekanik özelliklere göre üretimlerinin de olduğu bilinmektedir.

FVD'ler, yapının lineer-elastik davranışını koruyarak titreşimlerin zararlı etkilerini sınırlar. Etkin sönümleme kapasitesi, yapısal ve viskoz sönümleme oranlarının birleşimi ile belirlenir ve bu oran toplamda %30 seviyelerine ulaşabilir. Viskoz sönümleyicilerin en önemli avantajlarından biri, yapının doğal titreşim periyodunu önemli ölçüde değiştirmeden sismik kuvvetleri etkili şekilde azaltmasıdır. Yükleme hızı arttıkça sönümleyicinin tepkisi de artar; düşük hızlarda minimum, yüksek hızlarda ise maksimum seviyeye ulaşır. Bu özellik sönümleyicinin, yapının maruz kaldığı yükleme hızına bağlı olarak değişken tepki verebilmesini sağlar ve böylece dinamik etkilere karşı uyumlu bir çalışma performansı sergilemesine katkıda bulunur.

2. KAYNAK ÖZETLERİ



Şekil 2.34. Taylor Devices Firmasına Ait Akışkan Viskoz Sönümleyicilerin Standart Üretim Mekanik Özellikleri (Taylor Devices Inc., 2025)



Şekil 2.35. Taylor Devices Firmasına Ait Akışkan Viskoz Sönümleyicilerin Standart Üretim Bağlantı Plakalarının Mekanik Özellikleri (Taylor Devices Inc., 2025)

Bu sistemlerin entegrasyonu ile sağlanan yüksek sönüm kapasitesi, yapının maruz kaldığı sismik kuvvetleri azaltarak ivme ve yer değiştirme değerlerini azaltır. Bu sayede, taşıyıcı sistem iç kuvvetleri de azaltıldığı için yapı elemanlarında ve birleşim bölgelerinde oluşabilecek deformasyonlar sınırlandırılmış olur. Göreli kat ötelemelerinin kontrol altına alınması, yumuşak kat oluşumu ve burulma etkilerinin zayıflatılması ile taşıyıcı sistemin

yatay rijitlik dengesinin iyileştirilmesine de katkı sağlar. FVD'ler, taşıyıcı sistemlerin dinamik etkiler karşısında yapının temel seviyesinde maruz kaldığı taban kuvvetlerinde azalışlar sağladığı gibi, kendi öz ağırlıkları nedeniyle de yapının dinamik davranışını kısmen olumsuz yönde etkileyebilmektedir.

Böylece, taşıyıcı sistemin hem sünek davranışının korunmasını sağlar hem de aşırı gerilmelere maruz kalmasını engelleyerek sismik enerjiyi kontrollü bir şekilde dağıtır ve olası kalıcı hasar riskini azaltmış olur.

FVD'ler; geniş sıcaklık aralıklarında kararlı performans sergileyip ani yük değişimlerine uyum sağlayarak enerjiyi kontrollü biçimde dağıtır ve taşıyıcı sistemin doğal esnekliğini koruyarak yapısal güvenliğe katkı sağlar. Bu sayede, yüksek frekanslı deprem ve rüzgâr etkilerine maruz kalan yapıların dayanım ve dayanıklılığı artarken, yapısal bütünlüğün ileri seviyeye taşınması iç mekân bileşenlerinin uzun vadeli sürdürülebilirliğini destekler.

Ayrıca akışkan viskoz sönümleyiciler, yapıya sağladıkları yatay rijitlik sayesinde düşey taşıyıcı elemanların sismik yükler altında daha küçük kesitlerle tasarımına imkân tanır. Bu durum, yapı taşıyıcı sistem elemanları ile temel sisteminin daha ekonomik ve verimli bir şekilde projelendirilmesini sağlayarak malzeme tasarrufuna da katkıda bulunur. Böylece, yapı mühendisliği tasarım süreçlerinde bir taraftan maliyet etkinliği sağlanırken, diğer taraftan da güvenlik standartlarından ödün verilmeden ileri mühendislik çözümleri geliştirilebilir.

Yapılarda optimum enerji sönümlemesi sağlamak için akışkan viskoz sönümleyicilerin (FVD) doğru konumlandırılması ve düzenli bakımının yapılması gerekmektedir. Sönümleyici sistemlerin temel prensibi, hareketin gerçekleştiği bölgelerde sismik enerjinin kontrollü bir şekilde dağıtılmasıdır. Bu bağlamda, sönümleyiciler genellikle kolon - kiriş birleşim noktaları, kat seviyeleri ve seviye (temel vb.) yalıtım sistemleri ile birlikte stratejik bölgelere yerleştirilir.

FVD'lerin kapasitelerinin belirlenmesi ve yapıya uygun dağılımının planlanması sürecinde, yalnızca yatay yükler dikkate alınır, düşey yükler ise hesaplara dâhil edilmez.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Akışkan viskoz sönümleyicilerin etkili şekilde kullanımı için birden fazla tasarım yöntemi geliştirilmiştir. Her bir tasarım yönteminin yapıya entegrasyonu ve performansı ilke olarak benzerlik gösterse de kendi tasarımlarına özgü farklılıklar gösterir. Yapı mühendisliği tasarım süreçlerinde yaygın olarak kullanılan yöntemler aşağıda belirtilmiştir.



Şekil 2.36. Akışkan Viskoz Sönümleyicileri Tasarım Yöntemleri

➤ Kompakt Tasarım

- ✓ Kısıtlı alanlarda maksimum sönümleme kapasitesi sağlamak amacıyla geliştirilmiştir.
- ✓ Modüler yapısı sayesinde farklı sistemlere entegrasyonu kolaydır.
- ✓ Yüksek rijitlik gerektiren uygulamalarda etkin bir çözüm seçeneği sağlamaktadır.
- ✓ Küçük boyutlarına rağmen yüksek düzeyde enerji sönümleme kapasitesine sahiptir.

- ✓ Montajı ve bakım süreci, diğer tasarım türlerine kıyasla daha pratik ve ekonomiktir.



Şekil 2.37. Akışkan Viskoz Sönümleyicileri Kompakt Tasarım

➤ **Değiştirilmiş Chevron Tasarımı (Bir veya İki Yatay Sönümleyici ile)**

- ✓ Geleneksel chevron tasarımına ek olarak yatay sönümleyiciler içermektedir.
- ✓ Çok katlı yapılarda sarsıntıları ve ivme etkilerini azaltmada yüksek verimlilik sunar.
- ✓ Yatay sönümleyiciler aracılığıyla yapının rijitliği artırılabilir.
- ✓ Katlar arası titreşimleri etkin bir biçimde sönümleyerek yapısal bütünlüğe katkı sağlar.
- ✓ Deprem ve rüzgâr yüklerine karşı optimize edilmiş bir istikrar mekanizması sağlar.



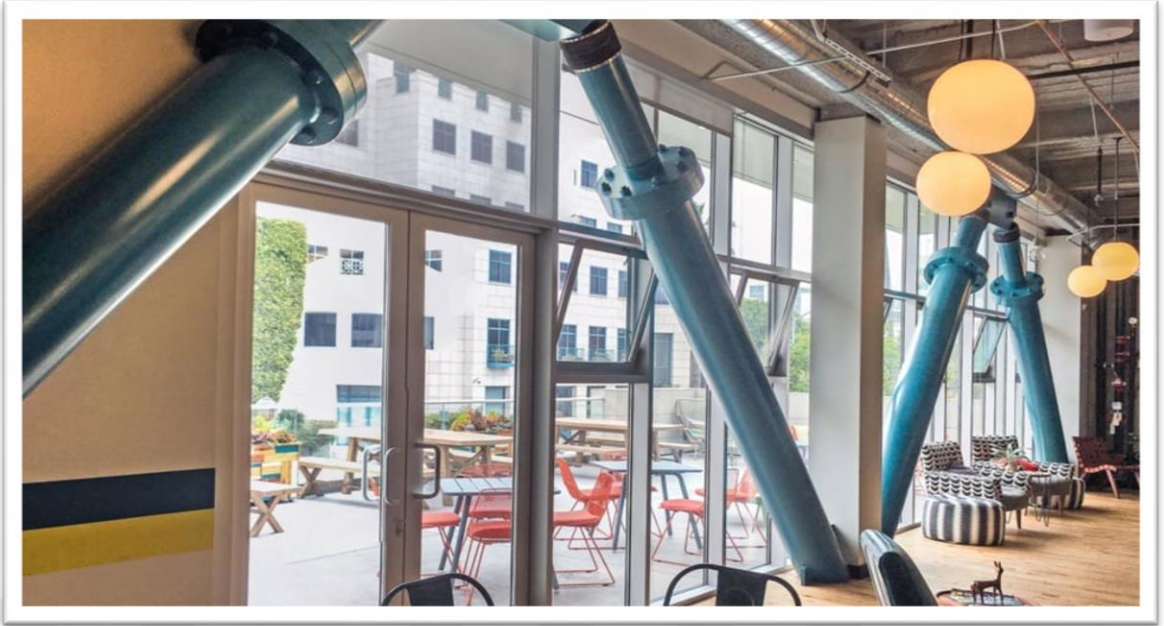
Şekil 2.38. Akışkan Viskoz Sönümleyicileri Değiştirilmiş Chevron Tasarım

➤ Chevron Tasarımı

- ✓ Yapısal titreşimleri en aza indirmek için simetrik bir yapı sunar.
- ✓ HSS (Hollow Structural Section) elemanlarla birlikte uygulanabilir.
- ✓ Sismik enerjisinin daha etkin bir şekilde dağıtılmasını sağlar.
- ✓ Kat seviyelerindeki yatay ötelenmeleri sınırlandırarak yapısal stabiliteyi artırır.
- ✓ Yüksek hareket kapasitesi ile farklı yapı türlerine adaptasyon kabiliyetine sahiptir.

➤ Diyagonal Tasarımı

- ✓ Yüksek frekanslı titreşimleri azaltmak amacıyla geliştirilmiştir.
- ✓ Bütünleşik veya HSS uzantıları ile kullanıma uygundur.
- ✓ Dinamik etkiler sonucu oluşan deformasyonları en aza indirerek yapı performansını artırır.
- ✓ Sönümleyici hareket miktarı, chevron tasarımına kıyasla daha düşük olmakla birlikte etkin bir enerji dağılımı sağlar.
- ✓ Uygulandığı bölgelerde sismik enerji sönümleme kapasitesini artırarak yapısal dayanımı güçlendirir.



Şekil 2.39. Akışkan Viskoz Sönümleyicileri Chevron Tasarım

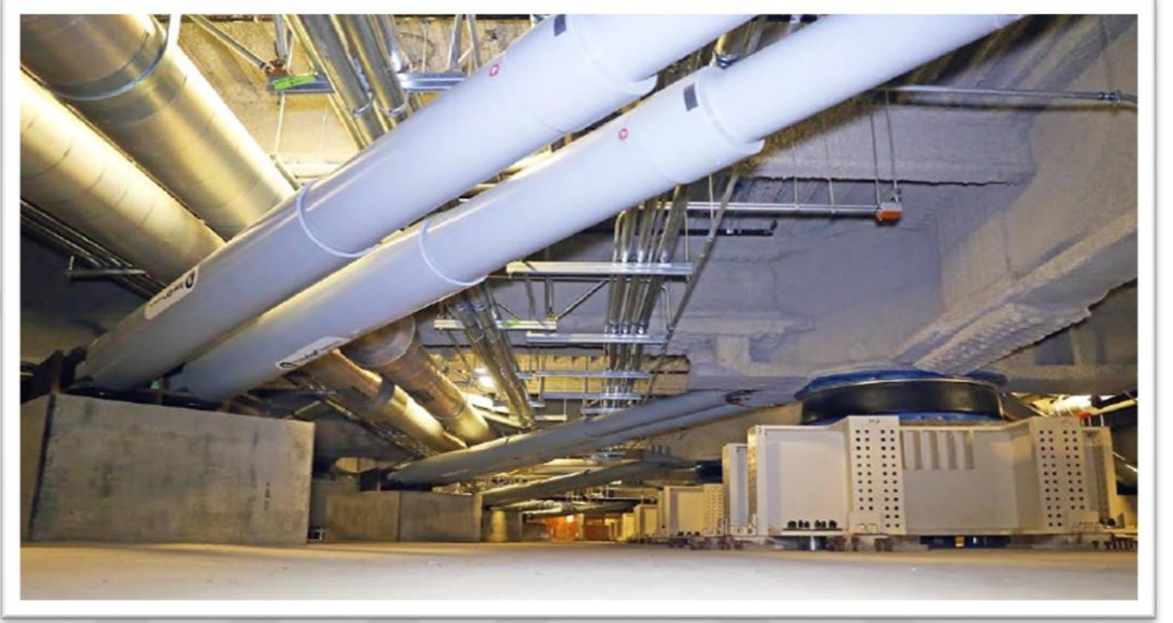


Şekil 2.40. Akışkan Viskoz Sönümleyicileri Diyagonal Tasarım

➤ Seviye (Temel) Yalıtımlı Tasarım

- ✓ Temel seviyesi gibi kritik yapı bölgelerinde sönümleme kapasitesini artırmak amacıyla kullanılmaktadır.
- ✓ Yatay yükleri sönümleyerek yapının genel stabilitesini iyileştirir.
- ✓ Sismik dalgaların üst yapılara iletilmesini minimize eder.

- ✓ Yüksek katlı binalar, köprüler ve kritik altyapı projelerinde yaygın olarak tercih edilmektedir.
- ✓ Zeminden kaynaklanan titreşim enerjisini sönümleyerek yapısal performansı optimize eder.



Şekil 2.41. Akışkan Viskoz Sönümleyicileri Seviye (Temel) Yalıtımlı Tasarım

Ayrıca akışkan viskoz sönümleyicilerin tasarım yöntemleri içerisinde kullanım düzeyi yaygın olmasa da Toggle ve Tackle tasarımları da aşağıda kısaca açıklanmıştır.

➤ **Toggle (Eklemlı) Tipi Sönümleyici Tasarımı**

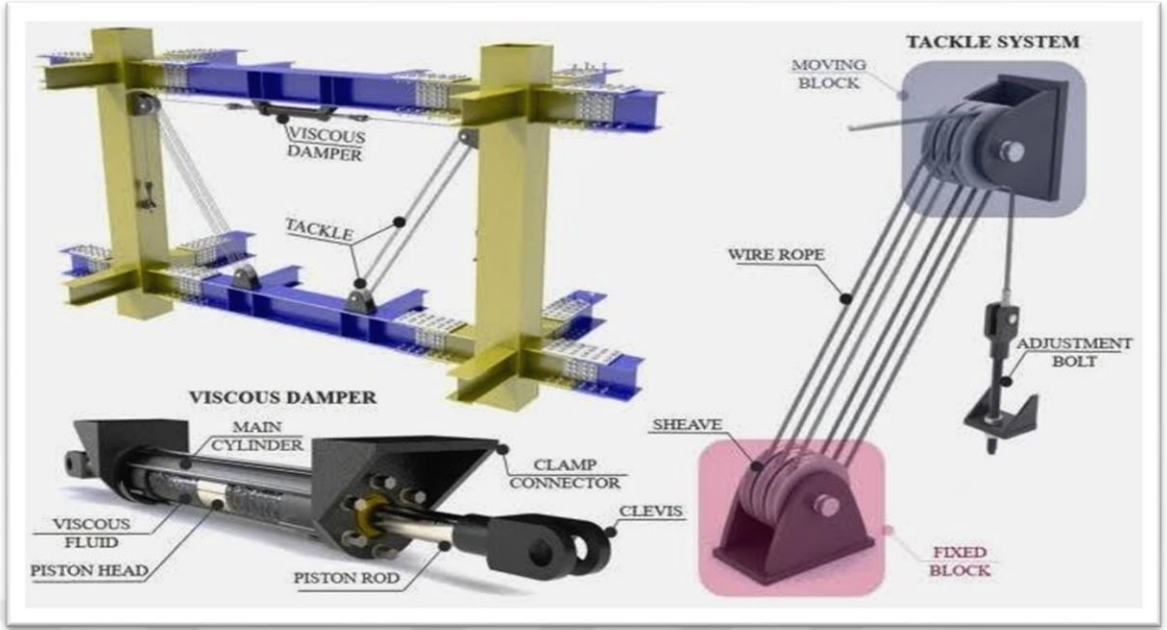
- ✓ Sönümleyici hareket miktarını artırarak daha yüksek düzeyde sönümleme kuvveti oluşturur.
- ✓ Rijit yapıların dinamik kontrolünde etkin bir çözüm sunar.
- ✓ Düşük yatay yer değiştirme ve hız değerlerine rağmen yüksek sönüm kuvvetleri üretebilir.
- ✓ Yapısal yüklerin optimize edilmesine katkı sağlayarak sismik dayanımı artırır.
- ✓ Doğru entegrasyon ile enerji sönümleme verimini maksimize eder.



Şekil 2.42. Akışkan Viskoz Sönümleyicileri Toggle Tasarımı

➤ **Tackle (Çok parçalı) Tipi Sönümleyici Tasarımı**

- ✓ Mekanik avantaj sağlayan çok parçalı bağlantı mekanizmalarına sahiptir.
- ✓ Küçük yapısal yer değiştirmelerden yüksek sönümleme kuvvetleri üretmek amacıyla tasarlanmıştır.
- ✓ Toggle tasarımına benzer şekilde hareketi büyütür sönümleme kapasitesini artırmaktadır.
- ✓ Çelik çerçeveli yapılarda, yüksek enerji yutma kapasitesine ihtiyaç duyulan alanlarda uygulanmaktadır.
- ✓ Daha karmaşık bağlantı mekanizmalarına sahip olduğundan, montajı ve bakımı detaylı planlanmalıdır.

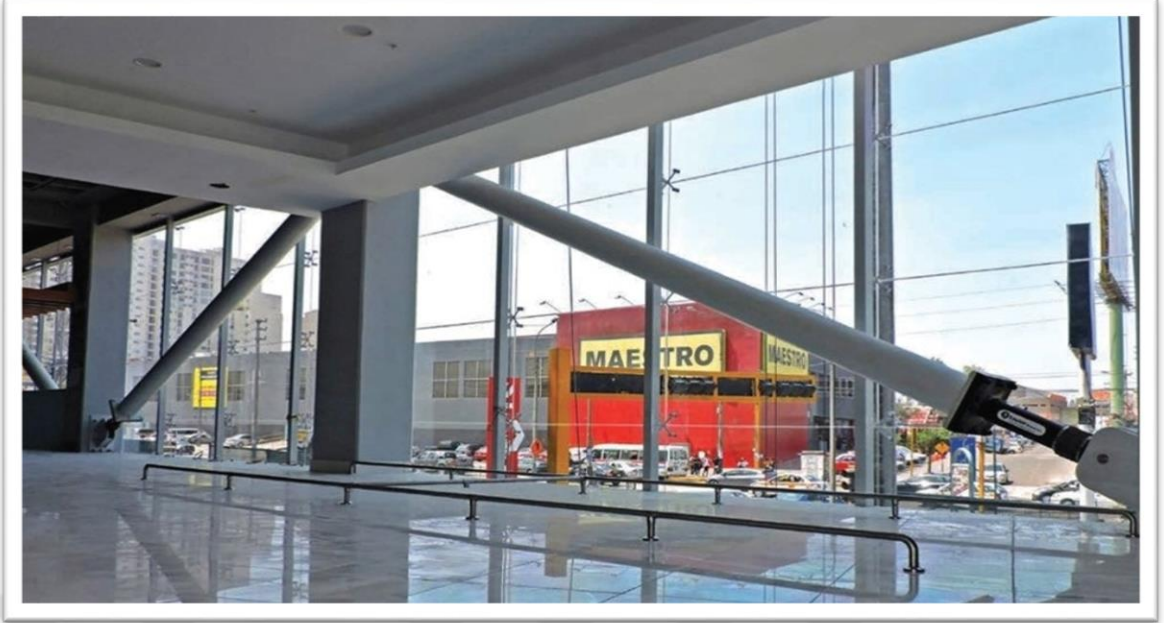


Şekil 2.43. Akışkan Viskoz Sönümleyicileri Tackle Tasarımı

Bu tasarım yaklaşımları, farklı yapısal gereksinimlere uygun olarak optimize edilerek yapı sistemlerine entegre edilmektedir. Yapı mühendisliği uygulamalarında, her tasarımın kendine özgü avantajları göz önünde bulundurularak proje bazında en uygun çözüm seçilmelidir.

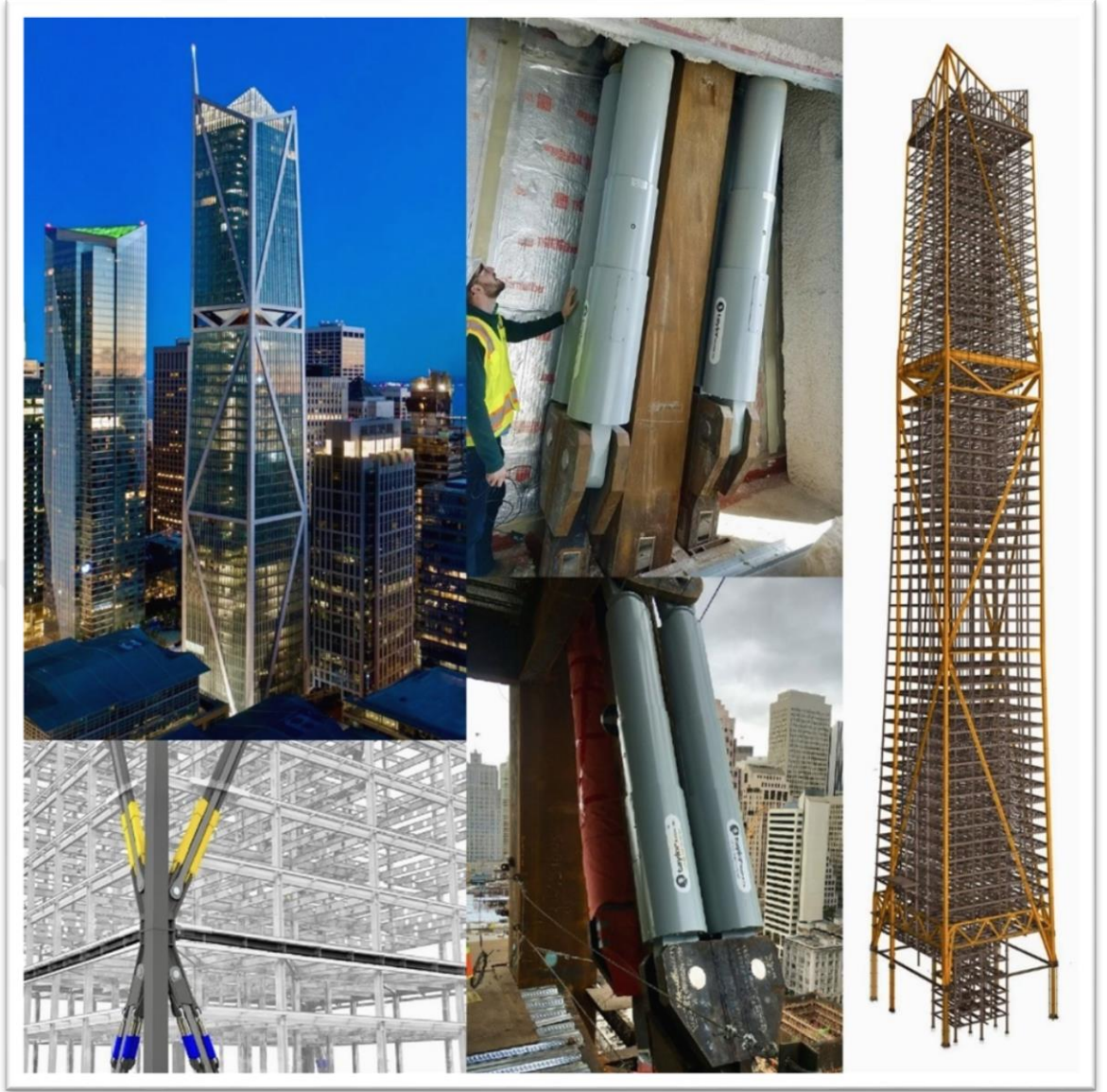
Akışkan viskoz sönümleyiciler (FVD), geleneksel rijitlik artırıcı yöntemlerden farklı olarak, taşıyıcı sisteme ihmal edilebilir düzeyde ek yük getirirken yapının sönümleme kapasitesini önemli ölçüde artıran yenilikçi mühendislik çözümleri sağlamaktadır. Bu üstün özellikleri sayesinde, farklı mühendislik disiplinlerinde yaygın olarak kullanılmakta olup, yapı mühendisliği tasarım süreçlerinde de çeşitli yapı türlerine etkin bir şekilde entegre edilmektedir. FVD'lerin yaygın kullanım alanları ise aşağıda sıralanmaktadır:

Depreme Dayanıklı Binalar: Akışkan viskoz sönümleyiciler (FVD), deprem sırasında yapının maruz kaldığı titreşimleri etkin bir şekilde azaltarak taşıyıcı sistem üzerindeki gerilme ve deformasyonları minimize etmektedir. Betonarme, çelik ve çelik-beton kompozit taşıyıcı sistemlere sahip yapılarda yüksek verimlilikle kullanılabilen bu sistemler, özellikle yüksek sismik risk taşıyan bölgelerde yapı doğal periyodunu değiştirmeksizin enerji sönümleme kapasitesini artırarak yapısal performansı iyileştirmekte ve yapı güvenliğini en üst seviyeye çıkarmaktadır.



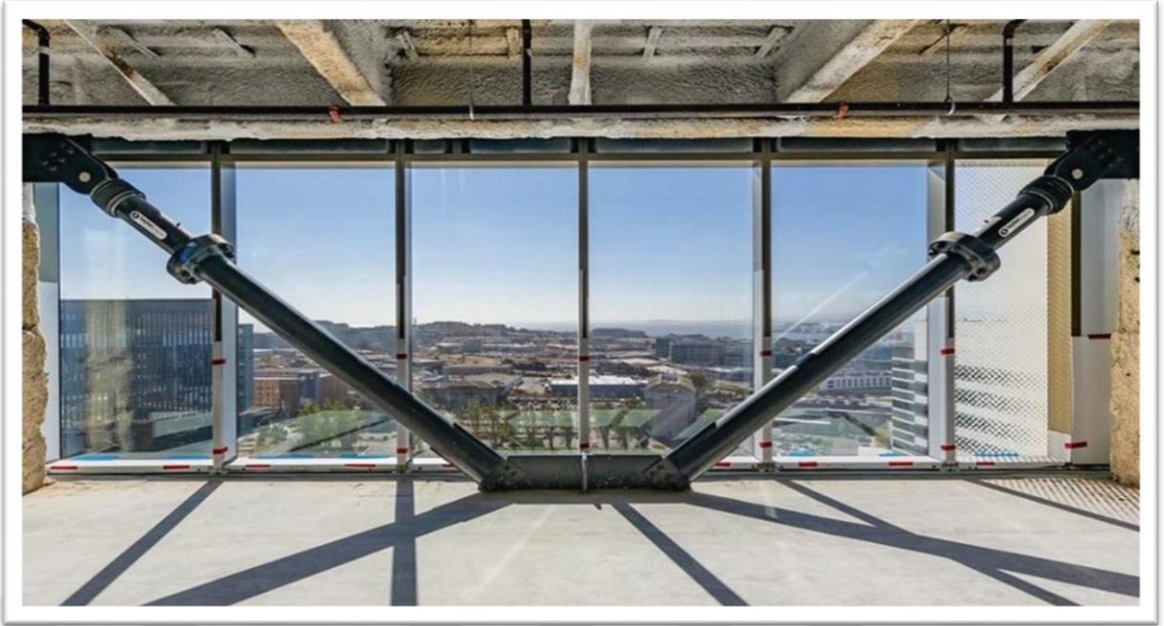
Şekil 2.44. Akışkan Viskoz Sönümleyicilerin Depreme Dayanıklı Binalar Uygulaması (San Miguel Mall / PERU)

Yüksek Katlı Yapılar: Rüzgâr ve deprem etkilerine bağlı olarak önemli seviyede yatay deplasman ve titreşimlere maruz kalan bu tür yapılarda, akışkan viskoz sönümleyiciler (FVD) dinamik tepkileri kontrol altına alarak yatay salınım ve ivmeleri etkin bir şekilde azaltmaktadır. Bu sayede hem yapısal güvenlik artırılmakta hem de bina kullanıcılarının konfor seviyesi iyileştirilmektedir. Özellikle çelik ve çelik-beton kompozit taşıyıcı sistemlerde, hafif ancak yüksek dayanımlı yapısal elemanlarla uyum içinde çalışarak ek rijitlik kazandırmadan sismik ve aerodinamik etkileri sönümlemektedir. Böylece, yapıların servis performansı iyileştirilirken, uzun vadeli dayanıklılık, enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik açısından önemli kazanımlar sağlanmaktadır.



Şekil 2.45. Akışkan Viskoz Sönümleyicilerin Yüksek Katlı Yapılar Uygulaması (181 Fremont Tower / ABD)

Mevcut Binaların Güçlendirilmesi: Akışkan viskoz sönümleyiciler (FVD), mevcut yapıların sismik dayanımını artırmada etkili ve çağdaş bir güçlendirme çözümüdür. Yapıya önemli bir ek kütle veya rijitlik kazandırmaksızın sismik enerjiyi kontrol altına alarak taşıyıcı sistemin genel performansını iyileştirir. Bu sayede, yapı elemanlarında oluşabilecek hasarlar azaltılırken yapısal bütünlük korunur. Özellikle tarihi ve kültürel değere sahip yapılarda, mimari dokuyu bozmadan uygulanabilmesi sayesinde FVD sistemleri ön plana çıkmaktadır. Hem betonarme hem de çelik taşıyıcı sistemlerde uygulanabilir oluşları, farklı yapı tiplerinde yaygın şekilde kullanılmalarına olanak tanımakta; böylece sürdürülebilir ve esnek bir güçlendirme yaklaşımı sağlamaktadır.



Şekil 2.46. Akışkan Viskoz Sönümleyicilerin Güçlendirme Uygulaması - Çelik Yapılar (651 Gateway Blvd. / ABD)

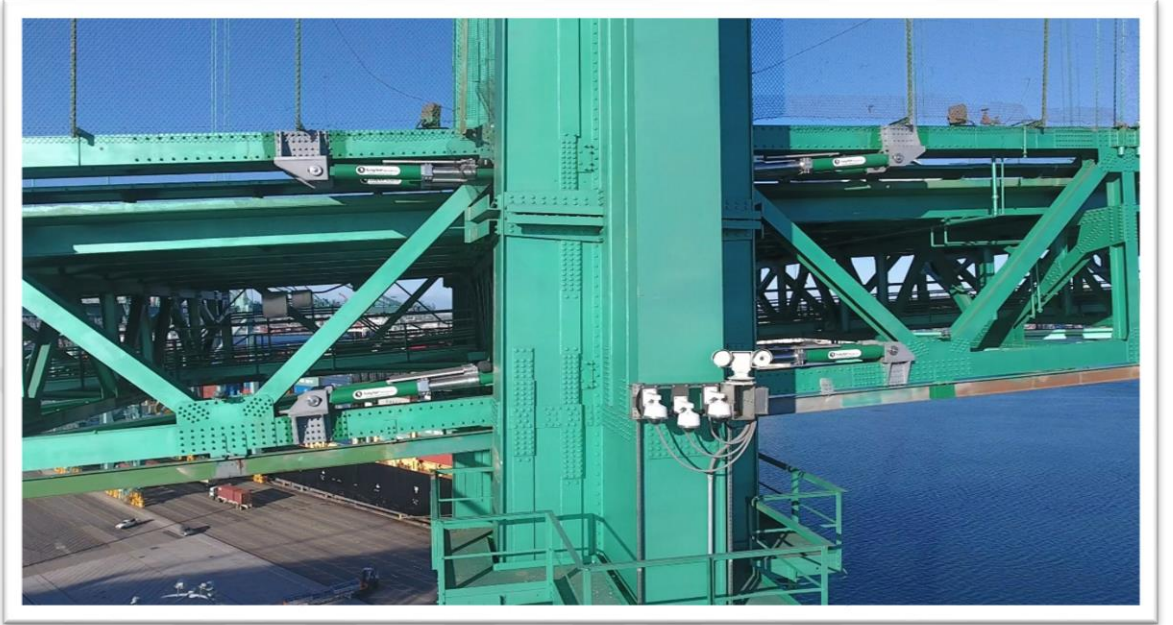


Şekil 2.47. Akışkan Viskoz Sönümleyicilerin Güçlendirme Uygulaması - Betonarme Yapılar (555 Capitol Mall / ABD)

Köprüler ve Viyadükler: Köprüler ve viyadükler, dinamik yükler ve sismik hareketler nedeniyle yüksek seviyede titreşime maruz kalabilen mühendislik yapılarıdır. Akışkan viskoz sönümleyiciler (FVD), bu yapıların deformasyonlarını etkin bir şekilde kontrol altına alarak ek rijitlik kazandırmadan dayanıklılığını artırmaktadır. Ayrıca, hareketli yüklerin oluşturduğu titreşimleri sönümleyerek yapısal stabiliteyi iyileştirmekte

2. KAYNAK ÖZETLERİ

ve servis ömrünü uzatmaktadır. Özellikle uzun açıklıklı çelik ve betonarme köprülerde, sönümleme kapasitesini artırarak deprem ve rüzgâr etkilerine karşı daha güvenli bir yapı davranışı sağlamaktadır.

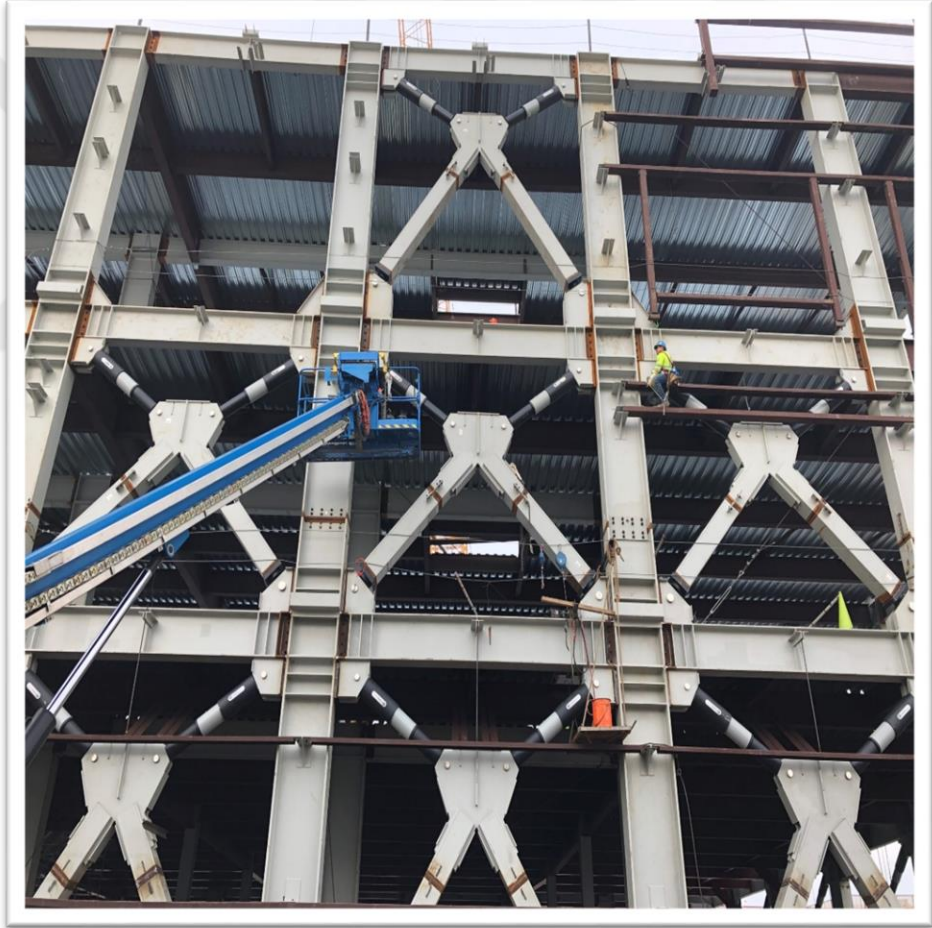


Şekil 2.48. Akışkan Viskoz Sönümleyicilerin Köprü Uygulaması (Vincent Thomas Bridge / ABD)



Şekil 2.49. Akışkan Viskoz Sönümleyicilerin Köprü Uygulaması (Santiago Creek Bridge / ABD)

Endüstriyel Tesisler: Ağır sanayi ve üretim tesisleri, makine operasyonları ve dinamik yükler nedeniyle yüksek frekanslı titreşimlere maruz kalabilmektedir. Bu titreşimler hem üretim hassasiyetini düşürebilmekte hem de yapı elemanlarının dayanıklılığı üzerinde olumsuz etkiler oluşturabilmektedir. Akışkan viskoz sönümleyiciler (FVD), bu tür dinamik etkileri etkin bir şekilde sönümleyerek makinelerin performansını korumakta ve yapısal bileşenlerin zarar görmesini önlemektedir. Çelik ve betonarme taşıyıcı sistemlere sahip sanayi tesislerinde, makine temelleri, kritik yapı elemanları ve hassas üretim hatlarında yaygın olarak kullanılan FVD'ler, özellikle biyoteknoloji, ilaç ve yarı iletken üretim tesislerinde titreşim kaynaklı deformasyonları önleyerek, yüksek hassasiyetli üretim süreçlerinin sürekliliğini sağlamaktadır.



Şekil 2.50. Akışkan Viskoz Sönümleyicilerin Endüstri Tesisler Uygulaması (Bayer Cell Culture Technology Center / ABD)

Denizcilik ve Offshore Yapıları: Açık deniz platformları, petrol sondaj kuleleri ve büyük gemiler, dalga, rüzgâr ve akıntı etkileri gibi değişken ve dinamik yüklere sürekli

olarak maruz kalmaktadır. Akışkan viskoz sönümleyiciler (FVD), bu tür yapıların stabilitesini artırarak aşırı deformasyonları önlemekte ve yapısal dayanımı güçlendirmektedir. Ayrıca, yüksek dalga enerjisinin etkilerini sönümleyerek yorgunluk hasarını azaltmakta ve böylece hizmet ömrünü uzatmaktadır. Özellikle açık deniz rüzgâr türbinleri, petrol platformları ve yüzer yapılar gibi kritik mühendislik sistemlerinde, güvenli ve dayanıklı bir yapı performansı sağlamak amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır.

Uzay ve Havacılık Sektörü: Uzay ve havacılık mühendisliğinde, fırlatma, iniş ve aerodinamik yükler nedeniyle oluşan aşırı dinamik kuvvetler, hassas ekipmanlar ve yapılar üzerinde yüksek gerilmelere yol açabilmektedir. Akışkan viskoz sönümleyiciler (FVD), bu tür dinamik yükleri etkin bir şekilde sönümleyerek ekipmanların performansını korumakta ve yapısal güvenliği artırmaktadır. Hassas navigasyon ve ölçüm cihazlarının korunması amacıyla sismik yalıtım sistemlerine entegre edilerek titreşim ve darbe etkilerini minimize etmektedir. Uydu fırlatma rampaları, uzay araçları ve uçak test platformlarında yaygın olarak kullanılan bu sistemler, yüksek hassasiyet gerektiren ortamlarda güvenilir bir titreşim kontrol mekanizması sağlamaktadır.

Enerji Sektörü: Enerji üretim tesisleri, özellikle rüzgâr türbinleri, hidroelektrik santralleri ve nükleer santraller gibi büyük ölçekli yapılar, dinamik yükler ve titreşim etkilerine maruz kalmaktadır. Bu titreşimler, yapısal dayanıklılığı olumsuz etkileyerek ekipman ömrünü kısaltabilir ve işletme güvenliğini riske atabilir. Akışkan viskoz sönümleyiciler (FVD), bu tür sistemlerde etkin bir sönümleme sağlayarak yapısal titreşimleri kontrol altına almakta, mekanik bileşenlerin yıpranmasını azaltmakta ve uzun ömürlü, güvenli bir işletme süreci sağlamaktadır. Özellikle türbin kanatları, jeneratör yatakları ve büyük ölçekli enerji altyapılarında kullanımı yaygınlaşmakta olup, enerji tesislerinin verimliliğini ve güvenliğini artıran kritik bir mühendislik çözümü olarak öne çıkmaktadır.

Akışkan viskoz sönümleyiciler (FVD), dinamik yüklerin kontrol altına alınmasında mühendislik yapılarında giderek daha yaygın bir çözüm haline gelmektedir. Çeşitli yapı türlerinde sağladıkları etkin sönümleme kapasitesi sayesinde, geleneksel rijitlik artırıcı yöntemlere kıyasla daha esnek ve yenilikçi bir yaklaşım sağlamaktadır.

Sismik risk taşıyan bölgelerde güvenli yapı tasarımına katkı sağlamalarının yanı sıra, sanayi tesislerinden uzay ve havacılık sektörüne kadar geniş bir uygulama alanına sahiptirler. Gelecekte, malzeme teknolojilerindeki ilerlemeler ve hesaplamalı modelleme yöntemlerinin gelişimi ile birlikte, FVD'lerin daha yüksek verimlilik ve dayanıklılık sağlayarak sürdürülebilir mühendislik çözümlerinde daha büyük bir rol üstlenmesi beklenmektedir.

Akışkan viskoz sönümleyiciler (FVD), dinamik yüklerin yapılar üzerindeki olumsuz etkilerini azaltarak güvenlik ve dayanıklılığı artıran ileri teknolojiye sahip sönümleme sistemleridir. Yapısal sistemlerin güvenliğini artırma, titreşimleri sönümleme ve uzun vadeli dayanıklılığı iyileştirme gibi önemli faydalar sunarken, belirli tasarım ve uygulama koşulları göz önünde bulundurulmalıdır. Bu sistemlerin sağladığı avantajlar, geniş kullanım alanlarını desteklerken; bazı teknik sınırlamaları, belirli koşullarda performansın optimize edilmesini gerektirmektedir. Bu bağlamda, FVD'lerin sağladığı başlıca avantajlar ve olası dezavantajlar aşağıda özetlenmiştir.

Sismik Performans ve Yapısal Güçlendirme: Akışkan viskoz sönümleyiciler (Fluid Viscous Dampers – FVD), deprem ve rüzgâr gibi dinamik etkiler altında yapıların maruz kaldığı deplasmanları ve iç kuvvetleri azaltarak, taşıyıcı sistemin elastik davranışını korumaktadır. Yapıya ek rijitlik kazandırmaksızın sismik enerjiyi disipline edebilmeleri sayesinde, kritik taşıyıcı elemanlarda oluşabilecek aşırı gerilmelerin sınırlandırılmasına katkı sağlamaktadır. Ayrıca, katlar arası göreceli ötelenmeleri kontrol altına alarak hem yapısal stabiliteyi artırmakta hem de taşıyıcı olmayan elemanlar ile iç donanım sistemlerinde meydana gelebilecek hasar riskini azaltmaktadır.

Mevcut Yapılara Uyum ve Kolay Entegrasyon: Akışkan viskoz sönümleyiciler (FVD), mevcut yapıların sismik performansını artırmak amacıyla geniş kapsamlı yapısal değişiklikler gerektirmeden entegre edilebilmektedir. Duvar veya bölme elemanlarının arkasına yerleştirilerek mimari bütünlük korunurken, taşıyıcı sisteme müdahale edilmeden yüksek düzeyde sönümleme kapasitesi sağlanmaktadır. Ayrıca, FVD'lerin yapının tüm katlarına yerleştirilmesi zorunlu olmayıp, optimum verimlilik elde etmek ve proje kısıtlarını karşılamak amacıyla belirli stratejik noktalara konumlandırılmaktadır.

Harici Enerji Kaynağına İhtiyaç Duymaması: Akışkan viskoz sönümleyiciler (FVD), harici bir enerji kaynağı gerektirmeyen pasif sönümlleme sistemleri olup, tamamen mekanik prensiplerle çalışmaktadır. Bu özellikleri sayesinde, elektriksel veya mekanik arızalardan etkilenmeden sürekli ve güvenilir bir şekilde işlevlerini yerine getirebilmektedirler. Uzun ömürlü ve bakım gereksinimi düşük olmaları, özellikle kritik altyapı projelerinde ve kesintisiz güvenlik gerektiren yapılarda tercih edilmelerini sağlamaktadır.

Termal Stabilité ve Çevresel Dayanıklılık: Akışkan viskoz sönümleyiciler (FVD), geniş sıcaklık aralıklarında (-40°C ila +70°C) performanslarını koruyarak farklı iklim koşullarında güvenilir bir sönümlleme çözümü sağlamaktadır. Sıcaklık değişimlerinden minimum düzeyde etkilenmeleri, bu sistemleri özellikle değişken hava koşullarına sahip coğrafi bölgelerde ve aşırı iklim şartlarında tercih edilebilir hale getirmektedir. Ayrıca, paslanmaz çelik piston çubukları ve kimyasal olarak reaktif olmayan sıvılar içermeleri sayesinde korozyon, nem ve çevresel etkilere karşı yüksek dayanıklılık sağlamaktadır. Bu özellikleriyle, uzun vadeli yapısal performansın korunmasına önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır.

Bakım Kolaylığı ve Uzun Ömür: Akışkan viskoz sönümleyiciler (FVD), hareketli parça sayısının az olması ve aşınmaya karşı dirençli yapıları sayesinde bakım gereksinimi düşük olan pasif sönümlleme sistemleridir. Yapılan araştırmalar, bu sistemlerin ortalama 35 yıl boyunca etkin bir şekilde çalışabildiğini ve performans kaybı olmadan güvenilirliklerini koruyabildiklerini göstermektedir. Uzun hizmet ömrü ve düşük bakım ihtiyacı, özellikle işletme maliyetlerinin minimize edilmesi gereken projelerde önemli bir avantaj sağlamaktadır. Bu özellikler, FVD'leri uzun vadeli dayanıklılık gerektiren mühendislik uygulamalarında tercih edilen bir çözüm haline getirmektedir.

Yapısal Analiz ve Tasarım Kolaylığı: Akışkan viskoz sönümleyiciler (FVD), yapıların sismik analizlerinde kullanılan mevcut modelleme yöntemleri ile kolayca entegre edilebilen pasif sönümlleme sistemleridir. Yapısal mühendislikte yaygın olarak kullanılan sonlu elemanlar analizi (FEA) ve zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler gibi hesaplama yöntemleriyle uyumlu olup, yüksek doğrulukta simülasyonlar

yapılmasına olanak tanımaktadır. Bu özellik, FVD'lerin mühendislik tasarım süreçlerinde etkin bir şekilde modellenmesini ve yapı performansına yönelik projeye özgü parametrelerin optimize edilmesini sağlamaktadır. Ayrıca, taşıyıcı sistemin sismik performansını artırması sayesinde, daha küçük kesitli taşıyıcı elemanların kullanılmasına olanak tanıyarak malzeme verimliliğine katkıda bulunabilir.

Titreşim Kaynaklı Hasarları Önleme: Akışkan viskoz sönümleyiciler (FVD), yalnızca büyük ölçekli sismik ve rüzgâr yüklerine karşı değil, aynı zamanda düşük genlikli ve sürekli tekrarlanan titreşimlerin yapılar üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmak amacıyla da etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Araç trafiği, endüstriyel makineler ve mekanik sistemler gibi sürekli titreşim üreten kaynaklar, yapı bileşenlerinde zamanla yorulma hasarına ve performans kayıplarına neden olabilmektedir. FVD'ler, bu tür titreşimleri sönümleyerek yapısal elemanların dayanıklılığını artırmakta ve özellikle sanayi tesisleri, laboratuvarlar ve yüksek hassasiyet gerektiren mühendislik uygulamalarında tercih edilmektedir.

Modüler ve Esnek Tasarım: Akışkan viskoz sönümleyiciler, farklı mühendislik disiplinlerinde kullanılabilmesini sağlayan modüler ve esnek tasarım özelliklerine sahip olup, yeni inşa edilen yapıların tasarım aşamasında entegre edilebildiği gibi, mevcut yapıların güçlendirilmesi amacıyla da sonradan uygulanabilmektedir. Geleneksel rijitlik artırıcı güçlendirme yöntemleri genellikle geniş kapsamlı yapısal değişiklikler gerektirirken, FVD'ler taşıyıcı sisteme minimum müdahale ile entegre edilebilmekte ve mimari bütünlüğü koruyarak uygulama esnekliği sağlamaktadır. Tasarım parametrelerine göre optimize edilebilen farklı kapasitelerde üretilmesi, bu sistemleri geniş bir yapı tipolojisi için uygun hale getirmektedir.

Deprem Sonrası Yapısal Kullanılabilirlik: Deprem sonrası yapıların hızlı bir şekilde kullanılabilir hale gelmesi, özellikle hastaneler, havaalanları, veri merkezleri ve kritik altyapı tesisleri açısından büyük önem taşımaktadır. Geleneksel taşıyıcı sistemler, büyük ölçekli bir deprem sonrasında plastik deformasyonlara uğrayarak hasar görebilir ve uzun süreli servis dışı kalma riski oluşturabilir. FVD'ler, sismik enerji sönümleme kapasitesi sayesinde taşıyıcı sistemde oluşan gerilmeleri azaltarak yapının elastik davranış sınırları içerisinde kalmasını sağlar. Böylece, depreme maruz kalan yapıların

hızlı bir şekilde hizmete devam etmesine olanak tanır ve onarım maliyetlerini minimize ederek işletme sürekliliğini destekler.

Sürekli ve Kesintisiz Çalışma Prensipleri: Akışkan viskoz sönümleyiciler, tamamen mekanik prensiplerle çalışan pasif sistemler olup harici bir enerji kaynağına ihtiyaç duymadan sürekli olarak etkinliğini sürdürebilmektedir. Elektrik kesintileri, mekanik arızalar veya diğer dış etkenlerden bağımsız olarak çalışabilme yeteneği, bu sistemleri acil durumlarda yüksek güvenlik gerektiren yapılar için ideal bir çözüm haline getirmektedir. Özellikle deprem, fırtına veya ani yük değişimleri gibi dinamik olaylar sırasında herhangi bir dış müdahale gerektirmeksizin doğrudan tepki verebilmeleri, güvenilirlik açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır.

Enerji Dağılımını Optimize Etme: Deprem ve rüzgâr gibi dinamik yükler, özellikle asimetrik ve düzensiz geometrik formlara sahip yapılar üzerinde düzensiz gerilme dağılımlarına ve büyük deplasmanlara neden olabilmektedir. Geleneksel rijitlik artırıcı çözümler, genellikle belirli bölgelere yüksek rijitlik ekleyerek yapının genel davranışını değiştirirken, FVD'ler yapının rijitliğini değiştirmeksizin sismik enerji dağılımını daha homojen hale getirmektedir. Optimum yerleşim prensipleri doğrultusunda stratejik noktalara konumlandırılan sönümleyiciler, yapının genel dinamik tepkisini kontrol altına alarak hem yapısal stabiliteyi artırmakta hem de taşıyıcı elemanların aşırı yüklenmesini önleyerek ömrünü uzatmaktadır.

Yüksek İlk Yatırım Maliyeti: Akışkan viskoz sönümleyicilerin (FVD) üretim, temin ve montaj süreçleri, diğer sönümleme sistemlerine kıyasla daha yüksek başlangıç maliyetleri gerektirebilmektedir. Ancak, yapılan araştırmalar, FVD'lerin sağladığı etkin sismik enerji sönümleme kapasitesi sayesinde yapısal performansı artırarak uzun vadede bakım ve onarım maliyetlerini azaltabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, küçük ölçekli projelerde veya bütçe kısıtlamalarının bulunduğu yapılarda ilk yatırım maliyetlerinin proje bütçesi üzerindeki etkisinin dikkatlice değerlendirilmesi gerekmektedir.

Periyodik Kontrol ve Denetim Gereksinimi: Akışkan viskoz sönümleyiciler (FVD), uzun ömürlü ve dayanıklı sistemler olmasına rağmen, zaman içinde

performanslarının korunması ve optimum düzeyde çalışmaya devam edebilmesi için belirli aralıklarla denetlenmelidir. Çalışma koşullarına bağlı olarak, özellikle aşırı yüklenme, sıcaklık değişimleri ve çevresel etkilerin yoğun olduğu yapılarda periyodik bakım ve testlerin yapılması önerilmektedir. Bu kontroller, sistemin etkinliğini değerlendirmek ve olası performans kayıplarını önlemek amacıyla kritik bir öneme sahiptir.

Sıvı Sızdırma Riski: Akışkan viskoz sönümleyicilerde (FVD) kullanılan viskoz sıvılar, zamanla sızma riski taşıyabilir ve bu durum, sistemin sönümleme kapasitesinin azalmasına neden olabilir. Özellikle uzun süreli kullanımda veya aşırı mekanik zorlanmalara maruz kalan sönümleyicilerde, sızdırmazlık elemanlarının performansında azalma görülebilir. Bu durum, ek bakım ve denetim gereksinimini doğurabilmektedir. Ancak, modern üretim teknikleri, yüksek kaliteli conta sistemleri ve gelişmiş mühendislik çözümleri sayesinde bu risk büyük ölçüde minimize edilmiştir ve düzenli periyodik kontrollerle kontrol altında tutulabilmektedir.

Mühendislik Tasarım Zorlukları: Akışkan viskoz sönümleyicilerin (FVD) hız bağımlı çalışan sistemler olması, yapısal tasarım sürecinde özel mühendislik hesaplamaları ve dinamik analizlerin gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır. Optimum performansın sağlanabilmesi için, sönümleyicilerin yapıya stratejik olarak yerleştirilmesi ve sistem parametrelerinin doğru şekilde belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Özellikle zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler ve frekans odaklı dinamik modelleme yöntemleri, FVD'lerin yapısal hareketlere nasıl tepki vereceğini öngörmek için detaylı şekilde ele alınmalıdır. Bu durum, tasarım sürecinin daha fazla mühendislik uzmanlığı ve gelişmiş analiz teknikleri gerektirmesine yol açabilmektedir.

Mimari Uyum ve Estetik Kaygılar: Akışkan viskoz sönümleyiciler (FVD), yapının dış yüzeylerine veya belirgin noktalara yerleştirildiğinde, mimari bütünlük açısından görsel değişikliklere neden olabilmektedir. Özellikle estetik kaygıların ön planda olduğu yapılar için, bu durum tasarım sürecinde dikkate alınması gereken bir faktördür. Ancak, iç mekânda kullanıldığında duvar veya bölme elemanlarının arkasına gizlenerek mimari tasarımın korunmasına olanak tanımakta ve görsel etkileri minimize

etmektedir. Ayrıca, modern yapı tasarımında FVD'lerin yapıya entegre edilmesi için mimari ve mühendislik çözümleri geliştirilmeye devam etmektedir.

Çalışma Koşullarına Bağımlılık: Akışkan viskoz sönümleyicilerin (FVD) performansı, ortam sıcaklığı, nem ve uzun süreli kullanım gibi dış etkenlere bağlı olarak değişkenlik gösterebilir. Aşırı sıcak veya soğuk hava koşullarında viskoz sıvının özelliklerinde değişim meydana gelebilir ve bu durum sönümleme kapasitesini etkileyebilir. Ancak, yeni nesil FVD'ler de kullanılan özel kimyasal bileşenler sayesinde bu etki büyük ölçüde azaltılmıştır.

Özel Montaj Gereksinimi: FVD'lerin yapıya entegrasyonu, geleneksel rijitlik artırıcı sistemlerden farklı olarak özel montaj detayları ve bağlantı elemanları gerektirebilir. Bu durum, uygulama sırasında ilave mühendislik hesaplamaları ve iş gücü ihtiyacı doğurabilir. Ayrıca, yanlış montaj veya bağlantı hataları, sistemin beklenen performansı göstermemesine neden olabilir.

Yüksek Frekanslı Titreşimler İçin Sınırlı Etki: FVD'ler, düşük ve orta frekanstaki dinamik yükleri etkin bir şekilde sönümleyebilirken, çok yüksek frekanslı titreşimler karşısında sınırlı etkiye sahip olabilir. Özellikle bazı endüstriyel makineler veya hassas laboratuvar ortamları için farklı türde sönümleyici çözümlerle birlikte kullanılması gerekebilir.

Sonuç olarak, akışkan viskoz sönümleyiciler (FVD), yapısal sistemlerin sismik dayanımını artırmak ve dinamik yüklerden kaynaklanan olumsuz etkileri minimize etmek için etkin bir çözüm sağlamaktadır. Hem tasarım ve inşaatı yeni olan yapılar hem de mevcut yapıların güçlendirilmesi amacıyla kullanılabilen bu sistemler, taşıyıcı elemanlara ek rijitlik kazandırmadan yapıların sismik performansını iyileştirerek uzun vadeli güvenlik sağlamaktadır. Sağladıkları yüksek sönümleme kapasitesi, bakım gereksinimlerinin düşük olması ve çeşitli yapısal sistemlere entegre edilebilmesi gibi avantajları, onları sismik dayanımın artırılması ve yapı performansının optimize edilmesi açısından değerli bir çözüm haline getirmektedir. Bununla birlikte, yüksek maliyet, mühendislik tasarım gereksinimleri ve periyodik denetim ihtiyacı gibi faktörler göz önünde bulundurularak her projede uygulanabilirliği detaylı bir analizle

değerlendirilmelidir. Bu faktörler dikkate alındığında, FVD'lerin etkili bir şekilde kullanımı için mühendislik hesaplamalarının titizlikle yapılması ve yapının ihtiyaçlarına uygun şekilde tasarlanması büyük önem taşımaktadır. Gelecekte, gelişen mühendislik hesaplama yöntemleri ve malzeme teknolojilerindeki ilerlemeler sayesinde FVD'lerin performansının daha da iyileştirilmesi ve yapı güvenliğine yönelik yenilikçi çözümler sağlaması beklenmektedir.

2.3.3 Sismik Kontrol Mekanizmalarının Hesap ve Tasarım İlkeleri

Akışkan viskoz sönümleyiciler (FVD) için, ülkemizde yürürlükte olan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği TBDY-2018 kapsamında doğrudan belirtilmiş herhangi bir tasarım koşulu bulunmamaktadır. Bununla birlikte, Bölüm 14 / Deprem Etkisi Altında Yalıtımlı Bina Taşıyıcı Sistemlerinin Tasarımı İçin Özel Kurallar başlığı altında, deprem yalıtımına yönelik elastomer mesnetler ve eğri yüzeyli sürtünmeli yalıtım birimlerinin kullanımına ilişkin hükümler yer almaktadır.

Sismik yükler ve dinamik etkiler altında yapı güvenliğini artırmak amacıyla geliştirilen çeşitli sismik kontrol mekanizmaları, dünya genelinde farklı mühendislik yaklaşımlarına göre tasarlanmakta ve ilgili yönetmeliklerle düzenlenmektedir. Akışkan viskoz sönümleyiciler (FVD), sismik enerji sönümleme sistemlerinin önemli bir bileşeni olarak taşıyıcı sistemlerin performansını artırmak ve yapıların dinamik yükler altındaki davranışını iyileştirmek amacıyla çeşitli ülkelerde farklı standartlara tabi tutulmaktadır.

Her ülke, yerel yapı dinamikleri, sismik risk düzeyi ve mühendislik yaklaşımları doğrultusunda bu sistemlerin tasarım ve uygulama esaslarını belirlemektedir. Bu kapsamda, sismik yalıtım sistemleri, enerji sönümleyici elemanlar ve aktif - pasif kontrol mekanizmaları gibi farklı teknolojilerle entegre edilen taşıyıcı sistemler için belirlenen yönetmelik ve standartlar ülkeden ülkeye değişiklik göstermektedir. Özellikle yüksek sismik risk taşıyan bölgelerde, akışkan viskoz sönümleyicilerin yapı tasarımında kullanımıyla ilgili kapsamlı yönetmelikler geliştirilmiştir. Bu yönetmelikler, deprem yalıtımlı ve sismik olarak güçlendirilmiş taşıyıcı sistemlerin hesap ve tasarım ilkelerini içermekte olup, bazı önde gelen standartlar aşağıda sıralanmıştır:

➤ Amerika Birleşik Devletleri (USA)

- ✓ **ASCE 7-22 (Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures):** Yapısal sistemlerin sismik performansına yönelik yükleme standartlarını içerir ve sönümleyicilerin tasarımına ilişkin esasları belirler.
- ✓ **ASCE 41-17 (Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings):** Mevcut yapıların deprem güvenliğini değerlendirme ve güçlendirme esaslarını belirleyen standarttır. Enerji sönümleyici sistemlerin kullanımına ilişkin genel ilkeleri içermekle birlikte, tasarım detayları için ASCE 7 standardına referans verir.
- ✓ **FEMA P-1050 (NEHRP Recommended Seismic Provisions):** Deprem güvenliği kapsamında, sismik tasarım ilkeleri ve enerji sönümleyici sistemlerin uygulanmasına yönelik temel hükümleri belirleyen bir rehber niteliğindedir. Bu yönetmelik, yapıların deprem dayanımını artırmaya yönelik genel çerçeveyi sağlamakta olup, ilgili tasarım prensiplerinin uygulamaya aktarılmasına yönelik hesaplamalar ve örnek projeler ise tamamlayıcı nitelikteki FEMA P-1051 (NEHRP Recommended Seismic Provisions - Design Examples) dokümanında detaylandırılmaktadır.
- ✓ **AISC 341-16 (Seismic Provisions for Structural Steel Buildings):** Çelik yapılar için sismik tasarım kurallarını içermekte olup, enerji sönümleyici sistemlerin entegrasyonuna dair gereklilikleri belirler.

➤ Avrupa Birliği Ülkeleri (European Norm)

- ✓ **Eurocode 8 (EN 1998-1:2004 - Design of Structures for Earthquake Resistance):** Deprem etkisi altındaki yapıların tasarımına ilişkin genel hükümleri içerir ve viskoz sönümleyicilerin kullanımına dair tasarım gereksinimlerini tanımlar.

- ✓ **ETAG 023 (Guideline for Seismic Isolation Devices):** Avrupa Teknik Onay Kılavuzu kapsamında, sismik izolatörler ve sönümleyicilerin performans gerekliliklerini belirleyen teknik düzenlemeleri içermektedir.

➤ **Çin (China)**

- ✓ **GB 50011-2010 (Code for Seismic Design of Buildings):** Çin'de binaların deprem tasarımına ilişkin zorunlu standart olup, sismik enerji sönümleyicilerin kullanımına dair teknik gereklilikleri içermektedir.

- ✓ **JGJ 297-2013 (Technical Specification for Energy Dissipation of Buildings):** Akışkan viskoz sönümleyiciler ve diğer sismik enerji sönümleyici sistemlerin tasarım kriterlerini belirleyen yönetmeliktir.

➤ **Rusya (Russia)**

- ✓ **SP 14.13330.2018 (Building Seismic Resistance Standards):** Depreme dayanıklı yapıların tasarımı için teknik gereksinimleri içerir ve sismik sönümleyici sistemlerin hesap esaslarını kapsar.

- ✓ **GOST R 53778-2010 (Buildings and Structures - Rules of Examination and Monitoring):** Binaların performans değerlendirmesi ve titreşim sönümleme sistemlerinin denetimi için kılavuz niteliğindedir.

Ülkelere göre belirlenen yönetmeliklerin yanı sıra, uluslararası düzeyde kabul gören mühendislik kaynaklarından biri de **2012 - IBC (International Building Code) SEAOC (Structural Engineers Association of California) Structural / Seismic Design Manual Cilt 5**'tir. Bu kılavuz, 2012 - Uluslararası Yapı Kodu (IBC)'nin yapısal tasarım hükümlerinin uygulanmasına yönelik kapsamlı bir teknik doküman niteliğinde olup, özellikle sismik yalıtım ve ek sönümleme sistemlerine sahip yapıların mühendislik tasarım esaslarını detaylandırmaktadır. Bu kapsamda, sismik yalıtım sistemleri içerisinde yer alan kurşun çekirdekli kauçuk mesnetler ve sürtünmeli sarkaç mesnetlerinin yanı sıra, ek sönümleme sistemlerine entegre edilen özel moment aktaran çerçeveler gibi taşıyıcı

elemanların mühendislik prensipleri ve tasarım kriterleri ele alınmaktadır. Yapı mühendisliği ve depreme dayanıklı yapılar kapsamında, özellikle akışkan viskoz sönümleyiciler gibi enerji sönümleyici mekanizmaların mevcut yapı sistemlerine entegrasyonu ve tasarımı açısından, ASCE 7-22 ve ASCE 41-17 standartları ile birlikte bu kılavuzun incelenmesi, sismik dayanımın artırılması ve yapı güvenliğinin sağlanması açısından önemli bir referans oluşturmaktadır.

Gelecekte, yapay zekâ (AI) destekli sistemler, büyük veri analitiği, nesnelerin interneti (IoT) ve ileri sensör teknolojileriyle birleşerek sismik kontrol mekanizmalarının daha akıllı, verimli ve uyarlanabilir hale gelmesini sağlayacaktır. Günümüzde aktif, yarı-aktif ve hibrit sistemler önceden belirlenmiş kontrol algoritmalarına dayalı olarak çalışırken, yapay zekâ destekli sistemler sayesinde bu süreç dinamik ve kendi kendine öğrenebilen bir yapıya ulaşacaktır.

Özellikle makine öğrenimi (ML) ve derin öğrenme (DL) tabanlı modeller, farklı deprem senaryolarını analiz ederek en uygun sismik koruma stratejilerini belirleyebilecek; bu sayede yapılar, geçmiş depremlerden öğrenerek kendini sürekli optimize edebilecektir. Örneğin, bir binaya yerleştirilen akıllı sönümleyiciler, AI algoritmaları ile gerçek zamanlı verileri analiz ederek deprem öncesi, sırası ve sonrasında en uygun sönümleme mekanizmasını devreye sokabilir.

Buna ek olarak, gelişmiş sensörler ve IoT teknolojileri, yapının deprem anındaki tepkisini anlık olarak ölçerek merkezî bir veri ağına iletebilir. Bu veriler, yapay zekâ algoritmaları tarafından işlenerek, olası yapısal zayıflıklar tespit edilebilir ve gelecekteki müdahaleler için önleyici bakım stratejileri oluşturulabilir. Bu sistemler, yalnızca deprem sırasında değil, deprem öncesinde de riskleri azaltmaya yardımcı olacak proaktif önlemler sunacaktır. Akıllı malzemeler ve adaptif sistemler, moleküler düzeyde yapı değişikliği yapabilen malzemeler sayesinde depreme karşı daha etkin bir direnç sağlayacaktır. Piezoelektrik veya elektro-reolojik malzemelerle geliştirilen akıllı yapı elemanları, sismik hareketleri algılayarak anında sertliklerini veya sönümleme kapasitelerini değiştirebilir. Böylece, yapıların dinamik özellikleri optimize edilerek enerji dağılımı ve deprem yüklerinin aktarımı daha verimli hale getirilebilir.

Hibrit çözümler açısından, yapay zekâ destekli sistemlerin mevcut pasif ve aktif sistemlerle entegre edilmesiyle, tamamen otonom çalışan sismik kontrol mekanizmaları geliştirilecektir. Bu hibrit sistemler, deprem sırasında en uygun sismik kontrol mekanizmasını belirleyerek, enerji tüketimini ve bakım maliyetlerini optimize ederken, yapının güvenliğini sağlayacaktır.

Sonuç olarak, gelecekte sismik izolasyon ve kontrol sistemleri, yapay zekâ, akıllı malzemeler, adaptif kontrol mekanizmaları ve büyük veri analitiği ile daha etkin, esnek ve sürdürülebilir hale gelecektir. Bu gelişmeler, deprem mühendisliği alanında çığır açıcı yeniliklere yol açarak, yapıların daha güvenli ve dayanıklı olmasını sağlayacaktır.

2.4. Yapı Dinamiği ve Analiz Yöntemleri

Yapı dinamiği, yapıların zamana bağlı dinamik yükler altındaki davranışlarını inceleyen bir mühendislik disiplindir. Yapılar yalnızca statik yükler değil, deprem, rüzgâr, trafik ve patlama gibi dinamik yüklere de maruz kalmaktadır. Bu yüklerin analizi, güvenli ve dayanıklı tasarımlar geliştirmek için kritik öneme sahiptir.

Dinamik yükler sürekli veya geçici olabilir. Rüzgâr yükleri zaman içinde değişirken, deprem yükleri ani ve karmaşık bir yapıya sahiptir. Yapıların bu yükler altındaki tepkisi, kütle, rijitlik ve sönüm oranı gibi parametrelerle belirlenir.

Yapı dinamiği, serbest ve zorlanmış titreşim olmak üzere iki temel başlıkta incelenir. Serbest titreşim, yapının dış kuvvet olmadan gerçekleştirdiği salınımı analiz ederken, zorlanmış titreşim dış yükler altındaki dinamik yanıtı belirler. Rezonans olgusu, yapının doğal frekansına yakın yüklemelerde büyük salınımlara yol açarak yapısal hasarlara neden olabilir.

Matematiksel modelleme teknikleri arasında tek serbestlik dereceli sistemler (SDOF) ve çok serbestlik dereceli sistemler (MDOF) yer alır. SDOF sistemleri temel titreşim davranışlarını anlamaya yönelik olup, MDOF sistemleri daha karmaşık yapıların dinamik analizini sağlar.

Yapı dinamiğinde doğrusal (linear) ve doğrusal olmayan (nonlinear) analiz yöntemleri kullanılır. Doğrusal analizler, elastik sınırlar içinde kalındığını varsayar ve küçük deformasyonları dikkate alırken, doğrusal olmayan analizler, plastik deformasyonlar, ikinci mertebe etkileri ve büyük deplasmanları içererek daha gerçekçi sonuçlar sunar. Özellikle büyük ölçekli yapılar için doğrusal olmayan analizler kritik önem taşımaktadır.

Yapı mühendisleri, gelişmiş analiz yöntemleriyle yapıların dayanıklılığını artırabilir, taşıma kapasitesini optimize edebilir ve sürdürülebilir tasarımlar geliştirebilir. Dinamik etkilerin doğru modellenmesi, yapı güvenliğini sağlarken aynı zamanda ekonomik ve uzun ömürlü tasarımlara katkıda bulunur.

Bilimsel araştırmalar ve teknolojik yenilikler, yapı dinamiği alanında sürekli gelişim sağlamak ve modern mühendislik çözümlerine yön vermektedir. Özellikle bilgisayar destekli modelleme, doğrusal olmayan analizler ve yeni nesil malzeme teknolojileri, yapı sistemlerinin daha güvenli ve dayanıklı hale gelmesini mümkün kılmaktadır.

2.4.1. Lineer Statik Analiz (Linear Static Analysis)

Lineer statik analiz, yapıların doğrusal elastik sınırlar içinde kaldığı varsayımına dayanan temel bir mühendislik analiz yöntemidir. Bu yöntemde, yapıya etki eden yüklerin zamana bağlı değişmediği kabul edilmekte ve malzemelerin mekanik davranışı doğrusal elastik model çerçevesinde ele alınmaktadır. Ayrıca, yapı üzerindeki deformasyonların küçük olduğu varsayıldığından, yer değiştirme ve iç kuvvet hesaplamaları süperpozisyon ilkesi doğrultusunda gerçekleştirilebilmektedir.

Özellikle düşük katlı binalar, köprüler ve sanayi yapıları gibi rijitlik dağılımında belirgin değişimler göstermeyen sistemlerin tasarım ve değerlendirme süreçlerinde yaygın olarak kullanılan bu yöntem, küçük deformasyonlar ve doğrusal malzeme özellikleri altında çalışan yapı sistemleri için güvenilir ve hesaplama açısından verimli bir yaklaşım sağlamaktadır. Hesaplama sürecinin görece basit olması, yapı güvenliğinin

temel düzeyde incelenmesine olanak tanıyarak hızlı ve pratik bir ön değerlendirme yapılmasını sağlamaktadır.

Ancak, büyük deformasyonların meydana geldiği, malzemenin doğrusal elastik varsayımını aşan plastik davranış sergilediği veya zamana bağlı etkilerin (sünme, yorulma, dinamik yükler) belirleyici olduğu durumlarda, lineer statik analiz yetersiz kalmaktadır. Bu gibi durumlarda, doğrusal olmayan veya dinamik analiz yöntemlerinin kullanılması gerekmektedir. Dolayısıyla, mühendislik tasarım süreçlerinde, yapı sisteminin özellikleri ve maruz kalacağı yükleme koşulları dikkate alınarak en uygun analiz yönteminin belirlenmesi büyük önem taşımaktadır.

2.4.2. Nonlinear Statik Analiz (Pushover-Nonlinear Static Analysis)

Nonlinear statik analiz, yapıların elastik sınırlarını aşarak plastik deformasyonlara maruz kaldığı durumları değerlendirmek amacıyla kullanılan bir yöntemdir. Bu analiz kapsamında en yaygın tekniklerden biri olan pushover analizi, yapıya belirli bir yükleme deseni altında artan yatay yüklerin uygulanmasıyla gerçekleştirilir. Analiz sürecinde, yapının farklı bölgelerinde plastik mafsalların oluşumu izlenerek sünek davranışı, dayanım kapasitesi ve göçme mekanizması belirlenir.

Özellikle deprem mühendisliği alanında yaygın olarak kullanılan bu yöntem, yapıların sismik dayanımını ve performans seviyelerini değerlendirmek için önemli bir araçtır. Deprem yükleri altında yapı sisteminin nasıl davrandığını anlamaya yardımcı olurken, performans esaslı tasarım yaklaşımlarında kritik bir rol oynar. Lineer analiz yöntemlerine kıyasla, yapının rijitlik ve dayanım kayıplarını dikkate alarak daha gerçekçi sonuçlar sunar. Böylece, yapı güvenliğinin artırılması ve tasarım optimizasyonunun sağlanması açısından mühendislik uygulamalarında etkin bir yöntem olarak öne çıkmaktadır.

P-Delta: P-Delta analizi, yapıların düşey yükler altındaki ikinci mertebe etkilerini dikkate alarak stabilite değerlendirmesi yapar. Büyük yatay yer değiştirmeler durumunda, düşey yüklerden kaynaklanan momentler artarak yapının denge durumunu olumsuz etkileyebilir. Bu etki, özellikle yüksek yapılar, ince kesitli elemanlar ve uzun açıklıklı

sistemler için kritik olup, rijitlik kayıplarını ve stabilite sorunlarını belirlemek amacıyla mühendislik tasarım süreçlerinde göz önünde bulundurulmalıdır.

P-Delta Plus Large Displacements (P-Delta + Büyük Deplasmanlar): Bu yöntem, P-Delta analizine ek olarak büyük deplasman etkilerini de dikkate alarak yapının geometrik doğrusal olmama durumunu daha hassas bir şekilde modellemektedir. Özellikle yüksek yapılar, uzun açıklıklı köprüler ve esnek sistemler gibi büyük deformasyonlara maruz kalan yapıların analizi için kritik bir yaklaşımdır. Geleneksel P-Delta analizine kıyasla, geometrik sertlik değişimlerini de içeren bu yöntem, daha gerçekçi ve güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlar.

2.4.3. Aşamalı İnşaat Analizi (Nonlinear Staged Construction Analysis)

Aşamalı inşaat analizi, büyük ölçekli yapıların kademeli inşaa sürecinde maruz kalacağı yükleme durumlarını ve yapısal davranış değişimlerini değerlendiren bir yöntemdir. Geleneksel analizler, yapının tamamlanmış halini esas alırken, nonlinear aşamalı inşaat analizi, inşaat aşamalarına bağlı olarak deformasyon, iç kuvvet dağılımı ve oturma etkilerini dikkate alır.

Özellikle betonarme yapılarda, zamana bağlı büzülme, sünme ve diferansiyel oturma gibi etkilerin analiz edilmesi açısından önemlidir. Bu yöntem, yüksek katlı binalar, uzun açıklıklı köprüler, barajlar ve tüneller gibi büyük ölçekli mühendislik yapılarının güvenli ve optimize tasarımı için kritik bir değerlendirme aracıdır.

Aşamalı inşaat analizinin temel avantajları şunlardır:

- ✓ **Zamana bağlı malzeme davranışlarının modellenmesi:** Betonarme yapılarda büzülme ve sünme gibi uzun vadeli deformasyonların etkisini değerlendirir.
- ✓ **Geçici yük ve destek koşullarının analizi:** İnşaat sürecinde farklı yükleme senaryoları ve geçici destek elemanlarının etkisini dikkate alır.

- ✓ **İç kuvvet değişimlerinin izlenmesi:** Yapının kademeli inşası sırasında oluşabilecek aşırı gerilmeler ve oturma farklılıklarını önceden belirler.

Sonuç olarak, aşamalı inşaat analizi, büyük ölçekli projelerde yapının güvenli ve sürdürülebilir şekilde inşa edilmesini sağlamak amacıyla doğrusal olmayan malzeme ve geometri etkilerini dikkate alan kritik bir mühendislik analiz yöntemidir. Bu yaklaşım, yapıların inşaat sürecindeki davranışını daha gerçekçi bir şekilde modelleyerek, uzun vadeli performansın güvence altına alınmasına katkıda bulunmaktadır.

2.4.4. Modal Analiz (Modal Analysis)

Modal analiz, yapıların doğal frekanslarını, titreşim modlarını ve mod şekillerini belirlemek için kullanılan temel dinamik analiz yöntemlerinden biridir. Yapının serbest titreşim davranışını inceleyerek belirli frekanslardaki hareket karakteristiklerinin tespit edilmesi sağlar. Bu analiz, deprem mühendisliği, rüzgâr mühendisliği ve makine mühendisliği gibi alanlarda kritik bir rol oynar.

Özellikle deprem ve rüzgâr yükleri altında yapıların dinamik tepkisini anlamak ve tasarım sürecinde gerekli önlemleri almak amacıyla uygulanır. Yapının farklı mod şekilleri ve her bir moda karşılık gelen doğal frekanslar belirlenerek, modal kütle katılım oranları analiz edilir. Böylece, dış kuvvetler altında yapının nasıl tepki vereceği daha gerçekçi bir şekilde öngörülebilir.

Modal analiz, genellikle doğrusal dinamik analizlerin temelini oluşturur ve iki ana yaklaşımı içerir:

- ✓ **Serbest Titreşim Analizi:** Yapının herhangi bir dış kuvvet etkisi olmaksızın sadece doğal titreşim özelliklerini belirlemeye odaklanır. Bu analiz, yapının doğal frekanslarını ve mod şekillerini tespit ederek dinamik karakteristiklerini anlamaya yardımcı olur.

- ✓ **Zorlanmış Titreşim Analizi:** Deprem, rüzgâr veya makine titreşimleri gibi dış kuvvetlerin etkisi altında yapının modal yanıtlarını değerlendirir. Bu yöntem, yapıların dış uyarımlar altında nasıl tepki vereceğini analiz etmek için kullanılır.

Deprem mühendisliğinde, modal analiz sonuçları kullanılarak yapıların dinamik tepki analizini gerçekleştirmek için çeşitli modal birleştirme yöntemleri uygulanmaktadır. En yaygın yöntemler şunlardır:

CQC (Complete Quadratic Combination) Yöntemi: Modlar arasındaki kısmi korelasyonu dikkate alarak daha gerçekçi bir modal tepki analizi sağlar. Özellikle birbirine yakın doğal frekanslara sahip sistemlerde, modlar arası etkileşim önemli hale geldiğinden, bu yöntem yüksek katlı binalar ve uzun açıklıklı köprüler gibi yapı sistemlerinde daha güvenilir sonuçlar üretir.

SRSS (Square Root of Sum of Squares) Yöntemi: Modlar arasındaki bağımsızlık varsayımına dayanarak maksimum modal tepkileri belirler. Farklı modlardaki maksimum yanıtların karelerinin toplamının karekökü alınarak hesaplanan bu yöntem, geniş frekans aralığına sahip yapı sistemleri için hızlı ve pratik bir çözüm sunar. Ancak, yakın frekanslı modlar arasındaki etkileşimi göz ardı ettiği için, yüksek modal katılımı olan sistemlerde CQC yöntemine kıyasla daha az hassas sonuçlar verebilir.

2.4.5. Tepki Spektrumu Analizi (Response Spektral Analysis)

Response spektral analiz, yapıların deprem yönetmeliklerinde tanımlanan spektral ivme değerlerini kullanarak dinamik tepkilerini belirleyen bir yöntemdir. Modal analiz sonuçlarıyla birleştirilerek, yapının maksimum ivme, hız ve deplasman değerleri hesaplanır. Özellikle deprem mühendisliği alanında yaygın olarak kullanılan bu yöntem, yapının belirli periyotlarda nasıl tepki vereceğini analiz ederek tasarım sürecine önemli katkılar sağlar.

Bu yöntem, modal analiz ile elde edilen doğal frekanslar ve mod şekillerini temel alır. Yapının kütle ve rijitlik matrisleri oluşturularak modal tepki analizleri gerçekleştirilir. Analiz sonucunda, yapı elemanlarının deprem sırasında maruz kalacağı

maksimum kesme kuvvetleri, momentler ve deplasman değerleri belirlenir. Doğrusal sistemler için uygun olan spektral analiz, doğrusal olmayan davranışların modellenenilmesi için pushover analizi veya zaman tanım alanında analiz gibi yöntemlerle desteklenebilir.

Response spektral analiz kapsamında, yapıların modal davranışlarını belirlemek amacıyla Eigen ve Ritz yaklaşımları olmak üzere iki farklı yöntem kullanılmaktadır.

Eigen Yöntemi: Öz vektör yöntemi, yapıların serbest titreşim analizini gerçekleştirerek doğal frekanslarını ve mod şekillerini belirlemek için kullanılan temel modal analiz tekniklerinden biridir. Bu yöntem, yapının serbest titreşim hareketini inceleyerek doğal frekansları ve mod şekillerini belirler ve böylece dinamik davranış analizlerinde kritik bir rol oynar.

Bir yapı serbest titreşime tabi tutulduğunda, her serbestlik derecesine sahip kütle noktası belirli bir frekansta salınım yapar. Yapının modal özellikleri, öz titreşim denklemlerinin (eigen value) çözülmesiyle belirlenir. Bu süreçte doğal frekanslar (ω_n) ve mod şekilleri (ϕ_n) hesaplanarak, yapının dış yükler karşısındaki dinamik tepkisi daha doğru bir şekilde modellenenebilir.

Bu yöntemde, yapının kütle (M) ve rijitlik (K) matrisleri oluşturularak aşağıdaki genel özdeğer denklemi çözülür:

$$(K - \lambda M)\phi = 0 \quad (2.21)$$

- ✓ **K**, rijitlik matrisini,
- ✓ **M**, kütle matrisini,
- ✓ **λ** , karakteristik özdeğerleri (doğal frekansların karesi),
- ✓ **ϕ** , özvektörleri (mod şekilleri)

Bu denklemin çözülmesiyle yapının tüm doğal frekansları ve bunlara karşılık gelen mod şekilleri belirlenir. Öz vektör yöntemi, herhangi bir dış yükleme olmaksızın, yapının içsel dinamik özelliklerini analiz etmek için kullanılır ve modal analiz

yöntemlerinin temelini oluşturur. Elde edilen modal bilgiler, zaman tanım alanında analiz (time history analysis) veya spektral analiz gibi daha karmaşık dinamik analizler için temel teşkil eder.

Öz vektör yönteminin genel özellikleri aşağıda belirtildiği gibidir:

- ✓ Serbest titreşim analizi yaparak doğal frekansları ve mod şekillerini belirler.
- ✓ Rezonans riskinin değerlendirilmesinde kullanılır ve modal analizlerin temelini oluşturur.
- ✓ Dış yükleme olmaksızın, yapının içsel dinamik özelliklerini analiz eder.
- ✓ Büyük ölçekli sistemlerde hesaplama maliyeti yüksektir, her serbestlik derecesi için çözüm gerektirir.
- ✓ Düşük modal katılım durumlarında, bazı yüksek frekans bileşenleri ihmal edilebilir.

Ritz Yöntemi: Ritz yöntemi, eigen yöntemine alternatif olarak geliştirilmiş, daha hızlı ve optimize bir modal analiz tekniğidir. Daha az hesaplama gerektirmesi nedeniyle deprem mühendisliği ve belirli yükleme senaryolarına bağlı analizlerde yaygın olarak tercih edilir.

Bu yöntemde, yapıya belirli bir yükleme durumu uygulanarak mod şekilleri belirlenir. Eigen yönteminden farklı olarak, yalnızca belirli yükleme koşulları altında en etkili modları bulmaya odaklanır. Özellikle deprem kuvvetleri gibi belirli yükleme senaryoları dikkate alınarak, yapının en fazla etkileneceği modal bileşenler belirlenir. Bu sayede, küçük ve önemsiz modlar hesaplamaya dâhil edilmez, bu da hesaplama süresini ve işlem maliyetini önemli ölçüde azaltır.

Ritz yönteminin genel özellikleri aşağıda belirtildiği gibidir:

- ✓ Belirli yükleme durumları dikkate alınarak, en baskın modlar seçilir ve analiz süresi optimize edilir.
- ✓ Doğrusal olmayan sistemler ve deprem mühendisliği uygulamalarında daha etkin sonuçlar sağlar.

- ✓ Eigen yöntemine kıyasla daha az hesaplama gerektirdiği için, büyük ölçekli yapılar için uygundur.
- ✓ Tüm modal bileşenleri analiz etmediğinden, bazı yüksek frekans etkileri göz ardı edilebilir.
- ✓ Mod seçimleri mühendislik bilgisi gerektirir, yanlış seçimler analiz doğruluğunu olumsuz etkileyebilir.

2.4.6. Zaman Tanım Alanında Analiz (Time History Analysis)

Zaman tanım alanında analiz, zamana bağlı değişen yükler altında yapıların dinamik tepkisini belirlemek için kullanılan en gelişmiş analiz yöntemlerinden biridir. Deprem, rüzgâr, patlama ve makine titreşimleri gibi dinamik etkiler altında yapıların zaman içerisindeki davranışlarını değerlendirmek amacıyla uygulanır.

Bu yöntem, Newton'un ikinci yasasına dayalı hareket denklemlerinin zamana bağlı çözümüne dayanarak yapının anlık deplasman, hız ve ivme değişimlerini belirler ve geçici ya da periyodik yükler altındaki tepkisini analiz eder. Deprem mühendisliği, yüksek hızlı tren hatları, rüzgâr tüneli testleri, patlama yükleri ve büyük ölçekli köprü sistemleri gibi birçok alanda kritik bir analiz yöntemi olarak kullanılır.

Spektral analiz yöntemlerinden farklı olarak, zaman tanım alanında analiz, yapının zamana bağlı tüm anlık tepkilerini dikkate alarak daha ayrıntılı ve gerçekçi sonuçlar sunar. Doğrusal (linear) ve doğrusal olmayan (nonlinear) analizler ile uygulanabilir; doğrusal analizlerde elastik sınırlar korunurken, doğrusal olmayan analizlerde malzeme akma, plastik deformasyon ve ikinci mertebe etkileri gibi faktörler dikkate alınır. Bu sayede mühendisler, yapı sistemlerinin performansını daha hassas bir şekilde değerlendirebilir.

Sonuç olarak, zaman tanım alanında analiz, deprem mühendisliği, sismik yalıtım sistemleri ve büyük ölçekli yapıların taşıyıcı sistemlerinin performans analizinde kritik bir rol oynar. Yapı tasarım süreçlerinde daha gerçekçi ve detaylı değerlendirmeler yapılmasını sağlayan bu yöntemin hesap yaklaşım çeşitleri aşağıda belirtilmiştir:

Linear Modal: Lineer modal analiz, modal süperpozisyon prensibine dayanan ve doğrusal dinamik analizlerde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Yapının modal analiz sonuçları temel alınarak, her bir modun zaman içerisindeki tepkisi hesaplanır ve bu tepkiler süperpozisyon yöntemi ile birleştirilerek sistemin genel cevabı elde edilir.

Lineer modal yönteminin genel özellikleri aşağıda belirtildiği gibidir:

- ✓ Modal ayrıştırma prensibi kullanılarak, karmaşık diferansiyel denklemler daha basit denklemlerle çözülebilir.
- ✓ Yalnızca doğrusal sistemler için geçerlidir ve doğrusal olmayan malzeme veya geometri değişimlerini içermez.
- ✓ Deprem, rüzgâr ve titreşim analizlerinde, yapıların periyodik yükler altındaki dinamik davranışlarını belirlemek için kullanılır.
- ✓ Tüm sistem yerine belirli sayıda modun çözülmesiyle hesaplama süresini optimize eder.
- ✓ Yüksek frekanslı etkiler ihmal edilebileceğinden, düşük modal katılım durumlarında sonuçların doğruluğunu azaltabilir.

Bu yöntem, mühendislik uygulamalarında hızlı ve verimli bir analiz yaklaşımı sağlayarak, büyük ölçekli yapılar için dinamik hesapların pratik bir şekilde gerçekleştirilmesine olanak sağlar.

Nonlinear Modal (FNA - Fast Nonlinear Analysis): Nonlinear model yöntemi, büyük deformasyonlar ve doğrusal olmayan malzeme davranışlarını içeren gelişmiş bir zaman tanım alanında analiz yöntemidir. Deprem mühendisliği, patlama yükleri ve yüksek süneklik gerektiren sistemlerde, doğrusal olmayan etkilerin yapısal davranış üzerindeki etkilerini analiz etmek için kullanılır.

Nonlinear modal yönteminin genel özellikleri aşağıda belirtildiği gibidir:

- ✓ Malzeme doğrusal olmama (elasto-plastik deformasyon, akma, kırılma) ve geometrik doğrusal olmama (büyük deplasmanlar, ikinci mertebe etkileri, burkulma) durumlarını dikkate alır.

- ✓ Deprem mühendisliği, uzun açıklıklı köprüler, nükleer reaktörler ve patlamaya dayanıklı yapıların dinamik analizlerinde yaygın olarak kullanılır.
- ✓ Plastik mafsall oluşumu, sünek davranış ve enerji tüketimi gibi doğrusal olmayan dinamik süreçleri içerdiğinden, klasik modal süperpozisyon yöntemlerine göre daha gerçekçi sonuçlar üretir.
- ✓ Zaman tanım alanında analizlerin doğruluk ve hassasiyetini artırarak, yapıların gerçeğe en yakın davranışlarının belirlenmesini sağlar.
- ✓ Hesaplama süresi yüksektir ve modelleme karmaşıklığı nedeniyle hassas veri girişi gerektirir; yanlış modelleme, hatalı sonuçlara yol açabilir.

Bu yöntem, doğrusal analizlerin yetersiz kaldığı durumlarda, yapıların dinamik davranışlarını gerçeğe en yakın şekilde analiz etmek için kritik bir araç olarak mühendislik hesaplamalarında kullanılmaktadır.

Linear Direct Integration (Lineer Doğrudan İntegrasyon): Linear Direct Integration, hareket denklemlerinin zamana bağlı doğrudan çözümüyle, yapıların dinamik yükler altındaki tepkisini belirleyen en doğru analiz yöntemlerinden biridir. Diferansiyel denklemler doğrudan çözüldüğünden, doğrusal ve doğrusal olmayan tüm dinamik etkiler analiz edilebilir.

Lineer direct integration yönteminin genel özellikleri aşağıda belirtildiği gibidir:

- ✓ Hareket denklemleri zaman adımlarıyla doğrudan çözülerek, tüm frekans bileşenleri analiz edilir.
- ✓ Doğrusal ve doğrusal olmayan versiyonları bulunur; doğrusal model elastik sınırları korurken, doğrusal olmayan model malzeme ve geometri değişimlerini dikkate alır.
- ✓ Deprem, darbe ve şok yüklerine maruz kalan yapıların gerçekçi dinamik analizine olanak tanır.
- ✓ Modal süperpozisyon gerektirmez, tüm sistemin zaman içindeki tepkisini doğrudan hesaplar.
- ✓ Hesaplama süresi uzundur ve büyük ölçekli modellerde sayısal kararsızlıkları önlemek için uygun zaman adımı seçimi gerektirir.

Bu yöntem, yüksek doğruluk gerektiren dinamik analizlerde tercih edilmekte olup, sismik yalıtımlı yapılar, patlama dayanımı gerektiren sistemler ve yüksek hassasiyetli mühendislik yapıları için kritik bir hesaplama tekniği olarak öne çıkmaktadır.

Nonlinear Direct Integration (Nonlinear Doğrudan İntegrasyon): Bu yöntem, doğrusal olmayan malzeme ve geometri etkilerini içeren doğrudan entegrasyon yöntemi olup, plastik mafsalların, malzeme akmalarının ve büyük deformasyonların yapısal davranış üzerindeki etkilerini detaylı olarak simüle eder. Çelik ve betonarme yapıların doğrusal olmayan dinamik analizlerinde kullanılarak, daha gerçekçi sonuçlar elde edilmesini sağlar.

Nonlinear direct integration yönteminin genel özellikleri aşağıda belirtildiği gibidir:

- ✓ Doğrusal olmayan malzeme ve geometri etkilerini dikkate alarak, plastik deformasyon ve büyük deplasmanları analiz eder. Hareket denklemlerini doğrudan zaman içinde çözüp, zamana bağlı tüm dinamik etkileri kapsar.
- ✓ Deprem mühendisliği, patlama yükleri ve yüksek enerjiye maruz kalan yapıların analizinde kullanılır.
- ✓ Modal süperpozisyon yöntemine gerek duymaz, tüm frekans bileşenlerini doğrudan hesaplar.
- ✓ Hesaplama maliyeti yüksektir, sayısal kararsızlıkların önlenmesi için uygun zaman adımı ve iterasyon teknikleri gerektirir.

Bu yöntem, yüksek hassasiyet gerektiren dinamik analizlerde kullanılarak, yapıların aşırı yükler altında sergilediği karmaşık davranışları en doğru şekilde modellemek için tercih edilmektedir.

2.4.7. Burkulma Analizi (Buckling Analysis)

Burkulma analizi, yapıların eksenel yükler altındaki stabilite sınırlarını belirlemek ve burkulma kapasitesini değerlendirmek için kullanılan bir yöntemdir. Özellikle çelik ve

ince kesitli yapı elemanlarında, stabilite kayıplarını önceden belirleyerek güvenli bir tasarım gerçekleştirmek açısından kritik öneme sahiptir.

Burkulma analizinin genel özellikleri aşağıda belirtildiği gibidir:

- ✓ Yapı elemanlarının burkulma sınırlarını ve kritik yük seviyelerini belirler.
- ✓ Çelik, alüminyum ve ince kesitli yapıların stabilite analizinde yaygın olarak kullanılır.
- ✓ Deprem ve rüzgâr gibi dinamik yüklerin neden olduğu burkulma risklerini değerlendirir.
- ✓ Doğrusal analizler elastik burkulmayı hesaplarken, doğrusal olmayan analizler plastik deformasyon ve ikinci mertebe etkilerini içerir.
- ✓ Uzun açıklıklı köprüler, kule yapılar ve yüksek binalarda güvenlik değerlendirmesi için kritik bir analiz yöntemidir.

Bu analiz, yüksek yapılar ve ince kesitli elemanlar gibi stabilite açısından risk taşıyan sistemlerde, burkulma riskini önceden tespit etmek ve güvenilir tasarım kararları almak için temel bir mühendislik aracıdır.

2.4.8. Hiperstatik Analiz (Hyperstatic Analysis)

Hiperstatik analiz, statik olarak belirsiz yapı sistemlerinde iç kuvvet dağılımlarını ve mesnet tepkilerini belirlemek için kullanılan bir yöntemdir. Sürekli kirişler, çok açıklıklı köprüler, çerçeve sistemler ve büyük ölçekli bina yapıları gibi rijitliği artırılmış taşıyıcı sistemlerde yaygın olarak uygulanır.

Hiperstatik analizinin genel özellikleri aşağıda belirtildiği gibidir:

- ✓ Statik belirsiz sistemlerin iç kuvvetlerini ve mesnet tepkilerini hesaplar.
- ✓ Yüklerin daha dengeli dağılmasını sağlayarak kesit optimizasyonuna katkıda bulunur.
- ✓ Deprem ve rüzgâr gibi yatay yükler altında yapı davranışını değerlendirir.

- ✓ Matris analiz yöntemleri ve sonlu elemanlar tekniği ile modellenerek detaylı incelemeler yapılmasını sağlar.
- ✓ Doğrusal ve doğrusal olmayan analizlerle, plastik mafsallar, ikinci mertebe etkileri gibi stabilite faktörleri dikkate alınabilir.

Bu yöntem, yüksek rijitlik gerektiren mühendislik yapılarında iç kuvvetlerin daha dengeli dağıtılmasını sağlayarak, güvenli ve ekonomik bir tasarım sürecine katkıda bulunur.

2.5. Kaynak Özetleri

Emre (2010) çalışmasında, çelik-beton karma yapı elemanlarının sismik tasarım ilkeleri incelenmiş, taşıyıcı sistemlerdeki etkileri değerlendirilmiştir. Geleneksel betonarme sistemlerde artan yapı ağırlığı ve deprem yüklerinin kompozit elemanlar sayesinde optimize edilerek aşılabileceği vurgulanmıştır. Çalışmada, kompozit döşeme, kiriş ve kolon sistemlerinin tasarım ilkeleri ve yapısal performansı incelenmiş, geleneksel sistemlerle karşılaştırma yapılmıştır. Analizler, kompozit sistemlerin daha yüksek rijitlik ve süneklik sağladığını, burkulma dayanımını arttırdığını ve deprem yükleri altında yapı hareketlerini azalttığını göstermiştir. Kompozit elemanların entegrasyonu ile yatay ötelenmeler azalmakta ve genel sismik performans iyileşmektedir. Çalışma, kompozit sistemlerin sismik tasarımda etkili bir alternatif sağladığını belirtmiştir.

Kasai vd. (2010) çalışmasında, Japonya'da bulunan E-Defense sarsma masası kullanılarak beş katlı çelik bir bina üzerinde dört farklı tip sönümleyici (çelik, yağ, viskoz ve viskoelastik sönümleyiciler) ile tam ölçekli deprem deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yapı, farklı sönümleyici kombinasyonlarıyla tekrar tekrar test edilerek enerji sönümleme kapasiteleri değerlendirilmiştir. Test sonuçları, tüm sönümleyici türlerinin kat ötelenmelerini ve kat ivmelerini önemli ölçüde azalttığını, ancak viskoz sönümleyicilerin en yüksek etkinliği sağladığını göstermektedir. Ayrıca, çelik sönümleyicilerde plastik deformasyon gözlenirken, viskoz ve viskoelastik sönümleyicilerin yapının elastik sınırlarını aşmadan etkin enerji sönümlemesi sağladığı belirlenmiştir. Çalışma, orta yükseklikteki binalar için sönümleyici sistemlerin kullanımının yapısal performansı artırmada kritik bir rol oynayabileceğini belirtmiştir.

Sesigür (2013) çalışmasında, yüksek binalarda çelik yapı sistemlerinin taşıyıcı sistem düzenleme ilkeleri ele alınmaktadır. Çelik çerçeve sistemleri, perde-duvar ve çekirdek sistemleri, tüp sistemler, yatay kafes kiriş sistemleri ve diagrid gibi taşıyıcı sistemler incelenmiştir. Yüksek yapılarda rijit çerçeve sistemlerinin belirli bir kat yüksekliğinden sonra yetersiz kaldığı, 150 metreyi aşan binalarda yalnızca perde veya çekirdek kullanımının yatay yük taşıma kapasitesi açısından uygun olmadığı vurgulanmaktadır. Çekirdek ve perde-duvar sistemlerinin çelik çerçevelerle entegrasyonu sağlanarak daha rijit ve stabil sistemler geliştirilmiştir. Tüp sistemlerin yüksek binalarda iç içe ve dış perde-duvarlı versiyonlarının kullanımına değinilmiş, yatay kafes kiriş sistemlerinin kırk kat üzeri yapılarda taşıyıcı sistem etkinliğini artırdığı ifade edilmiştir. Yüksek binalarda öngerilme teknikleriyle döşeme rijitliğinin artırılabilceği ve geniş açıklıklı yapılar için verimli çözümler üretilebileceği belirtilmiştir. Çalışmada, taşıyıcı sistemlerin rijitlik, deprem dayanımı, maliyet etkinliği ve kullanım kolaylığı açısından karşılaştırması yapılmış, özellikle perde-duvar ve çekirdek sistemleri ile çerçeve entegrasyonunun yapısal avantajları ön plana çıkarılmıştır.

Mathew ve Prabha (2014) çalışmasında, sıvı viskoz sönümleyicilerin (FVD) çok katlı betonarme binaların sismik performansına etkisi incelenmiştir. Çalışmada, altı ve on katlı simetrik kare bina modelleri oluşturulmuş ve FVD'nin farklı yerleşim senaryoları altında yapısal tepkisi SAP2000 yazılımı kullanılarak değerlendirilmiştir. Doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizleri sonucunda, FVD kullanımının kat ötelenmelerinde %74, taban kesme kuvvetlerinde %51 ve yapı içindeki ivmelerde %49 oranında azalma sağladığı belirlenmiştir. Özellikle FVD'lerin bina köşelerine yerleştirilmesinin en etkili düzenleme olduğu ortaya konmuştur. FVD'lerin yük taşıma sistemine eklenmesiyle daha küçük kesitli eleman kullanımı ve daha az rijitlik ihtiyacı sağlanarak ekonomik bir yapı tasarımı mümkün hale gelmiştir. Çalışma, FVD kullanımının yüksek sismik performans sağladığını ve bina tasarım süreçlerinde uygulanabilir bir çözüm sağladığını göstermektedir.

Aye ve Aung (2014) çalışmasında, on beş katlı betonarme bir binanın viskoz (VD) ve viskoelastik (VED) sönümleyiciler kullanılarak sismik tepkisinin iyileştirilmesi karşılaştırılmıştır. Mandalay'de yer alan L şeklinde bir bina üzerinde ETABS yazılımı ile yanıt spektrum analizi yapılmıştır. Sonuçlar, VED kullanılan sistemde kat

ötelenmelerinin %23-24, kesme kuvvetlerinin %11-32, momentlerin %10-22 ve yer değiştirmelerin %15-21 oranında azaldığını; yapısal ivmelerde %15-49 düşüş sağlandığını göstermektedir. VD kullanılan sistemde ise kat ötelenmeleri, kesme kuvvetleri ve yer değiştirmeler %50 oranında azalmıştır. Viskoz sönümleyicilerin viskoelastik sönümleyicilere kıyasla daha etkili bir enerji sönümleme mekanizması sağladığı ve yapının genel stabilitesini artırdığı belirlenmiştir. Çalışma, pasif enerji sönümleme sistemlerinin betonarme binalarda yapısal deformasyonları ve yanal kuvvetleri azaltmada etkili olduğunu göstermektedir.

Bao vd. (2015) çalışmasında, Çin’de inşa edilen süper yüksek binaların yapısal tasarım süreçleri ele alınmıştır. Çalışmada, mega çerçeve sistemleri, betonarme çekirdek tüpler, çelik çaprazlar ve sismik enerji sönümleme teknolojileri detaylandırılmıştır. Ayrıca, yüksek performanslı malzemelerin kullanımı, temel tasarım yaklaşımları ve mega yapı elemanlarının entegrasyonu değerlendirilmiştir. Yapılan analizler, süper yüksek yapıların rijitlik ve dayanımını artırmada kompozit yapı sistemlerinin önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Özellikle, rüzgâr ve deprem yüklerine karşı dayanıklılığı artırmak amacıyla viskoz sönümleyiciler ve sismik izolatörlerin kullanıldığı belirtilmiştir. Çalışma, süper yüksek binaların tasarım süreçlerinde yapısal etkinliği artırmak için yeni nesil mühendislik tekniklerinin uygulanmasının önemine vurgu yapmaktadır.

Shanmuga Priya vd. (2015) çalışmasında, binaların sismik performansını artırmak amacıyla kullanılan enerji sönümleme sistemleri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Çalışmada, pasif, aktif ve hibrit kontrol sistemleri ele alınmış, özellikle pasif enerji sönümleme cihazlarının yapısal güvenliği artırmadaki etkinliği vurgulanmıştır. Tuned mass dampers (TMD), viskoelastik sönümleyiciler, taban yalıtım sistemleri ve sürtünme sönümleyiciler gibi yöntemlerin performansları karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçları, pasif sönümleme sistemlerinin yapıların kat ötelemelerini ve sismik taleplerini önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Özellikle, taban yalıtım sistemlerinin düşük ve orta yükseklikteki binalarda etkili olduğu, viskoz sönümleyicilerin ise süneklik ve enerji sönümleme kapasitesi açısından avantaj sağladığı göstermiştir. Çalışma, enerji sönümleme sistemlerinin depreme dayanıklı yapı tasarımında kritik bir rol oynadığını ve mühendislik uygulamalarında daha yaygın olarak kullanılmalrı gerektiğini belirtmiştir.

İnce vd. (2015) çalışmasında, kompozit yapı sistemlerinin avantajları ve dezavantajları ele alınmıştır. Kompozit sistemlerin, betonarme yapılara kıyasla yapısal ağırlığı önemli ölçüde azalttığı ve sismik yükler altında daha iyi performans gösterdiği vurgulanmıştır. Çalışmada, kompozit kolon, kiriş ve döşeme sistemleri detaylandırılmış, bu elemanların tasarım kriterleri ve dayanım özellikleri irdelenmiştir. Kompozit kolonlarda çelik ve beton birleşimi ile dayanımın artırıldığı, kompozit kirişlerde ise kesme kuvveti transferinin önemli bir parametre olduğu belirtilmiştir. Kompozit döşemelerde ise çelik sacların kalıp ve donatı işlevi görerek hem inşaat süresini kısalttığı hem de maliyeti düşürdüğü ifade edilmiştir. Çalışma, kompozit yapı elemanlarının betonarme sistemlere kıyasla daha yüksek süneklik ve inşaat süreçlerinde önemli avantajlar sağladığını göstermiştir.

Yükselen (2015) çalışmasında, betonarme perdeler ile desteklenmiş çelik-beton kompozit yapıların deprem performansı kapsamlı bir şekilde ele alınmıştır. Eurocode 8 yönetmeliği çerçevesinde doğrusal olmayan statik analizler gerçekleştirilmiş, bu doğrultuda perde duvar modellemeleri ve çelik-beton kompozit taşıyıcı sistemlerin sismik tepkileri incelenmiştir. Çalışmada, OpenSEES yazılımı kullanılarak oluşturulan üç boyutlu yapı modeli üzerinde doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizleri gerçekleştirilmiş, yapı performans seviyeleri hedef deplasman değerleri doğrultusunda değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, çelik-beton kompozit sistemlerin rijitlik ve süneklik açısından avantaj sağladığını, deprem yükleri altında yapısal güvenliğini artırdığını ve taşıyıcı sistem tasarımında sismik dayanımı önemli ölçüde iyileştirdiğini belirtmiştir.

Chikhalekar ve Murudi (2015) çalışmasında, sabit tabanlı, taban yalıtımlı ve viskoz sönümleyicili (VD) yapıların sismik performansı karşılaştırmalı olarak incelenmektedir. SAP2000 yazılımı kullanılarak G+10 katlı betonarme yapılar modellenmiş ve bu sistemlerin sismik davranışları itme analizi ve yanıt spektrumu yöntemiyle analiz edilmiştir. Sonuçlar, taban yalıtımı kullanılan yapıların kat ötelenmelerini ve kat ivmelerini en fazla azalttığını, viskoz sönümleyicilerin ise enerji sönümleme kapasitesini artırarak yapısal deformasyonları kontrol ettiğini göstermektedir. Ayrıca, VD'lerin yapının modal periyodunu kısalttığı ve rijitliğini artırarak sismik

talepleri azalttığı belirlenmiştir. Çalışma, taban yalıtımı ve viskoz sönümleyicilerin deprem güvenliği açısından etkin mühendislik çözümleri sağladığını göstermiştir.

Suarez ve Gaviria (2015) çalışmasında, viskoz sönümleyicilerin düzensiz yerleşimi durumunda yapıların dinamik özellikleri analiz edilmiştir. Karmaşık özdeğer analizine dayalı olarak geliştirilen yöntem ile sönümleyici konumlarının yapıların doğal frekansları üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Çalışma, geleneksel frekans hesaplama yöntemlerinin sönümleyici matrisinin rijitlik veya kütle matrisine orantılı olmadığı durumlarda geçersiz olabileceğini göstermektedir. Yapılan simülasyonlar, viskoz sönümleyicilerin sadece enerji sönümleme işlevi görmekle kalmayıp, aynı zamanda titreşim frekanslarını da önemli ölçüde değiştirdiğini belirtmektedir. Sönümleyici yerleşiminin, yapıların serbest titreşim testlerindeki dinamik tepkileri doğrudan etkilediği belirlenmiştir. Çalışma, sismik mühendislik uygulamalarında viskoz sönümleyicilerin etkin bir şekilde kullanılabilmesi için yerleşim düzeninin kritik önem taşıdığını vurgulamaktadır.

Brown vd. (2015) çalışmasında, Christchurch'te inşa edilen beş katlı çelik ofis binasında kullanılan sıvı viskoz sönümleyiciler (FVD) ile desteklenmiş moment çerçeve sisteminin tasarım ve performansı incelenmiştir. Geleneksel moment çerçeve sistemlerine kıyasla FVD kullanımı, kat ötelenmelerini ve kat ivmelerini azaltarak yapısal hasarı minimize etmektedir. Çalışmada, yapının sismik dayanımının artırılması amacıyla FVD'lerin tasarımına yönelik doğrudan yer değiştirme tabanlı tasarım (DDBD) yaklaşımı benimsenmiş ve doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizleri ile doğrulanmıştır. Sonuçlar, FVD destekli sistemin, temel ve üst yapı elemanlarına gelen yükleri azaltarak daha ekonomik ve performans odaklı bir tasarım sağladığını göstermektedir.

Şenoğlu (2016) çalışmasında, çelik-beton kompozit yüksek yapıların deprem performansı doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizleri ile incelenmiştir. Çalışmada, 47 katlı çelik-beton kompozit bir yapının taşıyıcı sistemi çelik çerçeve ve merkezi çaprazlardan oluşacak şekilde modellenmiş, analizler ETABS yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İstanbul Yüksek Binalar Deprem Yönetmeliği doğrultusunda ölçeklenmiş deprem hareketleri ile yapılan simülasyonlarda, yapı elemanlarının süneklik kapasiteleri değerlendirilmiş ve taşıyıcı sistemin deprem etkileri altındaki davranışı

incelenmiştir. Sonuçlar, kompozit taşıyıcı sistemlerin yatay ötelenmeleri sınırlandırarak yapısal performansı iyileştirdiğini ve sünek davranış özellikleri sayesinde yüksek yapılar için güvenli ve etkin bir tasarım alternatifi sağladığını göstermektedir.

Santhosh Kumar vd. (2016) çalışmasında, sıvı viskoz sönümleyicilerin (FVD) çok katlı binalarda deprem, rüzgâr, darbe ve titreşim yüklerine karşı yapısal performansı nasıl artırdığı incelenmiştir. Çalışmada, FVD'lerin yapı sistemine eklenmesiyle deprem enerjisinin doğrudan yapı yerine sönümleyiciler tarafından absorbe edilerek yapısal deformasyonların azaldığı vurgulanmaktadır. Yapılan dinamik analizler, FVD kullanımıyla yatay kat ivmelerinin ve yanal yer değiştirmelerin %50'ye kadar azaldığını göstermektedir. Ayrıca, viskoz sönümleyicilerin geleneksel rijitleştirme yöntemlerine kıyasla yapısal yükleri artırmadan sismik performansı iyileştirdiği ifade edilmektedir. Çalışmada, 32 metre yüksekliğinde 10 katlı bir binada gerçekleştirilen uygulama örneği ele alınarak FVD'lerin yapı taban kesme kuvvetini %28 oranında azalttığı belirlenmiştir. Yapılan zaman tanım alanı analizleri, FVD'lerin yapısal deformasyonları %38 oranında, maksimum kat ötelenmelerini ise %50'ye kadar düşürdüğünü belirtmektedir. Çalışma, FVD sistemlerinin çok katlı binalarda ekonomik ve etkili bir sismik koruma yöntemi sağladığını ve gelecekte mühendislik uygulamalarında daha yaygın olarak tercih edileceğini öngörmektedir.

Ras ve Boumechra (2016) çalışmasında, sıvı viskoz sönümleyicilerin (FVD) çelik yapı tasarımında deprem enerjisini sönümleme kapasitesi incelenmiştir. Çalışma, on iki katlı çelik moment çerçeve sistemine diyagonal olarak yerleştirilen doğrusal FVD'lerin sismik performans üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla yapılmıştır. Boumerdes depremi (Cezayir, 2003) için gerçekleştirilen doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizleri SAP2000 programı kullanılarak yapılmış, sönümleyici olmadan, çaprazlarla güçlendirilmiş ve FVD'li sistemler karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, FVD kullanımının yapısal rijitliği artırmadan önemli düzeyde enerji sönümleme kapasitesi sağladığını ve çelik yapılar için gerekli malzeme miktarını azalttığını göstermektedir. Çalışmada, FVD'lerin, çerçeve sistemine eklenen sönümleme oranını %20-30'a kadar çıkararak yapıların deprem etkilerine karşı daha güvenli hale gelmesini sağladığı belirtilmiştir. Ayrıca, çaprazlı çerçeve sistemleri ile karşılaştırıldığında, FVD'lerin eklenen rijitlik nedeniyle ivmeyi artırmadan deformasyonları azalttığı gözlemlenmiştir. Bu bağlamda,

FVD kullanımının, sismik tasarım süreçlerinde ekonomik ve etkili bir çözüm sağladığı sonucu elde edilmiştir.

Wang ve Mahin (2016) çalışmasında, mevcut 35 katlı çelik moment çerçeve sistemine sahip bir yüksek binanın sismik performansının iyileştirilmesi amacıyla üç farklı enerji sönümleyici sistemin etkinliği değerlendirilmiştir. Yapı, Pre-Northridge bağlantı detayları içermesi nedeniyle ASCE 41-13 performans hedeflerini sağlayamamış ve sismik açıdan kırılğan olduğu belirlenmiştir. Bu doğrultuda, sıvı viskoz sönümleyiciler (FVD), viskoz duvar sönümleyiciler (VWD) ve burkulması engellenmiş çaprazlar (BRB) kullanılarak güçlendirme stratejileri karşılaştırılmıştır. Yapılan analizler sonucunda, FVD'lerin yapısal tepkileri en etkin şekilde kontrol ettiği, kat ötelenmelerini azalttığı ve en düşük ekonomik kayıpları sağladığı belirlenmiştir. Çalışmada, enerji sönümleyici sistemlerin, özellikle yüksek binalarda, sismik dayanımı artırmada önemli bir alternatif sağladığı vurgulanmaktadır.

Celep ve Özuygur (2017) çalışmasında, yüksek binaların yapısal tasarım ilkeleri, taşıyıcı sistem alternatifleri ve deprem mühendisliği açısından değerlendirilmesi ele alınmıştır. Yüksek binaların tasarımında çekirdek perde sistemleri, dış çerçeve sistemleri, tüp sistemler ve kompozit yapı elemanlarının kullanımı detaylandırılmıştır. Çalışmada, yüksek binaların büyük doğal periyotlara sahip olması nedeniyle deprem yükleri altındaki davranışlarının rijitlik özelliklerine bağlı olduğu vurgulanmış, özellikle yatay deplasmanların sınırlandırılması için uygun taşıyıcı sistem seçiminin kritik olduğu belirtilmiştir. Deprem ve rüzgâr yükleri altındaki performans analizleri kapsamında modern sönümleyici sistemlerin ve mühendislik çözümlerinin uygulanabilirliği tartışılmıştır. Sonuçlar, yüksek binalarda taşıyıcı sistemlerin rijitlik ve süneklik esasına göre tasarlanmasının yapısal güvenlik açısından kritik olduğunu ve sismik performansın artırılması için uygun malzeme ve sistem seçimlerinin büyük önem taşıdığını göstermektedir.

Santa Ana vd. (2017) çalışmasında, sismik mühendislikteki teknolojik gelişmelerin mimari tasarımlar üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yapısal mühendislik ile mimari estetik arasındaki ilişki ele alınarak, sismik bölgelerde inşa edilen yüksek yapılar için geliştirilen modern yapısal sistemler ve sismik sönümleme cihazları

değerlendirilmiştir. Çalışmada, moment aktaran çerçeveler, konsantrik ve eksantrik çaprazlı çerçeve sistemleri, taban izolasyon sistemleri, elastoplastik ve viskoelastik sönümleyiciler gibi deprem mühendisliği alanındaki yenilikçi çözümler incelenmiştir. Tarihsel süreç içinde sismik tasarımın evrimini ele alan çalışmada, 20. yüzyılda statik kuvvet yöntemlerinden modal analizlere, zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analizlere kadar mühendislik yaklaşımlarının nasıl geliştiği gösterilmiştir. Özellikle, yüksek binalarda kullanılan sismik yalıtım sistemlerinin bina rijitliği ve enerji sönümleme kapasitesi üzerindeki etkileri vurgulanmıştır. Sonuçlar, modern deprem mühendisliği teknolojilerinin, geleneksel mimari tasarım ilkeleri ile entegre edilerek yüksek yapıların daha güvenli ve sürdürülebilir şekilde tasarlanmasına olanak sağladığını belirtmektedir.

Hiçyılmaz (2017) çalışmasında, yapısal düzensizliklere sahip çelik yapılarda viskoz sönümleyicilerin (VD) etkisi incelenmiş ve yeni bir bağlantı tipi önerilmiştir. Çalışmada, farklı konfigürasyonlardaki VD'lerin sismik performansa etkisi değerlendirilmiş ve çeşitli düzensizliklere sahip yapı modelleri üzerinde analizler gerçekleştirilmiştir. Burulma düzensizliği olan yapıların VD ile güçlendirilmesi, geri çekme düzensizliği bulunan çelik çerçevelerde optimum sönümleyici dağılımı ve dolgu duvar süreksizliklerinin VD kullanılarak giderilmesi gibi konular ele alınmıştır. Sonuçlar, optimum yerleştirilmiş VD'lerin kat ötelenmelerini ve iç kuvvetleri önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Yeni önerilen bağlantı tipi, geleneksel sönümleyici konfigürasyonlarına kıyasla daha iyi performans sağlamış ve yapıların deprem dayanımını artırmıştır.

Reddy vd. (2017) çalışmasında, viskoz sönümleyicilerin (VD) kullanıldığı asimetrik yüksek katlı bir binanın sismik performansı incelenmiştir. Çalışmada, 20 katlı bir konut binası modellenmiş ve ETABS 2013 yazılımı kullanılarak statik ve dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Yapı, Hindistan'ın Zone 2 ve Zone 5 deprem bölgelerinde üç farklı zemin tipi üzerinde değerlendirilmiş ve VD kullanımı ile moment, kesme kuvveti ve yer değiştirme değerleri karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, VD'lerin yapı rijitliğini artırmadan kat ötelenmelerini önemli ölçüde azalttığını ve yapısal deformasyonları minimize ettiğini göstermektedir. Çalışma, sismik yönetmeliklere uygun olarak yüksek binaların deprem güvenliğini artırmak için VD kullanımının etkinliğini vurgulamaktadır.

Sinha ve Singh (2017) çalışmasında, sıvı viskoz sönümleyicilerin (FVD) betonarme moment çerçevesi (RCC-MRF) yapıların sismik performansını artırmadaki etkisi incelenmiştir. 12 katlı bir yapı modeli üzerinde ETABS yazılımı ile doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizi gerçekleştirilmiştir. Modelde FVD kullanılan ve kullanılmayan iki farklı yapı karşılaştırılmış ve kat ötelenmeleri, maksimum deplasmanlar ve enerji dağılımı açısından incelenmiştir. Sonuçlar, FVD'lerin kat ötelenmelerini ve deplasmanları önemli ölçüde azalttığını, ayrıca yapının genel enerji dağılım kapasitesini artırarak sismik dayanımını iyileştirdiğini göstermektedir. Çalışma, FVD'lerin sismik yalıtım ve yapısal kontrol sistemleri olarak büyük ölçekli yapılarda uygulanabilirliğini vurgulamaktadır.

Mir ve Moon (2018) çalışmasında, yüksek binalar için yapısal sistemlerdeki gelişmeler incelenmiştir. Çalışma, son yıllarda ortaya çıkan taşıyıcı sistemleri ve gelecekteki potansiyel sistemleri değerlendirmektedir. Özellikle, tübüler sistemlerin modifikasyonları, çapraz takviyeli mega tüpler ve diyagrid sistemler ele alınmıştır. Çekirdek-dış konsol taşıyıcı sistemlerin adaptasyonu ve süper çerçeve sistemlerinin bağımsız veya birleşik mega yüksek binalarda kullanım potansiyeli tartışılmıştır. Karma taşıyıcı sistemlerin, günümüzün karmaşık proje gereksinimlerine çözüm sağlamada önemli olduğu vurgulanmıştır. Çalışmada, kompozit yapısal sistemlerin yaygınlaşması ve betonarme çekirdek kullanımındaki son eğilimler de ele alınmıştır. Yüksek bina inşaatının gelecekte de devam edeceği ve bu sürecin yeni taşıyıcı sistem inovasyonlarıyla destekleneceği öngörülmektedir.

Amini (2018) çalışmasında, kompozit yapıların dinamik davranışları geleneksel betonarme yapılar ile karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda, çok katlı yapı modelleri oluşturularak deprem yükleri altındaki performansları analiz edilmiştir. Yapısal analizlerde, kat ötelemeleri, periyot değerleri, kat kesme kuvvetleri ve deprem yüklerinin etkisi değerlendirilmiştir. Sonuçlar, kompozit yapıların düşük ağırlıkları sayesinde deprem kuvvetlerini azalttığını, ancak betonarme yapılara göre daha büyük periyot ve kat ötelemelerine sahip olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, kompozit yapıların daha hafif olmaları nedeniyle, genel deprem performanslarının betonarme yapılara kıyasla daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Çalışma, kompozit sistemlerin çok katlı yapılarda mühendislik açısından önemli avantajlar sağladığını belirtmektedir.

Olabi vd. (2018) çalışmasında, kompozit perde duvarların yatay yükler altındaki davranışı incelenmiştir. Geleneksel betonarme perde duvarlara alternatif olarak kompozit sistemlerin sismik performansa etkisi araştırılmıştır. Çalışmada, L kesitli çelik levhalardan oluşturulan 1/3 ölçekli bir kompozit perde duvar üretilerek Selçuk Üniversitesi Deprem Laboratuvarı'nda tersinir yükler altında test edilmiştir. Elde edilen veriler, OpenSees yazılımı ile oluşturulan sonlu eleman modeli ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Parametrik analizler sonucunda çelik levha kalınlığının ve malzeme mukavemetinin yatay yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde artırdığı görülmüştür. Çalışma, kompozit perde duvarların donatı yoğunluğu ve beton yerleşimi gibi geleneksel sistemlerde karşılaşılan problemlere çözüm sunarak, sismik performansı iyileştiren bir alternatif oluşturduğunu belirtmektedir.

Huang (2018) çalışmasında, çelik moment çerçevesi (MRF) binalarda viskoz sönümleyicilerin (VD) optimum yerleşim stratejileri incelenmiştir. Genetik algoritmalar (GA) ve doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizleri (NRH) kullanılarak farklı yerleşim senaryoları test edilmiştir. Çalışmada hem yatay hem de dikey damper dağılımlarının sismik performansa etkisi karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, optimum damper yerleşiminin yapısal deformasyonları ve temel kesme kuvvetlerini %30-50 oranında azalttığını göstermektedir. Dengeli dağıtılan sönümleyicilerin, özellikle yüksek katlı yapılarda kat ötelenmelerini etkili şekilde kontrol ettiği belirlenmiştir. Çalışma, mevcut yönetmeliklere uygun sönümleyici yerleşimi için optimize edilmiş bir tasarım çerçevesi sağlamaktadır.

Altieri vd. (2018) çalışmasında, doğrusal olmayan viskoz sönümleyicilerin (FVD) yapıların sismik korunması için güvenilirlik bazlı optimum tasarımı ele alınmıştır. Çalışma, yapısal sistemlerin deprem yüklerine karşı dayanıklılığını artırmak amacıyla FVD'lerin tasarım parametrelerinin güvenilirlik analizleriyle optimize edilmesini hedeflemiştir. FVD'lerin sönüm katsayısı ve hız üssü gibi parametrelerin optimum değerleri belirlenmiş, bu süreçte güvenilirlik analizi için Monte Carlo simülasyonu ve alt küme simülasyonu yöntemleri kullanılmıştır. Farklı yapısal sistemler üzerinde yapılan analizlerde, doğrusal olmayan sönümleyicilerin etkileri, geleneksel tasarım yöntemleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, FVD tasarımında güvenilirlik odaklı analizlerin, yapısal

güvenlik seviyelerini artırarak sistemlerin sismik performansını iyileştirdiğini ve tasarım süreçlerinde daha verimli ve güvenli sonuçlar elde edilmesini ortaya çıkarmıştır.

Duflot ve Taylor (2018) çalışmasında, viskoz sönümleyicilerin (FVD) tasarım sürecindeki mühendislik gereklilikleri ve uygulama zorlukları ele alınmaktadır. Çalışma, viskoz sönümleyicilerin mekanik prensiplerini, malzeme seçimlerini ve yapısal entegrasyon kriterlerini detaylandırmaktadır. Özellikle, yaya köprülerinde kullanılan sönümleyicilerin frekans yanıtı, titreşim azaltma performansı ve sıcaklık değişimlerine karşı dayanıklılığı incelenmiştir. Sönümleyicilerin mühendislik tasarımında, dinamik rijitlik ve sistemin genel sismik tepkisiyle etkileşimi göz önünde bulundurularak, optimum performans için eksenel kuvvet, hız üssü katsayısı ve sıcaklık toleransları belirlenmiştir. Çalışma, lineer ve doğrusal olmayan viskoz sönümleyicilerin karşılaştırmalı analizini sunarak, yüksek dinamik yükler altında minimum bakım gerektiren sönümleyici tasarımlarının önemini vurgulamaktadır.

Szolomicki ve Golasz-Szolomicka (2019) çalışmasında, modern yüksek binaların yapısal ve mimari teknolojik gelişmeleri ele alınmıştır. Çalışmada, gelişmiş malzemeler, taşıyıcı sistemler, sismik sönümleme teknolojileri ve sürdürülebilir tasarım yaklaşımları detaylı olarak incelenmiştir. Yüksek binalarda kullanılan hafif ve yüksek dayanımlı malzemelerin yapı güvenliğini artırırken, maliyet ve inşaat sürecini optimize ettiği belirtilmiştir. Özellikle, deprem ve rüzgar yükleri gibi dinamik etkiler altında yapı stabilitesini sağlamak için sismik yalıtım ve sönümleme sistemlerinin kritik bir rol oynadığı vurgulanmıştır. Bununla birlikte, sürdürülebilir tasarım stratejilerinin enerji verimliliğini artırarak yapıların çevresel etkilerini azalttığı ifade edilmiştir. Çalışma, yüksek yapıların gelecekte daha güvenli, ekonomik ve çevre dostu hale gelmesi için mühendislik ve teknolojik inovasyonların önemini belirtmektedir.

Zhang, An ve Zhu (2019) çalışmasında, çelik-sönümleme-beton (SDC) kompozit duvarların eksenel basınç dayanımı incelenmiştir. Bu sistemde, beton çekirdek ile çelik plakalar arasına yerleştirilen sönümleme katmanı kullanılarak yapısal performansın iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Çalışmada, Eurocode 4 ve AISC-360 yönetmeliklerine dayalı teorik bir model geliştirilmiş ve ABAQUS sonlu elemanlar yöntemi ile farklı parametrelerin (çelik levha kalınlığı, bağ çubuklarının mesafesi ve sönümleme katmanı

kalınlığı) basınç dayanımı üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Sonuçlar, sönümleme katmanının enerji yutma kapasitesini artırarak yapısal performansı iyileştirdiğini, çelik levha ve bağ çubukları ile yapılan güçlendirmelerin ise beton çekirdeğin basınç dayanımını artırdığını göstermektedir.

Del Gobbo (2019) çalışmasında, sıvı viskoz sönümleyicilerin (FVD) bina performansına etkisi ve en uygun yerleşim yöntemleri incelenmiştir. Dört, sekiz ve on altı katlı çelik çerçeve sistemleri kullanılarak OpenSees yazılımı ile zaman tanım alanı analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, "uniform damping" ve "storey shear strain energy method (SEM)" yöntemlerinin onarım maliyetlerini en aza indirdiğini göstermektedir. Ayrıca, belirli katlara yoğunlaştırılan FVD'lerin sismik performans üzerinde olumsuz etkiler yaratabileceği belirlenmiştir. Çalışma, FVD optimizasyonunun düşük ve orta katlı binalarda maliyetleri azaltmada sınırlı bir etkiye sahip olduğunu belirtmektedir.

Amanullah ve Arora (2019) çalışmasında, yüksek katlı binalarda sıvı viskoz sönümleyiciler (FVD) ve çelik çaprazlı sistemlerin sismik etkinliği karşılaştırılmıştır. Çalışmada, 20 katlı bir betonarme yapı modeli ETABS 2016 yazılımında modellenmiş ve altı farklı konfigürasyon ile analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, FVD kullanımı, taban kesme kuvvetlerini %58,9'a kadar azaltarak çelik çaprazlı sistemlere göre daha etkin bir enerji sönümleme sağladığını göstermektedir. FVD'lerin, zaman periyodunu kısalttığı ve yatay ötelenmeleri minimize ettiği belirlenmiştir. Ayrıca, FVD'lerin kapasitesinin artırılması durumunda yapının genel rijitliğinin etkilendiği ve optimum sönümleyici kapasitesinin 250 kN olduğu tespit edilmiştir. Çalışma, yüksek binaların sismik dayanımını artırmak için FVD kullanımının etkili bir çözüm olanağı sağladığını göstermiştir.

Hiçyılmaz vd. (2019) çalışmasında, burulma düzensizliği bulunan çelik yapılarda viskoz sönümleyicilerin etkileri incelenmiştir. Çalışmada, planda asimetric U ve L formlarında iki adet yedi katlı çelik yapı modeli tasarlanarak, üç farklı deprem ivmesi altında zaman tanım alanı analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları, viskoz sönümleyicilerin eklenmesinin yapısal rijitliği artırmadan burulma davranışını önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Sönümleyicilerin kullanılmadığı durumda burulma düzensizliği katsayılarının yönetmelikte belirlenen üst sınırları aştığı, ancak %8 ve %20

sönüm oranlarıyla bu sınırların altına düşürülebildiği belirlenmiştir. Ayrıca, taban kesme kuvvetlerinde %28,8 ila %53,2 arasında değişen oranlarda azalma sağlandığı, burulma momentinde ise sönüm oranına bağlı olarak %50 ila %80 oranında düşüş meydana geldiği gözlemlenmiştir. Kat ötelenme oranları, eksenel kuvvetler ve eğilme momentleri üzerindeki etkileri değerlendirildiğinde, sönüm oranı arttıkça iç kuvvetlerin belirgin şekilde azaldığı tespit edilmiştir. Çalışma, planda düzensizlik içeren çelik yapıların sismik performansını artırmak için viskoz sönümleyicilerin etkili bir pasif kontrol yöntemi olduğunu belirtmektedir.

Yazar (2020) çalışmasında, çelik gömülü kompozit kolonların dayanım ve süneklik özellikleri incelenmiştir. Amerikan Beton Enstitüsü (ACI 318), AISC-LRFD ve EN-1994 yönetmelikleri doğrultusunda tasarlanan kolonların taşıma kapasitesi ve süneklik performansı değerlendirilmiştir. Çalışmada, örnek yapı olarak FEMA 355-C kapsamında 9 katlı bir bina modellenmiş ve ANSYS sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak doğrulama analizleri gerçekleştirilmiştir. Çelik ve beton bileşenlerin dayanım özellikleri karşılaştırılmış, göçme mekanizmaları analiz edilmiş ve farklı yönetmeliklere göre nominal dayanım farkları incelenmiştir. Sonuçlar, kompozit kolonların çelik kolonlara kıyasla daha yüksek taşıma kapasitesine sahip olduğunu ve sismik performans açısından önemli avantajlar sağladığını göstermiştir.

Hatipoğlu ve Düzgün (2020) çalışmasında, sıvı viskoz sönümleyiciler (FVD) ile birbirine bağlanan komşu yüksek binaların deprem etkisi altındaki dinamik davranışları incelenmiştir. Çalışmada, 12 katlı bir bina ile 12, 15, 18, 21 ve 24 katlı diğer binaların farklı zemin koşulları üzerinde modellenerek, viskoz sönümleyicilerin yapısal tepki üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. ANSYS R19.2 yazılımı kullanılarak yapılan analizler, FVD'lerin kat ötelenmelerini azalttığını, yapının dinamik davranışını iyileştirdiğini ve özellikle gevşek ve orta sıkı zeminlerde önemli faydalar sağladığını göstermektedir. Ayrıca, maliyet etkinliği açısından tüm katlara sönümleyici yerleştirilmesinin gereksiz olduğu ve en uygun bağlantı şeklinin sadece kısa binanın üst katına FVD eklenmesi olduğu sonucu elde edilmiştir.

Shariati vd. (2020) çalışmasında, yüksek binalarda sıvı viskoz sönümleyicilerin (FVD) optimum yerleşimi incelenmiştir. Çalışmada, on iki katlı çelik bir yapı modeli

kullanılarak farklı çapraz sistemler (chevron, diagonal, toggle ve X-brace) ile entegre edilen FVD'lerin sismik performansa etkileri değerlendirilmiştir. SAP2000 yazılımı ile doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizleri gerçekleştirilmiş ve Manjil deprem kaydı kullanılarak yapıların dinamik tepkileri analiz edilmiştir. Sonuçlar, FVD'lerin yapıların kat ötelenmelerini ve taban kesme kuvvetlerini önemli ölçüde azalttığını, özellikle chevron çapraz sistemi ile entegre edilen FVD'lerin %72'ye kadar enerji sönümleyerek en iyi performansı sağladığını göstermektedir. X-brace sistemiyle kıyaslandığında, diğer çapraz sistemlerin daha dengeli bir enerji dağılımı sağladığı ve sismik titreşimleri daha etkin bir şekilde azalttığı belirlenmiştir. Çalışma, yüksek yapılar için optimum sismik kontrol stratejilerinin belirlenmesinde FVD'lerin doğru konumlandırılmasının kritik önem taşıdığını belirtmektedir.

Tubaldi vd. (2020) çalışmasında, bitişik yapıların sıvı viskoz sönümleyiciler (FVD) ile bağlanarak deprem yüklerine karşı dayanımının artırılması incelenmiştir. Çalışmada, FVD tasarımı için doğrusal ve doğrusal olmayan sönümleyiciler için bir optimizasyon yöntemi önerilmiştir. Bitişik iki çok serbestlik dereceli (MDOF) yapıyı modelleyerek, farklı sönümleyici yerleşim düzenlerinin etkileri değerlendirilmiştir. Analizler, sönümleyicilerin göreceli kat ötelemesini ve yapısal ivmeleri önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Ayrıca, doğrusal olmayan sönümleyicilerin, geleneksel doğrusal sönümleyicilere kıyasla daha düşük kuvvet gereksinimiyle benzer performans sağladığı belirlenmiştir. Çalışma, bitişik binalar arasındaki sismik çekişme etkisini azaltmada FVD kullanımının etkinliğini belirterek, sismik mühendislik uygulamalarında yeni tasarım yaklaşımlarına katkı sağlamaktadır.

Al Agha ve Umamaheswari (2020) çalışmasında, sıvı viskoz sönümleyicilerin (FVD) betonarme binaların sismik performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmada, 15 katlı moment çerçeveli betonarme bina modelleri FVD'li ve FVD'siz olarak karşılaştırılmış ve ETABS yazılımı kullanılarak eşdeğer statik, yanıt spektrumu ve zaman tanım alanı analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları, FVD kullanımının yapının yanal deplasmanlarını ve maksimum nokta yer değiştirmelerini önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. FVD eklenen binalarda kat kesme kuvvetleri azalmış, yapı rijitliği artmış ve sistemin genel sismik dayanımı iyileştirilmiştir. Çalışma, FVD'lerin

betonarme binalarda enerji sönümleme kapasitesini artırarak yapıların deprem güvenliğini önemli ölçüde yükselten etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir.

Taylor Devices (2020) çalışmasında, sıvı viskoz sönümleyicilerin (FVD) mühendislik yapılarında kullanımı ele alınmaktadır. Çalışma, FVD'lerin yapıların titreşim ve şok yüklerine karşı dayanıklılığını artırdığı ve farklı mühendislik alanlarında uygulama bulduğu belirtilmektedir. Taylor Devices tarafından geliştirilen sönümleyici sistemlerin askeri ve sivil mühendislik projelerine entegrasyonu incelenmiştir. FVD sistemlerinin, geleneksel doğrusal olmayan analizlere ihtiyaç duymadan uygulanabildiği ve yapısal rijitliği artırmadan deformasyonları azalttığı vurgulanmaktadır. Deneysel veriler, bu sönümleyicilerin yapısal stres ve deformasyonları %50-75 oranında azalttığını göstermektedir. Yay ve sönümleyici kombinasyonunun, şok ve titreşim yüklerini %95'e kadar azaltabildiği ifade edilmektedir. Taylor Devices tarafından geliştirilen sistemlerin askeri, endüstriyel ve inşaat sektörlerinde yaygın olarak kullanıldığı ve yüksek risk taşıyan yapılar için kritik öneme sahip olduğu belirtilmektedir. Çalışma, bu sistemlerin mühendislik yönetmeliklerinde değişikliklere yol açabileceğini öngörmektedir.

Taylor Devices (2020) çalışmasında, sıvı viskoz sönümleyicilerin (FVD) binalar, köprüler ve tarihi yapılar için deprem dayanımını artırmadaki rolü ele alınmaktadır. Çalışma, Taylor Devices tarafından geliştirilen FVD'lerin askeri teknolojilerden sivil mühendislik projelerine nasıl entegre edildiğini açıklamaktadır. FVD'lerin, yapısal deformasyonları rijitliği artırmadan azalttığı ve geleneksel taban yalıtım yöntemlerine göre maliyet açısından daha avantajlı olduğu vurgulanmaktadır. Deneysel veriler ve mühendislik modellemeleri, FVD'lerin kat ötelenmelerini %50 oranında azaltabildiğini ve yapısal stresleri minimize ederek depreme dayanıklılığı artırdığını belirtmekte olup ayrıca FVD kullanımının yapı mühendisliğinde yaygınlaşmasının, gelecekteki deprem yönetmeliklerinde önemli değişikliklere yol açacağı öngörüsünde bulunmaktadır.

Vatansever ve Şimşek (2021) çalışmasında, beton dolgulu kompozit kolonlar ve çelik kirişlerden oluşan süneklik düzeyi yüksek moment aktaran çerçeveli bir binanın tasarımı ve deprem performansı analiz edilmiştir. Yapının tasarımı ÇYTHYE-2016 ve TBDY-2018 yönetmeliklerine uygun olarak gerçekleştirilmiş, doğrusal olmayan dinamik analizler ETABS ve OpenSEES yazılımları ile zaman tanım alanında yapılmıştır.

Çalışmada 11 farklı deprem kaydı kullanılarak yapıdaki plastik mafsall oluşumları, taşıyıcı sistem elemanlarının hasar durumları ve genel deprem performansı değerlendirilmiştir. Sonuçlar, plastik mafsalların büyük ölçüde giriş uçlarında oluştuğunu ve kolonların elastik sınırlar içinde kaldığını göstermektedir. Ayrıca, kompozit kolonların kullanımıyla yapının süneklik ve dayanımının arttığı belirlenmiştir. Çalışma, kompozit taşıyıcı sistemlerin deprem performansını iyileştirdiğini ve geleneksel sistemlere kıyasla daha güvenli bir alternatif sağladığını göstermektedir.

Wu vd. (2021) çalışmasında, üç katlı bir okul binasında viskoz sönümleyicilerin (VD) uygulanarak sismik performanslarının değerlendirilmesi incelenmiştir. MIDAS/Gen yazılımı kullanılarak yapılan doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizleri, VD'lerin küçük ölçekli depremlerde enerji sönümlemeye başladığını, büyük ölçekli depremlerde ise daha fazla enerji dağıtarak yapının sismik tepkisini önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Yapılan analizlerde, VD kullanılan binanın kat ötelenmelerinin azaldığı, yapısal deformasyonların kontrol altına alındığı ve çökme riskinin minimize edildiği belirlenmiştir. Çalışma, düşük bakım gereksinimi ve uzun ömürlü kullanım avantajları nedeniyle VD'lerin, eğitim yapıları gibi kritik binalarda uygulanabilirliğini vurgulamaktadır.

De Domenico ve Hajirasouliha (2021) çalışmasında, çelik moment çerçevesel yapıların sismik performansını artırmak için doğrusal olmayan viskoz sönümleyicilerin (NVD) kullanımı incelenmektedir. Maxwell modeli kullanılarak yapılan analizlerde, NVD'lerin optimum dağılımı katlar boyunca üniform hasar dağılımı (UDD) yöntemiyle belirlenmiştir. Üç, yedi ve on iki katlı çelik çerçeveler üzerinde yapılan doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizleri, NVD'lerin kat ötelenmelerini, plastik rotasyonları ve genel hasar seviyelerini azalttığını göstermektedir. Çalışma, performansa dayalı tasarımın optimize edilerek mevcut yönetmeliklerle uyumlu bir şekilde uygulanabileceğini göstermektedir.

Pham ve Vu (2021) çalışmasında, sekiz katlı çelik çerçevesel bir binada sıvı viskoz sönümleyicilerin (FVD) sismik yükler altındaki etkinliği incelenmiştir. Çalışmada, FVD'lerin rijitliği değiştirmeden sismik enerji sönümleme kapasitesini artırdığı ve yapıların dinamik tepkilerini önemli ölçüde iyileştirdiği belirlenmiştir. Etabs yazılımı ile

gerçekleştirilen zaman tanım alanı analizlerinde, FVD kullanılan modellerde çatı ötelenmelerinin %76,5, kat ötelenmelerinin %65 ve taban kesme kuvvetlerinin %23,3 oranında azaldığı gözlemlenmiştir. FVD'lerin yapı elemanlarının deformasyonunu minimize ettiği ve deprem yüklerine karşı yapısal stabiliteyi artırdığı belirlenmiştir. Çalışma, sıvı viskoz sönümleyicilerin çelik çerçeveli yapılarda etkin bir pasif kontrol mekanizması sağladığını ve sismik dayanımı artırmada uygulanabilir bir çözüm olduğunu göstermektedir.

Hattab (2022) çalışmasında, farklı kompozit kolon sistemlerinin deprem performansları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Bu kapsamda, yedi farklı bina modeli oluşturularak üç ana kategori altında sınıflandırılmış ve yapılar doğrusal ve doğrusal olmayan analiz yöntemleriyle değerlendirilmiştir. Yapısal analizler ETABS yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiş olup, doğrusal hesaplamalar için spektrum analizi, doğrusal olmayan hesaplamalar için ise itme analizi uygulanmıştır. Elde edilen bulgular, kompozit yapı sistemlerinin geleneksel betonarme ve çelik yapılara kıyasla daha yüksek deprem dayanımı sağladığını göstermektedir. Özellikle çelik gömme kompozit kolonlar ile beton dolgulu kompozit kolonların, taşıma kapasitelerini artırarak yapıların genel dayanıklılığını iyileştirdiği belirlenmiştir. Çalışmada, modal analiz ve itme analizleri kullanılarak yapıların performans seviyeleri detaylandırılmış ve mühendislik tasarımı açısından çeşitli öneriler belirtilmiştir.

Ghanbari vd. (2022) çalışmasında, doğrusal ve doğrusal olmayan viskoz sönümleyicilerin (LVD ve NVD) çok katlı yapıların sismik tepkisi üzerindeki etkileri incelenmektedir. ABAQUS sonlu eleman yazılımı kullanılarak 3, 5 ve 8 katlı binalar modellenmiş ve farklı deprem kayıtları altında analiz edilmiştir. Sonuçlar, NVD'lerin yapısal tepkiyi LVD'lere kıyasla daha fazla azalttığını ve yüksek deformasyon durumlarında daha iyi enerji sönümleme sağladığını göstermektedir. Özellikle NVD'lerin kullanımıyla kat ötelenmelerinin %72-89, temel kesme kuvvetinin ise %60-82 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Çalışma, NVD'lerin geleneksel sönümleme sistemlerine kıyasla deprem mühendisliğinde daha etkin bir çözüm sağladığını göstermektedir.

Deepthi Sharon (2022) çalışmasında, ayarlı kütle sönümleyici (TMD) ile sıvı viskoz sönümleyicinin (FVD) birlikte kullanıldığı asimetrik bir yapı çerçevesinin sismik

performansı incelenmiştir. Çalışmada, 3D sonlu eleman modeli oluşturularak farklı sönümleyici kombinasyonlarının yapısal tepkilere etkisi analiz edilmiştir. Zaman tanım alanı analizleri ve tepki spektrumu yöntemiyle yapılan incelemelerde, yalnızca FVD kullanılan modellerde taban kesme kuvvetinin %22, yalnızca TMD kullanılan modellerde %6 arttığı, ancak iki sistem birlikte kullanıldığında rijitliğin artarak taban kesme kuvvetinin %35'e kadar yükseldiği belirlenmiştir. Sonuçlar, TMD ve FVD'nin birlikte kullanımının yapının dönme yer değiştirmelerini azalttığını, sismik performansı iyileştirdiğini ve optimum konumlandırmanın yapının merkezine yakın bölgelerde daha etkili olduğunu göstermektedir.

Öztürk (2022) çalışmasında, mevcut bir okul yapısına viskoz sönümleyiciler entegre edilerek yapının sismik davranışı incelenmiştir. Üç bloktan oluşan okul yapısı, farklı sayıda ve süreklilikte akışkan viskoz sönümleyiciler (FVD) ile güçlendirilmiş ve SAP2000 programı kullanılarak doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, farklı yerleştirme senaryoları karşılaştırılmış ve en etkili sönümleyici düzeni belirlenmiştir. Sonuçlar, FVD kullanımının yapısal talepleri büyük ölçüde azalttığını, çatı yer değiştirme taleplerini düşürdüğünü ve yapısal güvenliği artırdığını göstermektedir. Derzlerle ayrılmış blokların çekiçleme etkileri dikkate alınarak yapılan analizlerde, burulma katsayıları, görelî kat ötelemeleri ve tepe yer değiştirmeleri değerlendirilmiştir. FVD kullanımının burulma etkisini sınırlı düzeyde azalttığı, ancak üst kat ivme taleplerinde artışa neden olabileceği belirlenmiştir. Çalışma, mevcut yapıların güçlendirilmesinde viskoz sönümleyicilerin etkili bir yöntem olduğunu belirtmektedir.

Li ve Wang (2022) çalışmasında, düşük katlı çelik bina çerçeveleri için kendini merkezleyen hibrit sönümleme bağlantıları kullanılarak sismik dayanımı artıran bir tasarım yöntemi geliştirilmiştir. Geleneksel kendinden merkezlenen sistemlerde görülen genişleme etkisini ortadan kaldıran ve yapı alanı kaybı olmadan enerji sönümleme kapasitesini artıran yeni bir yanal dayanım mekanizması önerilmiştir. Üç katlı bir bina modeli üzerinde gerçekleştirilen doğrusal olmayan analizler, sistemin geçici ve kalıcı kat ötelenmelerini azalttığını ve önerilen tasarımın yalnızca bir revizyonla kabul edilebilir hale getirilebileceğini göstermektedir. Viskoz sönümleyicilerin histeretik sönümleme yerine kullanılmasıyla maksimum kat ivmeleri %12,75 oranında azalırken, sistemin farklı parametrelerde yüksek sismik performans sağladığı belirlenmiştir. Çalışma, önerilen

sistemin deprem sonrası yapısal onarım ihtiyacını minimuma indirdiğini ve sismik mühendislikte etkin bir çözüm sağladığını göstermektedir.

Welch vd. (2022) çalışmasında, sıvı viskoz sönümleyiciler (FVD) ile desteklenen çelik moment çerçeve sistemleri için geliştirilen pratik bir tasarım yöntemi ele alınmaktadır. Önerilen yöntem, geleneksel doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizlerine gerek duymadan, yönetmelik uyumlu bir yaklaşımla moment çerçevelerin ve sönümleyici sistemlerinin bağımsız olarak tasarlanmasını sağlamaktadır. FEMA P-695 yöntemi ile doğrulanan bu yaklaşım, ASCE/SEI-7 ve AISC 341 yönetmeliklerine uygun şekilde oluşturulmuş ve çelik tonajında %30-40 oranında azalma sağlayarak maliyet etkin bir çözüm sağladığı gösterilmiştir. Çalışmada, önerilen tasarım prosedürünün mühendislerin FVD kullanımını daha erişilebilir hale getirmesi ve yüksek sismik performans sağlayarak yapı dayanıklılığını artırması açısından önemli bir katkı sağladığı belirtilmektedir.

Asgarkhani vd. (2023) çalışmasında, depremler sırasında bitişik konumda bulunan betonarme (RC) ve çelik moment çerçeve sistemlerinin (SMRF) çarpışmaya (pounding) karşı optimum şekilde güçlendirilmesi amacıyla viskoz sönümleyicilerin (VD) kullanımı ele alınmaktadır. Çalışma, farklı kat yüksekliklerine sahip 3, 5 ve 9 katlı yapılar için doğrusal ve doğrusal olmayan viskoz sönümleyicilerin (LVD ve NVD) yerleşim düzenlerini analiz ederek en uygun sönümleyici konumlarını belirlemektedir. Artımlı dinamik analizler (IDA) ve OpenSees yazılımı kullanılarak yapılan modelleme çalışmaları, VD kullanımının bina limit durum kapasitelerini önemli ölçüde artırdığını ve çarpışma nedeniyle oluşan hasarları minimize ettiğini göstermektedir. Çalışma ayrıca, FEMA-P695 tarafından önerilen farklı deprem kayıtları altında analizler yaparak, mühendislerin çarpışmaya eğilimli bitişik yapıların güçlendirme seviyelerini yaklaşık olarak tahmin etmelerine yardımcı olacak modifikasyon faktörleri önermektedir.

Javaid ve Verma (2023) çalışmasında, düzensiz çelik-beton kompozit binaların sismik davranışı, sıvı viskoz sönümleyiciler (FVD) ve burkulmaya karşı dayanıklı çaprazlar (BRB) kullanılarak incelenmiştir. Çalışmada, 15 katlı kompozit moment çerçeve sistemleri ETABS yazılımı ile modellenmiş ve IS 1893:2016 yönetmeliği doğrultusunda yanıt spektrumu analizleri gerçekleştirilmiştir. BRB ve FVD sistemlerinin

yapıların titreşim periyotlarını, maksimum kat ötelenmelerini ve taban kesme kuvvetlerini azaltmadaki etkinliği değerlendirilmiştir. Sonuçlar, FVD'lerin BRB'lere kıyasla %5-8 daha yüksek enerji sönümleme kapasitesine sahip olduğunu ve özellikle L ve C şeklindeki düzensiz binalarda köşe açıklıklarına yerleştirildiğinde maksimum yer değiştirme oranını %63-65 oranında düşürdüğünü göstermektedir. Ayrıca, FVD'lerin merkez açıklıklarda kullanıldığında zaman periyodunu %60'a, maksimum kat ötelenmelerini %57'ye ve taban kesme kuvvetlerini %37'ye kadar azalttığı belirlenmiştir. Çalışma, FVD'lerin düzensiz yapıların deprem performansını artırmada etkili bir pasif sismik kontrol yöntemi olduğunu belirtmektedir.

Taylor Devices (2023) çalışmasında, 50 tonluk kuvvet kapasitesine sahip viskoz sönümleyici cihazların performans testleri ele alınmaktadır. Cihazların yüksek kuvvet seviyelerinde enerji sönümleme kabiliyetleri, doğrusal ve doğrusal olmayan sönümleme katsayıları laboratuvar testleriyle doğrulanmıştır. Sonuçlar, test edilen cihazların büyük ölçekli sismik ve rüzgâr mühendisliği uygulamaları için yüksek verimlilikle çalıştığını ve belirtilen performans kriterlerini karşıladığını göstermektedir. Çalışma, yüksek kapasiteli sönümleyicilerin mühendislik tasarımında kritik bir rol oynadığını vurgulamaktadır.

Canney vd. (2023) çalışmasında, sıvı viskoz sönümleyicilerin (FVD) kullanıldığı moment çerçevelerin tasarımını kolaylaştırmak amacıyla geliştirilen yeni bir yönetmelik esaslı (prescriptive) tasarım yöntemi incelenmektedir. Geleneksel doğrusal olmayan analiz gereksinimlerini ortadan kaldıran bu yöntem, çelik yapılarda FVD uygulamalarının yaygınlaşmasını sağlamaktadır. FVD'lerin, yapı periyodunu değiştirmeden katlar arası ötelenme ve ivmeleri azaltarak hem taşıyıcı sistem hem de taşıyıcı olmayan elemanlarda oluşabilecek hasarı önemli ölçüde sınırladığı ifade edilmektedir. Ayrıca geliştirilen bu sistemin, geleneksel yöntemlere göre daha ekonomik ve hızlı uygulanabilir olduğu, yapısal performansı ve sismik dayanıklılığı önemli ölçüde artırarak gelecekteki projeler için etkin bir tasarım alternatifi oluşturabileceği belirtilmektedir.

Yaman ve İlerisoy (2024) çalışmasında, İstanbul'daki yüksek binaların depreme dayanıklılığını belirleyen tasarım kriterleri incelenmiştir. Çalışma, yüksek binaların deprem yükleri altındaki performansını etkileyen temel, strüktürel, mimari ve sismik yalıtım parametrelerini kapsamlı bir şekilde ele almaktadır. Alan çalışması kapsamında,

İstanbul’da aktif fay hatları üzerinde yer alan on beş yüksek bina analiz edilmiştir. Bu analizlerde, nitel veriler yüzdelik derecelendirmelere aktararak nicel verilere dönüştürülmüştür. Sonuçlar, yüksek binalarda deprem dayanımını artırmak için ileri mühendislik teknikleri, yüksek dayanımlı beton kullanımı ve performansa dayalı sismik tasarım yöntemlerinin önemini vurgulamaktadır. Çalışma, mimarlık ve mühendislik disiplinlerinin entegre çalışarak yüksek binaların deprem güvenliğini artırmaya yönelik stratejiler geliştirmesi gerektiğini belirtmektedir.

Hussain vd. (2024) çalışmasında, sıvı viskoz sönümleyicilerin (FVD) simetrik ve asimetrik çok katlı betonarme yapıların sismik tepkisi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada, dokuz katlı bir yapı modeli kullanılarak FVD’li ve FVD’siz durumlar ETABS 2017 yazılımı ile analiz edilmiştir. Doğrusal ve doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizleri gerçekleştirilmiş ve sönümleyici kullanımının yapıların kat ötelenmeleri, taban kesme kuvvetleri, kat kesme kuvvetleri ve modal periyotları üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Analiz sonuçları, FVD eklenen modellerde yatay deplasmanların önemli ölçüde azaldığını, temel kesme kuvvetlerinin daha dengeli dağıldığını ve yapı rijitliğinin artırıldığını göstermektedir. Çalışma, FVD’lerin deprem yüklerine karşı yapısal stabiliteyi artırmada etkili bir pasif kontrol mekanizması olduğunu belirtmektedir.

Özer (2024) çalışmasında, bitişik nizamlı betonarme binalarda akışkan viskoz sönümleyici (FVD) kullanılarak deprem sırasında gerekli boşluk mesafesinin nasıl değiştiğini incelemiştir. Çalışmada, 3 ve 7 katlı betonarme bina modelleri geleneksel ankastre mesnetli ve FVD destekli olarak modellenmiş ve doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda, FVD kullanımının gerekli derz mesafesini ortalama %43,6 oranında azalttığı belirlenmiştir. Ayrıca, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018) kapsamında önerilen boşluk mesafesinin ankastre mesnetli modeller için %32,7 yetersiz kaldığı, FVD kullanılan modellerde ise %42,2 oranında güvenli tarafta olduğu görülmüştür. Çalışma, FVD kullanımının bitişik nizamlı binalarda çekiçleme etkisini azaltmak ve yapısal hasarı en aza indirmek için etkili bir alternatif yöntem olduğunu göstermektedir.

Canney vd. (2024) çalışmasında, Güney San Francisco'daki mevcut 17 katlı çelik ofis binasının (651 Gateway Boulevard) sismik performansının iyileştirilmesi için yapılan

gönüllü güçlendirme çalışması incelenmiştir. Mevcut binada, Northridge öncesi kaynaklı birleşim bölgelerindeki kusurlar nedeniyle ciddi hasar riskleri bulunduğu belirtilmiş, geleneksel güçlendirme yöntemlerinin yüksek maliyetinden dolayı alternatif olarak sıvı viskoz sönümleyiciler (FVD) tercih edilmiştir. Gerçekleştirilen doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizleri sonucunda, sönümleyicilerin eklenmesiyle binanın kat ötelenmelerinin ve bağlantı bölgelerindeki plastik dönmelerin önemli ölçüde azaldığı, mevcut yapı elemanlarının büyük kısmının güçlendirilmesine gerek kalmadığı gösterilmiştir. Sonuç olarak, bu yenilikçi çözümün mevcut binaların sismik performansını artırmada etkili ve ekonomik bir alternatif oluşturduğu vurgulanmıştır.

Erickson (2024) çalışmasında, Amerika Birleşik Devletleri'nin Bellevue şehrinde inşa edilen 25 katlı çelik ofis yapısı The Artise projesinde uygulanan yenilikçi taşıyıcı sistem çözümlerini incelemektedir. Geleneksel taşıyıcı sistemlerin sınırlamalarını aşmak amacıyla projede, burkulması engellenmiş çaprazlar (BRB) ile sıvı viskoz sönümleyicilerin (FVD) birlikte kullanıldığı, belirli katları atlayan özel bir süper çapraz sistem tasarlanmıştır. Bu tasarım sayesinde hem temel seviyesi hem de üst yapı kütlelerinde önemli malzeme ve maliyet tasarrufları sağlanmış, ayrıca bodrum katlarda daha geniş kullanım alanları elde edilmiştir. Çalışmada, bu yenilikçi mühendislik çözümlerinin yapısal verimliliği artırarak gelecekteki projeler için örnek teşkil edebileceği vurgulanmaktadır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

Tez çalışması kapsamında, yürürlükteki güncel deprem ve yapı yönetmeliklerine uygun olarak ETABS V21 yazılımı ile yüksek bir yapının üç boyutlu modeli oluşturulmuştur. Bahse konu yapı, dairesel plan geometrisine sahip olup toplamda 20 katlıdır ve düşey doğrultuda üç ana fonksiyonel bölgeye ayrılmaktadır. Taşıyıcı sistem, betonarme ve çelik-beton kompozit yapı elemanlarının birlikte kullanıldığı hibrit bir sistem anlayışıyla tasarlanmıştır. Yapının sismik davranışları, hem doğrusal (lineer) hem de doğrusal olmayan (nonlinear) analiz yöntemleri ile değerlendirilmiştir.

Yapının üst katlara doğru daralan kütle dağılımı, kütle merkezinin alt seviyelerde konumlanmasına olanak tanıyarak burulma etkilerinin azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Plan düzleminde eksantrik olarak yerleştirilen dairesel çekirdek perdeler, taşıyıcı sistemin genel stabilitesini temin etmekte olup, dairesel kat planlarıyla birlikte yapının yatay düzlemde kısmen izotropik rijitlik özellikleri kazanmasına yardımcı olmaktadır. Taşıyıcı sistem, her iki deprem doğrultusunda dengeli ancak farklı dinamik davranışlar sergileyecek biçimde tasarlanmıştır. Bu yaklaşım, yapıya etki eden sismik yüklerin daha gerçekçi ve verimli bir şekilde değerlendirilmesini mümkün kılmaktadır.

Yapının taşıyıcı sistemi, alt katlarda yüksek rijitliğe sahip betonarme elemanlar ile üst katlarda ise sünek davranış özellikleri öne çıkan çelik-beton kompozit elemanların birlikte kullanıldığı hibrit bir sistem olarak tasarlanmıştır. Bu yapılandırma, yapının sismik performans düzeyini artırmakla birlikte, malzeme verimliliği ve maliyet etkinliği açısından da optimize edilmiş bir mühendislik çözümü sağlamaktadır. Alt katlardaki betonarme taşıyıcı elemanlar yapıya gerekli rijitliği kazandırırken, üst katlardaki çelik-beton kompozit elemanlar deprem etkisiyle oluşan yer değiştirmeleri etkin bir şekilde kontrol altına almakta ve enerjiyi sönmölemektedir. Bu yaklaşım, özellikle yüksek yapılarda hedeflenen sismik dayanım ve deformasyon kapasitesinin sağlanmasında etkili bir tasarım stratejisi oluşturmaktadır.

Ayrıca yapının en üst bölümünde, 20. kat döşeme kotunun 7 metre üzerinde ve çekirdek perdelerin taşıma kapasitesinden faydalanacak şekilde konumlandırılmış bir helikopter iniş platformu yer almaktadır. Söz konusu platform, Uluslararası Sivil Havacılık Teşkilatı (ICAO) tarafından yayımlanan Heliport Manual - Doc 9261-AN/903 rehber dokümanına uygun olarak tasarlanmış olup, Helikopter Kategorisi-4 sınıfına hizmet verecek şekilde boyutlandırılmıştır. Taşıyıcı sistem olarak, çelik kirişler ile betonarme döşemenin birlikte kullanıldığı yükseltilmiş bir sistem çözümü benimsenmiş; platform, rijit çekirdek perdeler üzerine ankrajlanarak yapı ile bütünleşik bir biçimde konumlandırılmıştır.

3.1.1. Yapı Kat Yerleşiminin Fonksiyonel Organizasyonu ve Detayları

Yapı, düşeyde üç ana bölgeye ayrılmıştır:

- Zemin seviyesinin alt kısmında 2 katlı garaj,
- Zemin seviyesinin üst kısmında 3 katlı podyum (AVM),
- Üst bölümde ise 15 kat konut/ofis amaçlı normal katlar olmak üzere her kat bölgesi, düzlemsel çap uzunlukları (dış kolon merkezlerinden) ve kat yükseklikleri açısından farklılaştırılmış olan yapının yüksekliği 90 m olup geometri detayları **Çizelge 3.1.**'de belirtilmiştir.

Çizelge 3.1. Yapı Kat Yerleşiminin Fonksiyonel Organizasyonu ve Detaylar

Fonksiyonel Bölge	Kat Sayısı	Kat Yüksekliği (m)	Plan Çapı (m)	Kullanım Amacı
Garaj	2	4,00	66,00	Otopark
Podyum (AVM)	3	5,00	51,00	AVM
Normal Katlar	15	4,00	36,00	Konut / Ofis
Heliport	1	7,00	21,20	Helikopter Pisti

3.1.2. Taşıyıcı Sistem Özellikleri ve Malzeme Sınıfları

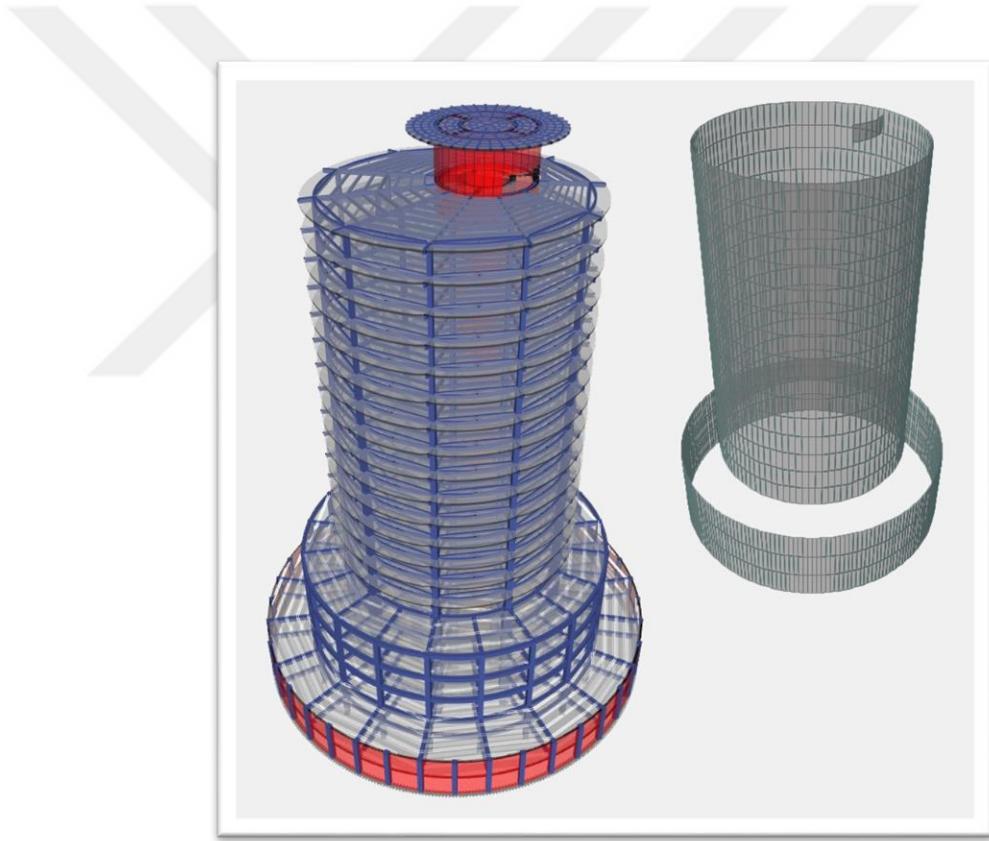
Yapının taşıyıcı sistemi, her kat bölgesinde kullanım amacına, açıklık gereksinimlerine ve kat yüksekliği gibi mimari-parametrik koşullara bağlı olarak farklı statik ve yapılm teknikleri dikkate alınarak modellenmiştir. Katlardaki yük aktarım mekanizmaları, malzeme davranışları ve rijitlik-süneklik dengesi göz önünde

3. MATERYAL ve YÖNTEM

bulundurularak, yapı genelinde performans odaklı bir taşıyıcı sistem stratejisi benimsenmiştir.

Çizelge 3.2. Taşıyıcı Sistem Özellikleri ve Malzeme Sınıfları

Fonksiyonel Bölge	Taşıyıcı Sistem Türü	Beton Malzeme Sınıfı	Çelik Malzeme Sınıfı	Donatı Malzeme Sınıfları
Garaj	Betonarme	C55/67	-	B420C
Podyum (AVM)	Betonarme	C55/67	-	B420C
Normal Katlar	Kompozit	C40/45-C30/37	S355	B420C
Heliport	Karma	C40/45	S355	B420C



Şekil 3.1. Yapı Perspektif Görünümü

Yapı taşıyıcı sistem elemanlarının, kat bölgesi ve eleman türlerine göre tasarım esnasında kullanılan kısaltmalar listesi aşağıda belirtilmiştir;

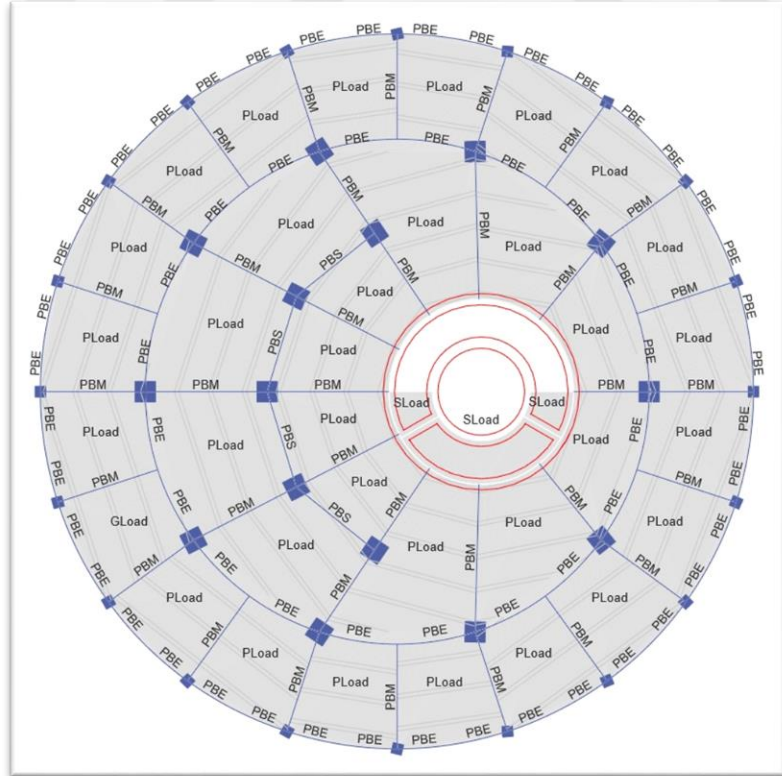
➤ Kat Kısaltmaları; Garaj Kat: G Podyum Kat: P Normal Kat: N Heliport: H

3. MATERYAL ve YÖNTEM

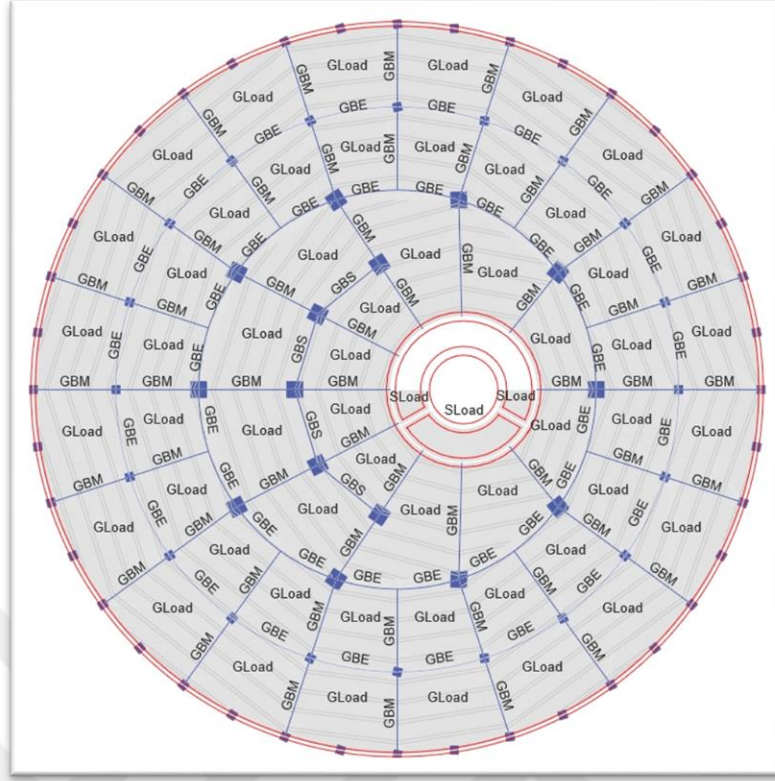
Kirişlerin, yapı fonksiyonel bölgesi ve kat konumlarına göre özellikleri ise Çizelge 3.4.'de belirtildiği gibidir.

Çizelge 3.4. Kiriş Kesit Ölçüleri ve Özellikleri

Fonksiyonel Bölge	Kat Konumları	Kiriş Türleri	Ebatlar Brüt(cm)	Çelik Levha Kalınlığı (mm)
Garaj	(1-2). Katlar	GBM	80x60	-
		GBS	60x40	-
		GBE	80x60	-
Podyum (AVM)	(3-5). Katlar	PBM	80x60	-
		PBS	60x40	-
		PBE	80x60	-
Normal Katlar	(6-20). Katlar	NBM	60x30	20
		NBS	50x30	20
		NBE	50x30	20
		NBW	U650	-
Heliport	(21). Kat	HBM	HEA300	-
		HBS	HEA200	-
		HBW	U400	-



Şekil 3.3. Podyum Kat Planı (4. Kat)



Şekil 3.4. Garaj Kat Planı (1. Kat)

Perde elemanlarının türleri ile kesit özellikleri, fonksiyonel kat bölgelerine ve düşeydeki konumlarına bağlı olarak farklılık göstermektedir. Söz konusu özelliklere ilişkin bilgiler **Çizelge 3.5.**'da verilmektedir.

Çizelge 3.5. Perde Kesit Ölçüleri ve Özellikleri

Fonksiyonel Bölge	Kat Konumları	Perde Türleri	Ebatlar Kalınlık (cm)	Plan Çap Ölçüsü (m)
Garaj	(1-2). Katlar	GWC	80	7,00 / 13,20
		GWR	40	66,00
Podyum	(3-5). Katlar	GWC	80	7,00 / 13,20
Normal Katlar	(6-20). Katlar	GWC	80	7,00 / 13,20
Heliport	(21). Kat	GWC	80	7,00 / 13,20

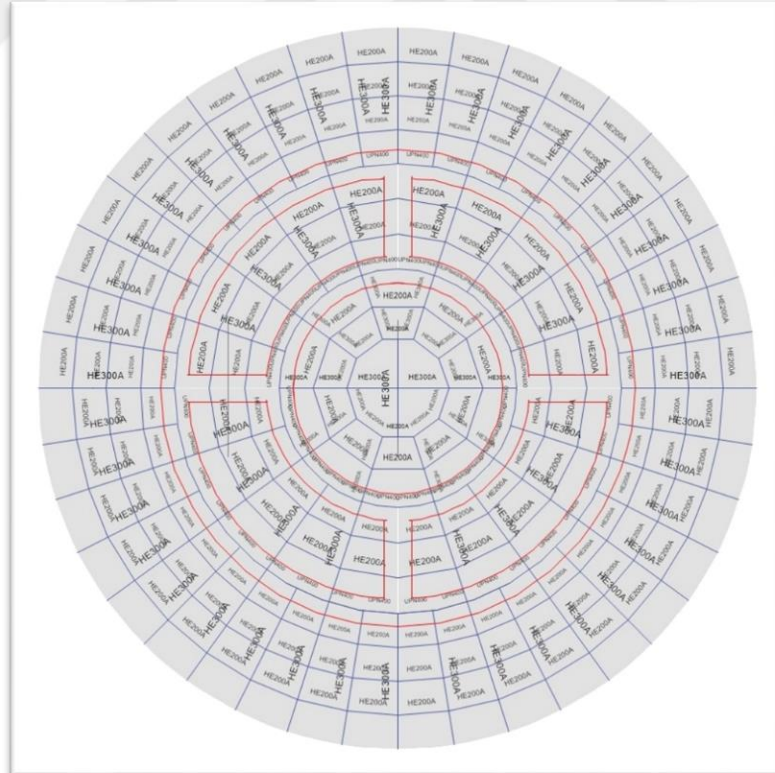
Yapı boyunca farklı kat bölgelerinde kullanılan döşeme sistemleri, işlevsel ve yapısal gereksinimlere bağlı olarak çeşitlilik göstermektedir. Garaj ve podyum katlarında, yük taşıma kapasitesinin artırılması ve açıklıkların verimli şekilde geçilebilmesi amacıyla tek yönlü dışı döşeme sistemi tercih edilmiştir. Normal katlarda ise, galvanizli trapez sac üzerine C30/37 sınıfı beton dökülerek oluşturulan NDeck tipi kompozit döşemeler

3. MATERYAL ve YÖNTEM

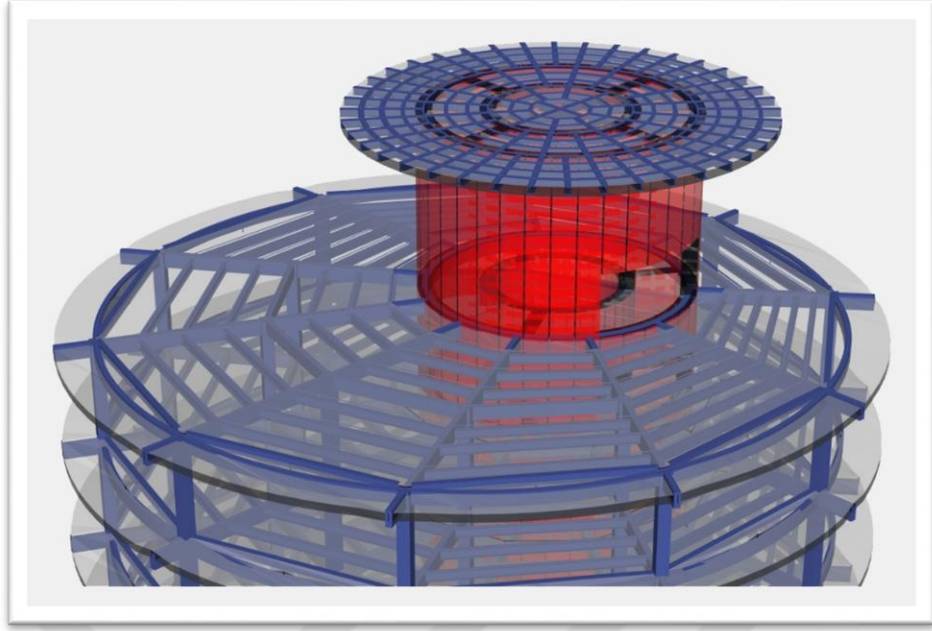
kullanılmıştır. Bu sistem hem yapısal hafiflik hem de montaj kolaylığı açısından avantaj sağlamaktadır. **Çizelge 3.6.**'te, yapıdaki farklı kat bölgelerine göre kullanılan döşeme türleri, kalınlık değerleri ve varsa çelik levha katkıları belirtilmiştir.

Çizelge 3.6. Döşeme Kesit Ölçüleri ve Özellikleri

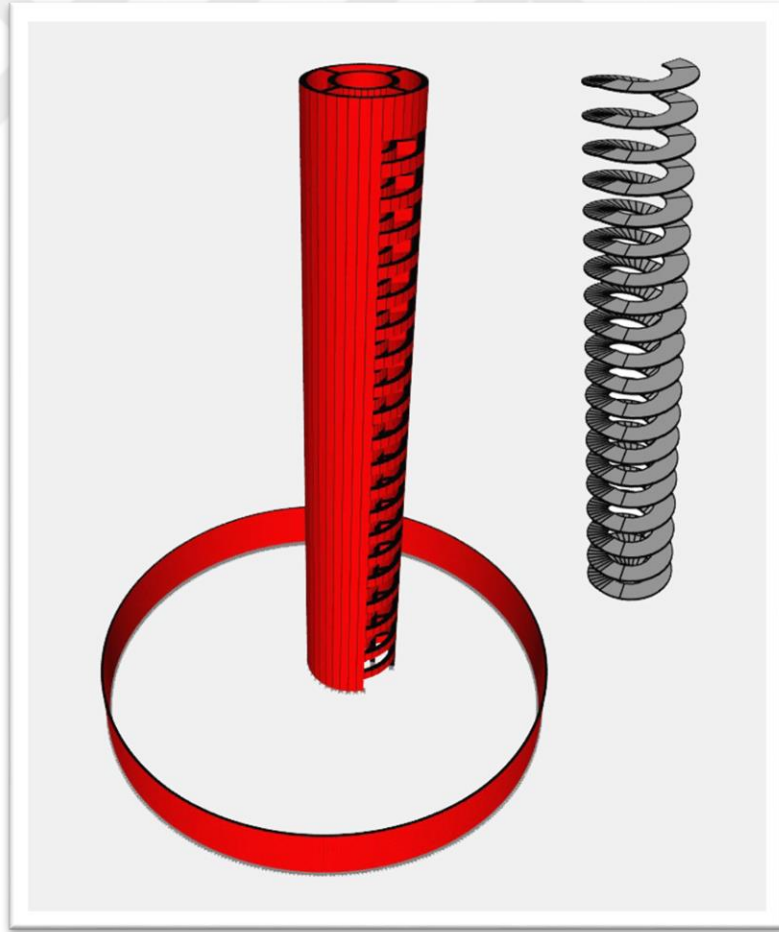
Fonksiyonel Bölge	Kat Konumları	Döşeme Türleri	Ebatlar Kalınlık (cm)	Çelik Levha Kalınlığı (mm)
Garaj	(1-2). Katlar	GS	50	-
		SS	20	-
Podyum	(3-5). Katlar	PS	50	-
		SS	20	-
Normal Katlar	(6-20). Katlar	NDeck	15	15
		NS	35	-
		SS	20	-
Heliport	(21). Kat	HSF	35	-
		HSE	30	-



Şekil 3.5. Heliport Plan Görünümü



Şekil 3.6. Heliport Perspektif Görünümleri



Şekil 3.7. Perde ve Merdiven Perspektif Görünümleri

3.1.3. Taşıyıcı Sistem Yük Bileşenleri ve Değerleri

Yapının taşıyıcı sistemine etki eden sabit ve hareketli yükler, TS 498'e; sismik yükler ise TBDY 2018'e uygun olarak belirlenmiştir. Yapıya etkiyen yatay dış yüklerden biri olan rüzgâr etkisi, TS EN 1991-1/4 standardı kapsamında değerlendirilmiştir. Rüzgâr yüklerinin belirlenmesinde yapı yüksekliği, cephe alanı, plan geometrisi ve yerel rüzgâr karakteristikleri dikkate alınmış; bu etkiler yapısal analiz modeline ayrı bir yük durumu olarak tanımlanmıştır.

Yapının tüm yük bileşenleri, fonksiyonel kat bölgeleri ile yapı elemanlarının türlerine göre farklılaştırılarak analiz modeline tanımlanmıştır. Döşeme yükleri, yapının kullanım amacına uygun olarak normal katlarda NLoad, podyum katlarında PLoad ve garaj katlarında GLoad başlıkları altında gruplanmıştır. Bu yük gruplarında, yapısal olmayan sabit yükler (döşeme kaplamaları, asma tavanlar, mekanik tesisat sistemleri vb.) ile birlikte ilgili bölgenin kullanım senaryolarına göre belirlenen hareketli yükler yer almaktadır. Döşemeler üzerindeki toplam yükler, düşey taşıyıcı sistemlere aktarılarak analiz modelinde yükleme senaryolarına entegre edilmiştir.

Kiriş elemanlarına tanımlanan doğrusal yayılı yükler de kat fonksiyonuna göre çeşitlilik göstermektedir. Normal katlarda, iç kirişler üzerine gazbeton bölme duvar yükleri tanımlanırken, dış kirişlerde ise cam kompozit cephe sistemlerine karşılık gelen yükler uygulanmıştır. Podyum katlarında yalnızca dış kirişlere cam kompozit cephe yükü tanımlanmış; iç kirişlerde dolgu duvar yükü öngörülmemiştir. Garaj katlarında ise sadece kirişlerin kendi öz ağırlıkları dikkate alınmış, ilave sabit ya da hareketli yük tanımlanmamıştır. Ayrıca bodrum kat seviyesindeki betonarme perde elemanlarında, zeminle etkileşim sonucu oluşabilecek yatay itki etkisinin, yapının genel deprem davranışına katkısının sınırlı olacağı varsayılarak bu yük bileşeni analiz kapsamında ihmal edilmiştir.

Yapının en üst bölümünde yer alan helikopter iniş platformuna etkiyen yükler ise hem normal hem de acil iniş-kalkış senaryoları kapsamında değerlendirilmiştir. Platformun tasarımında ICAO tarafından yayımlanan Heliport Manual Doc 9261-AN/903 esas alınmış; bu doğrultuda platforma etkiyen yükler, sabit donatılara ek olarak

helikopterin tekerlek yükleri, frenleme kuvvetleri ve rotor etkisi gibi dinamik bileşenleri de içerecek şekilde tanımlanmıştır. Bu yükler, platformun taşıyıcı sistemine dikey ve yatay bileşenler olarak aktarılmış ve rijit çekirdek perde sistemi ile entegre taşıyıcı yapı üzerinde değerlendirilmiştir.

Çizelge 3.7. Kiriş ve Döşeme Türlerinin Yük Değerleri

Fonksiyonel Bölge	Yük Konumları	Eleman Türleri	Sabit Yükler (kN/m)	Hareketli Yükler (kN/m ²)
Garaj	Döşeme	GS	1,00	10,00
		SS	2,00	3,50
	Kiriş	GBM	-	-
		GBS	-	-
		GBE	-	-
Podyum	Döşeme	PS	3,25	5,00
		SS	2,00	5,00
	Kiriş	PBM	-	-
		PBS	-	-
		PBE	2,25	-
Normal Katlar	Döşeme	NDeck	2,75	3,50
		NS	2,75	5,00
		SS	2,00	5,00
	Kiriş	NBM	6,25	-
		NBS	6,25	-
		NBE	2,25	-

3.2. Yöntem

Tez çalışmaları süresince, yapının sismik yükler altındaki davranışı hem doğrusal (lineer) hem de doğrusal olmayan (nonlinear) analiz yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Analizler, yapı mühendisliğinde yaygın olarak kullanılan ETABS V21 yapısal analiz ve tasarım yazılımı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Üç boyutlu analiz modeli, taşıyıcı sistemin geometrik özellikleri, malzeme tanımları ve yük kombinasyonları dikkate alınarak oluşturulmuştur. Yapı, yüksek bina sınıfında değerlendirildiğinden, deprem etkileri hem modal analiz hem de zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yöntemleriyle detaylı biçimde ele alınmıştır.

Geleneksel taşıyıcı sistem (GTS), DD-1 / Benzeştirilmiş İvme Kayıtları (Pazarcık / Kahramanmaraş) ve DD-2 / Ölçeklendirilmiş Tasarım Spektrumları (1,25) göz önüne alınarak kesit yeterlilikleri ile ilgili tüm hesaplamalar ve sınır değer kontrolleri, TBDY-2018 ve ÇYTHYE-2016 yönetmeliklerine uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, taşıyıcı sistemin hem betonarme hem de çelik-beton kompozit elemanlarının kesit boyutlandırmaları, dayanım ve şekil değiştirme kriterleri dikkate alınarak tasarlanmış; kesitlerin yeterliliği, ilgili yönetmeliklerde tanımlanan güvenlik katsayıları ve sınır deformasyon değerleri doğrultusunda kontrol edilmiştir.

Yapının tasarım mevkisi **Bakırköy / İSTANBUL** olarak belirlenmiş olup, bu konuma ait deprem yer hareketi düzeyi parametreleri, $S_s = 1,2830$ ve $S_1 = 0,3480$ olarak belirlenmiştir. GTS'nin deprem hesapları, (3-21) katlar arası olarak belirlenmiş olup diğer önemli tasarım parametreleri ise aşağıda belirtildiği gibi tanımlanmıştır.

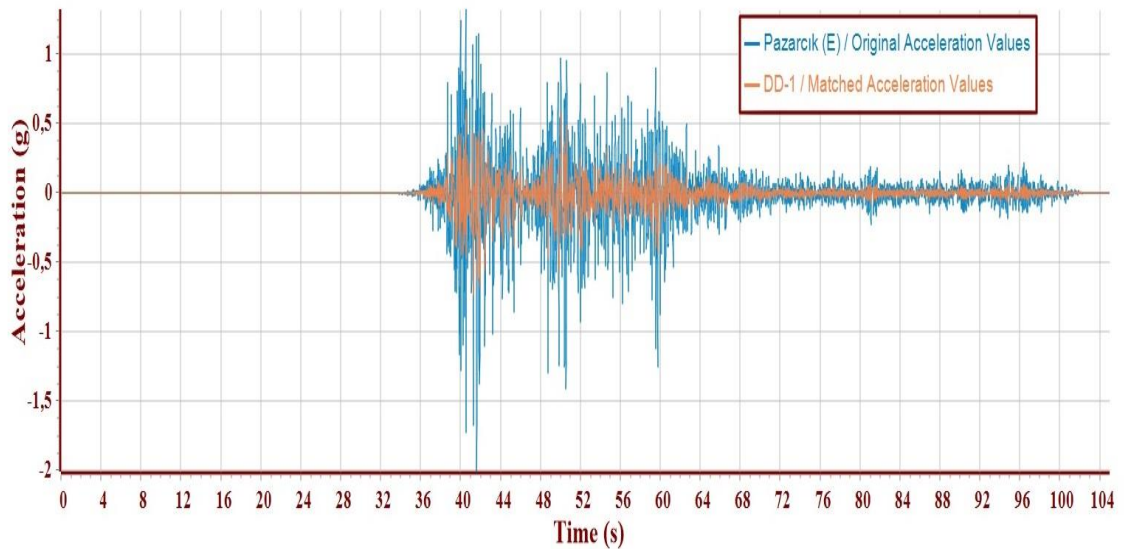
- ✓ **Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı (A14-C14):** 7 (İsteğe bağlı olarak)
- ✓ **Bina Yükseklik Sınıfı:** 1
- ✓ **Bina Kullanım Sınıfı (BKS):** 3
- ✓ **Deprem Tasarım Sınıfı (DTS):** 1
- ✓ **Dayanım Fazlalığı Katsayısı (D):** 3 (İsteğe bağlı olarak)
- ✓ **Doğal Titreşim Periyot Hesabı Katsayısı (C_t):** 0,07
- ✓ **Hareketli Yük Kütle Katılım Oranı (n):** 0,3
- ✓ **Zemin Sınıfı:** ZA

Tasarımı gerçekleştirilen yapının, bina yükseklik sınıfı nedeniyle TBDY-2018 / Bölüm 13: “Deprem Etkisi Altında Yüksek Bina Taşıyıcı Sistemlerinin Tasarımı İçin Özel Kurallar” kapsamında değerlendirilmesi gerekmektedir. Dolayısıyla yapının taşıyıcı sistem elemanlarının etkin kesit rijitlik çarpanları da bu doğrultuda tanımlanmıştır.

Ayrıca, yapının doğrusal (lineer) analizlerinin Mod Birleştirme Yöntemleri (Modal Superposition) ile gerçekleştirilmesi durumunda, %5 sönüm oranına sahip DD-2 düzeyindeki tasarım spektrumunun, %2,5 sönüm oranına indirgenmiş tasarım düzeyine karşılık yatay elastik tasarım spektral ivme değerleri ($S_{ae}(T)$)'nin 1,25 katsayısı ile ölçeklendirilmesi gerektiği yönetmelikte açıkça belirtilmektedir.

Buna ek olarak, doğrusal olmayan (nonlinear) Zaman Tanım Alanı Analizleri kapsamında ise, DD-1 deprem yer hareketi düzeyinde hesap ve tasarım kontrollerinin, yapı inşaatının planlandığı mevkinin sismotektonik özelliklerini temsil eden ve benzer spektral özelliklere sahip en az 11 adet çift yönlü (X ve Y) ivme kaydı ile gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu ivme kayıtlarının, hedef tasarım spektrumu ile uyumlu hale getirilmesi yönetmelikte belirtilmiş olup, sismik analizlerde benzeştirilmiş spektrum eğrisine göre yapılmalıdır. Ayrıca hem Mod Birleştirme Yöntemleri hem de Zaman Tanım Alanı Analizleri için yapı genelinde esas alınacak sönüm oranı %2,5 olarak da sınırlandırılmıştır.

Bu bağlamda, tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen Zaman Tanım Alanı Analizlerinde, yönetmelikte belirtilen minimum ivme kaydı sayısı ihmal edilmiş olup; bunun yerine 6 Şubat 2023 tarihinde ülkemizde meydana gelen Kahramanmaraş/Pazarcık Depremi'nin AFAD tarafından yayımlanan ve 4614 numaralı istasyona ait işlenmiş ivme kayıtları (Doğu-Batı Bileşeni, X doğrultusu / 34-80 saniyeler arası) esas alınmıştır. Bu kayıtlar, SeismoMatch yazılımı aracılığıyla DD-1 düzeyine karşılık gelen hedef tasarım spektrumları ile uyumlu hale getirilmiş ve elde edilen benzeştirilmiş ivme değerleri dikkate alınarak analizler (FNA) gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.8. Benzeştirilmiş İvme Değerleri Eğrisi (X-Doğrultusu / SeismoMatch)

Taşıyıcı sisteme ait kompozit kolon ve kiriş elemanları, ETABS yazılımında, Sections Properties/Frame Sections/Steel Composite bölümünde, kompozit döşemeleri

ise yine Sections Properties/Deck Sections bölümünde filled olarak tanımlanmıştır. Yapıya ait çekirdek ve bodrum perdeleri Sections Properties/Wall Sections bölümünde shell-thin olarak, diğer bağlantı döşeme kısımları, balkon ve merdivenler Sections Properties/Slab Sections bölümünde shell-thin / slab olarak tanımlanmıştır. Podyum ve garaj katlarının döşemeleri de yine Sections Properties/Slab Sections bölümünde shell-thin / ribbed olarak tanımlanmıştır.

Taşıyıcı sistem içerisinde temel sistemi tanımlanmamış olup alt garaj katı taban seviyesinde Joint/Restraints bölümünde fixed (ankastre) olarak tanımlanmıştır.

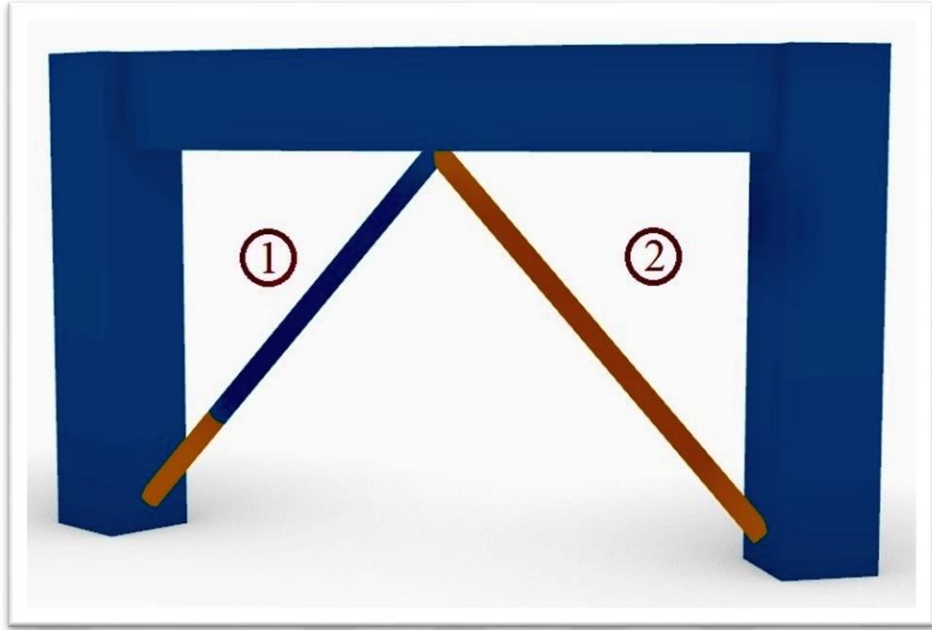
3.2.1. FVD Bağlantılarının Özellikleri ve Tanımlanması

Tez çalışmaları kapsamında gerçekleştirilen analizlerde kullanılan akışkan viskoz sönümleyici (FVD), Taylor Devices Inc. firmasına ait 17170 seri numaralı üründür. Bu sismik kontrol mekanizması, sönüm kuvveti hızın üstel fonksiyonu olarak tanımlanan doğrusal olmayan bir davranış sergilemekte olup; analizlerde kullanılan hız-kuvvet ilişkisi, üretici verileri doğrultusunda, $F = C \cdot V^\alpha$ esas alınarak modellenmiştir. Bu çalışmada sismik yük hız değeri $V = 0,5$ (m/s) olup sönümleyiciye ait üstel katsayı ise $\alpha = 0,4$ olarak kabul edilmiştir.

FVD bağlantıları ETABS yazılımı içerisinde farklı yöntemlerle model tasarım içerisine dâhil edilebilirler. Bu yöntemler;

1) FVD' ler, taşıyıcı sistem içerisinde ya kendi fiziksel uzunlukları ölçüsünde link elemanlar olarak tanımlanıp diğer uç noktasından da frame eleman olarak tanımlanan uzatıcının birleşimi,

2) FVD ile uzatıcı birleşiminin dış uç noktaları arasına yazılım içerisindeki Link Property Data bölümünde fixed length damper kısmında FVD'nin kendi fiziksel özellikleri ve extender properties bölümünde ise uzatıcının fiziksel özellikleri birlikte tanımlanarak yazılım model tasarım içerisine dâhil edilirler.



Şekil 3.9. FVD Bağlantılarının Tanımlanma Yöntemleri (Etabs)

Tez kapsamında da ikinci yöntem kullanılmış olup FVD bağlantılarında, kullanılan uzatıcı elemanların kesit özellikleri ile birlikte, sönümleyici cihazlara ait tüm karakteristik parametreler, üretici firmanın teknik verileri doğrultusunda belirlenmiş ve tasarım sürecinde hem doğrusal (lineer) hem de doğrusal olmayan (nonlineer) davranış modelleri ETABS yazılımı içerisinde ayrı ayrı tanımlanmıştır. Doğrusal analizlerde, FVD davranışı sabit sönüm katsayısına sahip bir viskoz model ile temsil edilmiş; doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizlerinde ise cihazın hıza duyarlı, doğrusal olmayan enerji sönümleme kapasitesi dikkate alınmıştır. Bu kapsamda, FVD elemanlarının farklı analiz senaryoları altındaki sismik performansa katkısı ayrıntılı biçimde değerlendirilmiştir.

FVD' lerin yapı sistemine entegrasyonu, taşıyıcı sistem üzerindeki kritik bölgeler için tanımlanan bağ elemanları Link/Support Properties aracılığıyla sağlanmış olup detayları **Şekil 3.10.'** de gösterildiği gibidir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

The 'Link Property Data' dialog box for FVD-17170 is shown. It contains the following sections:

- General:** Link Property Name: FVD-17170, Link Type: Damper - Exponential, Link Property Notes: Modify/Show Notes..., P-Delta Parameters: Modify/Show..., Acceptance Criteria: Modify/Show..., None specified.
- Total Mass and Weight:** Mass: 0.408 ton, Weight: 4.0025 kN, Rotational Inertia 1: 0 ton-m², Rotational Inertia 2: 0 ton-m², Rotational Inertia 3: 0 ton-m².
- Factors for Line and Area Springs:** Link/Support Property is Defined for This Length When Used in a Line Spring Property: 1 m, Link/Support Property is Defined for This Area When Used in an Area Spring Property: 1 m².
- Directional Properties:** A table with columns: Direction, Fixed, NonLinear, Properties. It lists U1, U2, U3 and R1, R2, R3. U1 is checked for Fixed and NonLinear. Buttons for 'Modify/Show' are provided for each direction. 'Fix All' and 'Clear All' buttons are at the bottom.
- Stiffness Options:** Stiffness Used for Linear and Modal Load Cases: Effective Stiffness from Zero, Else Nonlinear, Stiffness Used for Stiffness-proportional Viscous Damping: Initial Stiffness (K0), Stiffness-proportional Viscous Damping Coefficient Modification Factor: 1.

Buttons: OK, Cancel.

Şekil 3.10.1. FVD-17170 Karakteristik Özellikleri Tanımlanması (1)

The 'Link/Support Directional Properties' dialog box for FVD-17170 is shown. It contains the following sections:

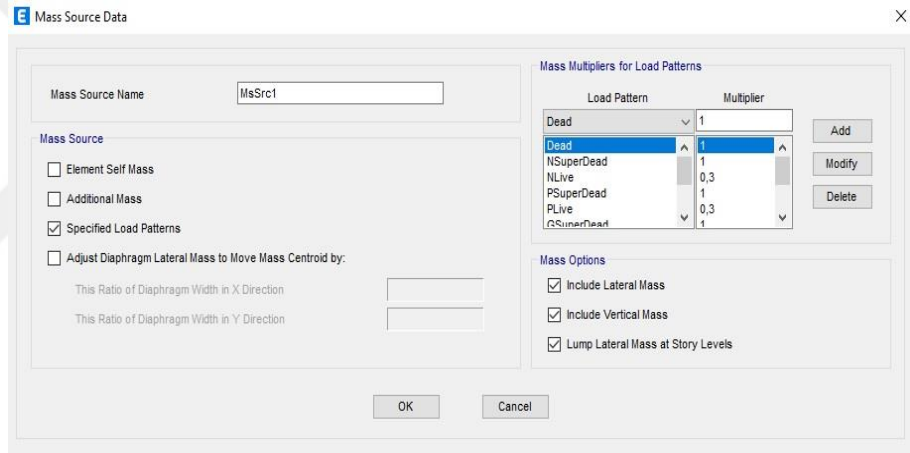
- Identification:** Property Name: FVD-17170, Direction: U1, Type: Damper - Exponential, NonLinear: Yes.
- Linear Properties:** Effective Stiffness: 346749.48 kN/m, Effective Damping: 4000 kN-s/m.
- Nonlinear Properties:** Stiffness: 525378 kN/m, Damping: 2639.02 kN*(s/m)^{Cexp}, Damping Exponent: 0.4, Fixed Length Damper: checked, Damper Length: 1.575 m.
- Extender Properties:** Modulus of Elasticity: 210000000 kN/m², Cross Sectional Area: 0.021991 m².

Buttons: OK, Cancel.

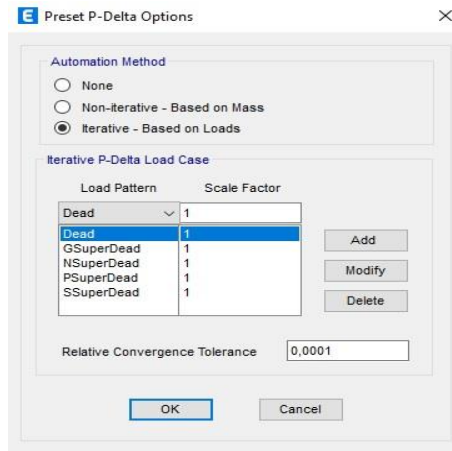
Şekil 3.10.2. FVD-17170 Karakteristik Özelliklerinin Tanımlanması (2)

3.2.2. Analiz Yöntemleri ve Bilgi Girişleri

Geleneksel taşıyıcı sistemin (GTS) deprem etkileri altındaki dinamik davranışının değerlendirilmesi amacıyla hem doğrusal (lineer) hem de doğrusal olmayan (nonlinear) analiz yöntemleri kullanılmıştır. Analiz süreci, TBDY-2018 kapsamında tanımlanan esaslara uygun olarak gerçekleştirilmiş ve yapının yüksek bina sınıfında değerlendirilmesi nedeniyle, her iki analiz türü için de gelişmiş dinamik çözüm yaklaşımları tercih edilmiştir. Yapının dinamik davranışının gerçekçi biçimde temsil edilebilmesi amacıyla, analiz modelinde kullanılan kütle tanımları dikkatle yapılandırılmıştır. Kütle kaynakları, belirli yük kombinasyonlarına dayandırılarak tanımlanmış; sabit yükler %100, hareketli yükler ise yönetmeliklere uygun şekilde %30 oranında kütleyle dâhil edilmiştir.



Şekil 3.11. Sabit ve Hareketli Yüklerin Kütle Katılım Oranları



Şekil 3.12. İkinci Mertebe Etkilerinin Tanımlanması (P-Delta)

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Ayrıca, ikinci mertebe etkilerin (P-Delta) yapı davranışına etkisinin ihmal edilmemesi adına, analiz modelinde iteratif çözüme dayalı bir yük durumu tanımlanmıştır. Tüm kalıcı yük kombinasyonlarını kapsayacak şekilde oluşturulan bu modelde, yakınsama toleransı 0.0001 olarak belirlenmiş; böylece yer değiştirmeye bağlı ikincil etkilerin yapı performansına katkısı analiz sürecine dâhil edilmiştir.

Doğrusal analizlerde, öncelikle Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemi (EQX, EQY) uygulanarak yapı davranışına ilişkin ilk düzey değerlendirmeler yapılmış; ardından Mod Birleştirme Yöntemi kapsamında tanımlanan (EX, EY ve EZ) deprem spektrumu etkileri analiz edilmiştir. Bu doğrusal analizlerde, ETABS V21 yazılımı içerisinde Modal-Eigen yöntemi ile elde edilen mod şekilleri esas alınmış ve %2,5 sönüm oranına göre ölçeklendirilmiş elastik tasarım spektrumu kullanılmıştır.

TSC-2018 Seismic Loading

Direction and Eccentricity

☒ X Dir ☐ Y Dir

☒ X Dir + Eccentricity ☐ Y Dir + Eccentricity

☒ X Dir - Eccentricity ☐ Y Dir - Eccentricity

Ecc. Ratio (All Diaph.) 0.05

Overwrite Eccentricities Overwrite...

Time Period

☐ Approximate ☒ Program Calculated ☐ User Defined

Ct (m)x 0.07; 0.75

T = SEC

Story Range

Top Story for Seismic Loads Story21

Bottom Story for Seismic Loads Story3

Seismic Coefficients

0.2 Sec Spectral Accel, Ss 1.283

1 Sec Spectral Accel, S1 0.348

Long-Period Transition Period 6

Site Class ZA

Site Coefficient, Fs 0.8

Site Coefficient, F1 0.8

Calculated Coefficients

SDS = Fs * Ss 1.0264

SD1 = F1 * S1 0.2784

Factors

Response Modification, R 7

System Overstrength, D 3

Occupancy Importance, I 1

OK Cancel

Şekil 3.13.1. Eşdeğer Deprem Yüklerinin Tanımlanması (X-Doğrultusu, EQX)

3. MATERYAL ve YÖNTEM

TSC-2018 Seismic Loading

Direction and Eccentricity

☐ X Dir ☒ Y Dir

☐ X Dir + Eccentricity ☒ Y Dir + Eccentricity

☐ X Dir - Eccentricity ☒ Y Dir - Eccentricity

Ecc. Ratio (All Diaph.) 0.05

Overwrite Eccentricities Overwrite...

Time Period

☐ Approximate ☒ Program Calculated ☐ User Defined

Q_t (m)x 0.07; 0.75

T = sec

Story Range

Top Story for Seismic Loads Story21

Bottom Story for Seismic Loads Story3

Seismic Coefficients

0.2 Sec Spectral Accel, S_s 1.283

1 Sec Spectral Accel, S₁ 0.348

Long-Period Transition Period 6

Site Class ZA

Site Coefficient, F_s 0.8

Site Coefficient, F₁ 0.8

Calculated Coefficients

SDS = F_s * S_s 1.0264

SD1 = F₁ * S₁ 0.2784

Factors

Response Modification, R 7

System Overstrength, D 3

Occupancy Importance, I 1

OK Cancel

Şekil 3.13.2. Eşdeğer Deprem Yüklerinin Tanımlanması (Y-Doğrultusu, EQY)

Load Case Data

General

Load Case Name Modal_Eigen

Load Case Type/Subtype Modal Eigen

Mass Source MsSrc1

Analysis Model Default

P-Delta/Nonlinear Stiffness

☒ Use Preset P-Delta Settings ☐ Use Nonlinear Case (Loads at End of Case NOT Included)

Iterative based on loads Modify/Show...

Nonlinear Case

Loads Applied

Load Type	Load Name	Target Mass Par. Ratio, %	Static Correction
Acceleration	UX	99	Yes
Acceleration	UY	99	Yes
Acceleration	UZ	99	Yes

Add Delete

Advanced

Other Parameters

Maximum Number of Modes 60

Minimum Number of Modes 1

Frequency Shift (Center) 0 cyc/sec

Cutoff Frequency (Radius) 0 cyc/sec

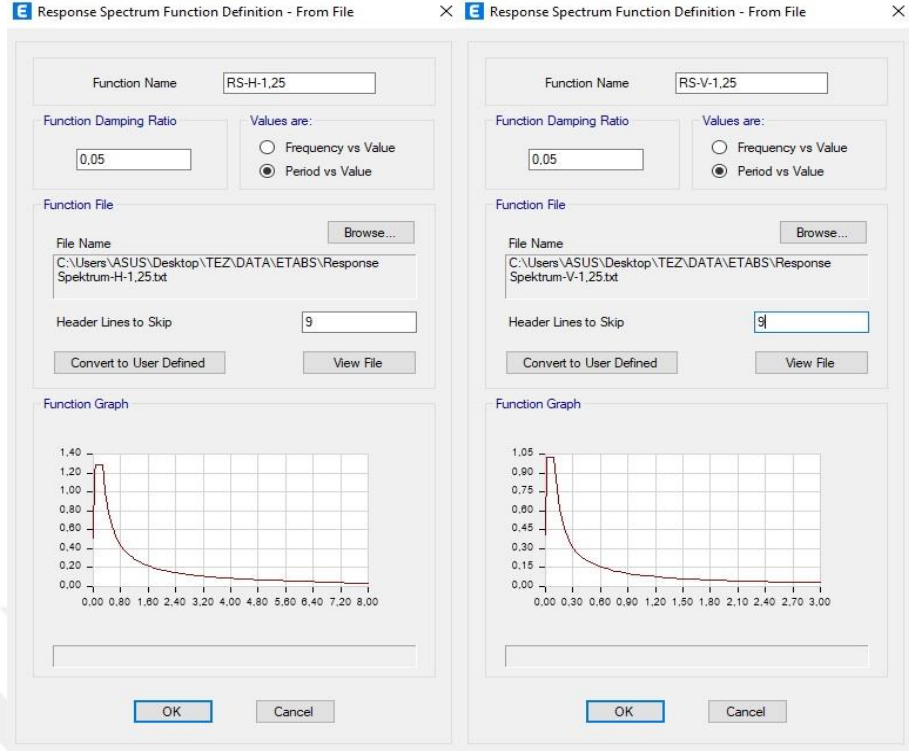
Convergence Tolerance 1E-09

☒ Allow Auto Frequency Shifting

OK Cancel

Şekil 3.14. Mod Birleştirme Yöntemi (Eigen)

3. MATERYAL ve YÖNTEM



Şekil 3.15. DD-2 (Ölçeklendirilmiş) Spektrum Eğrileri (RS-H-1,25, RS-V-1,25)

Şekil 3.16.1. DD-2 (Ölçeklendirilmiş) Spektrum Eğrisi Analiz (X-Doğrultusu, EX)

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Load Case Data

General

Load Case Name: EY

Load Case Type: Response Spectrum

Mass Source: Previous (MsSrc1)

Analysis Model: Default

Loads Applied

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Acceleration	U2	RS-H-1,25	1,4014

Other Parameters

Modal Load Case: Modal_Eigen

Modal Combination Method: CQC

☐ Include Rigid Response

Rigid Frequency, f1:

Rigid Frequency, f2:

Periodic + Rigid Type:

Earthquake Duration, td:

Directional Combination Type: SRSS

Absolute Directional Combination Scale Factor:

Modal Damping: Constant at 0,025

Diaphragm Eccentricity: 0,05 for All Diaphragms

Buttons: Design..., Notes..., Add, Delete, Advanced, OK, Cancel

Şekil 3.16.2. DD-2 (Ölçeklendirilmiş) Spektrum Eğrisi Analiz (Y-Doğrultusu, EY)

Load Case Data

General

Load Case Name: EZ

Load Case Type: Response Spectrum

Mass Source: Previous (MsSrc1)

Analysis Model: Default

Loads Applied

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Acceleration	U3	RS-V-1,25	9,81

Other Parameters

Modal Load Case: Modal_Eigen

Modal Combination Method: CQC

☐ Include Rigid Response

Rigid Frequency, f1:

Rigid Frequency, f2:

Periodic + Rigid Type:

Earthquake Duration, td:

Directional Combination Type: SRSS

Absolute Directional Combination Scale Factor:

Modal Damping: Constant at 0,025

Diaphragm Eccentricity: 0 for All Diaphragms

Buttons: Design..., Notes..., Add, Delete, Advanced, OK, Cancel

Şekil 3.16.3. DD-2 (Ölçeklendirilmiş) Spektrum Eğrisi Analiz (Z-Doğrultusu, EZ)

General

Load Case Name: Modal_Ritz [Design...]

Load Case Type/Subtype: Modal Ritz [Notes...]

Mass Source: MsSrc1

Analysis Model: Default

P-Delta/Nonlinear Stiffness

☒ Use Preset P-Delta Settings [Iterative based on loads] [Modify/Show...]

☐ Use Nonlinear Case (Loads at End of Case NOT Included)

Nonlinear Case: []

Loads Applied

Load Type	Load Name	Maximum Cycles	Target Dyn. Par. Ratio, %
Acceleration	UX	0	99
Acceleration	UY	0	99
Acceleration	UZ	0	99

[Add] [Delete]

Other Parameters

Maximum Number of Modes: 60

Minimum Number of Modes: 11

[OK] [Cancel]

Şekil 3.17. Mod Birleştirme Yöntemi (Ritz)

Doğrusal olmayan analizler, Zaman Tanım Alanında Analiz yöntemiyle gerçekleştirilmiş olup, bu kapsamda Modal-Ritz tabanlı serbest titreşim modları kullanılarak yapıya iki yatay doğrultuda birleşik olarak (TH-XY) tanımlı ivme kayıtları uygulanmıştır. Her iki doğrultuda da Kahramanmaraş/Pazarcık Depremi'nin Doğu-Batı (E) bileşenine ait (34-80 saniyeler arası) ivme kaydı, DD-1 deprem yer hareketi düzeyine karşılık gelen benzeştirilmiş biçimiyle modele entegre edilmiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Load Case Data

General

Load Case Name: TH-D

Load Case Type/Subtype: Time History, Nonlinear Modal (FNA)

Mass Source: Previous (MsSrc1)

Analysis Model: Default

Initial Conditions

☒ Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State

☐ Continue from State at End of Nonlinear Case (Loads at End of Case ARE Included)

Nonlinear Case:

Loads Applied

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Acceleration	U3	RampTH	9.81

Add, Delete, Advanced

Other Parameters

Modal Load Case: Modal_Ritz

Number of Output Time Steps: 100

Output Time Step Size: 0,01 sec

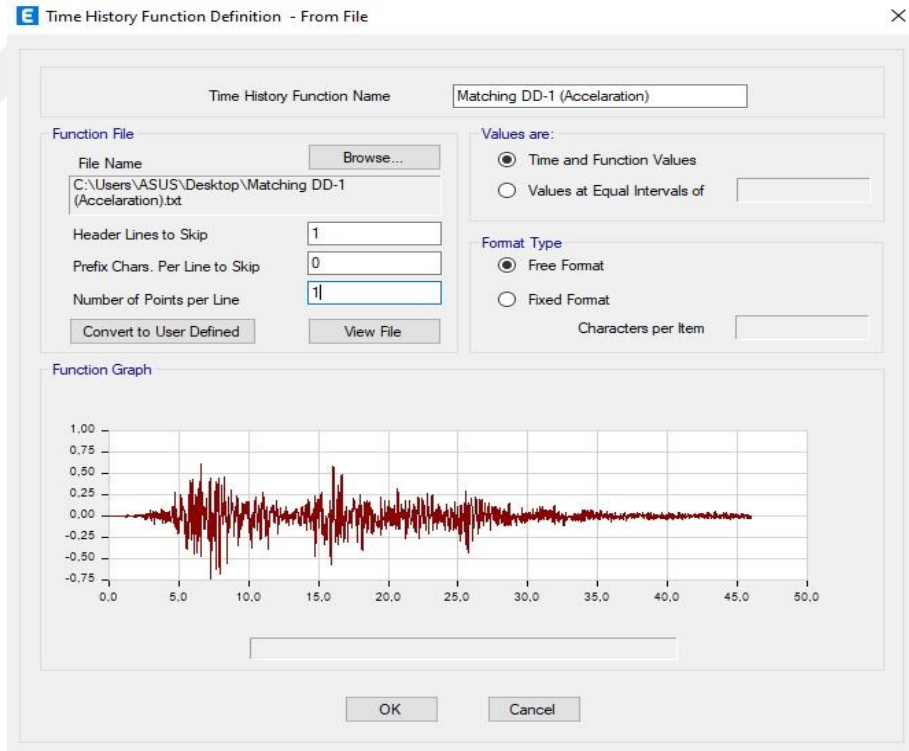
Modal Damping: Constant at 0,05

Nonlinear Parameters: Default

Modify/Show..., Modify/Show...

OK, Cancel

Şekil 3.18. Zaman Tanım Alanında Analiz (Başlangıç Tanımı, TH-D)



Şekil 3.19. DD-1 (Benzeştirilmiş) İvme Eğrileri (Matching DD-1 / Acceleration)

Load Case Data

General

Load Case Name: TH-XY [Design...]

Load Case Type/Subtype: Time History [Nonlinear Modal (FNA)] [Notes...]

Mass Source: Previous (MsSrc1)

Analysis Model: Default

Initial Conditions

☐ Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State

☒ Continue from State at End of Nonlinear Case (Loads at End of Case ARE Included)

Nonlinear Case: TH-D

Loads Applied

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Acceleration	U1	Matching DD-1 (Acc...	9.81
Acceleration	U2	Matching DD-1 (Acc...	9.81

[Add] [Delete] [Advanced]

Other Parameters

Modal Load Case: Modal_Ritz

Number of Output Time Steps: 4600

Output Time Step Size: 0,01 sec

Modal Damping: Constant at 0,025 [Modify/Show...]

Nonlinear Parameters: Default [Modify/Show...]

[OK] [Cancel]

Şekil 3.20. Zaman Tanım Alanında Analiz (X-Y Doğrultusu, TH-XY)

Zenginleştirilmiş taşıyıcı sistemlerin (ZTS) analiz senaryolarında ise; yapının dinamik karakteristiklerinin doğru biçimde temsil edilebilmesi amacıyla, modal analizlerde link (bağlantı) elemanlarının katkısı dikkate alınmıştır. Bu bağlamda, Modal Birleştirme Yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen Eigen ve Ritz temelli spektrum analizlerinde, FVD'leri temsil eden link elemanlarının rijitlik ve kütle etkileri modal çözüm sürecine entegre edilmiştir. Böylece, özellikle alt modlara ilişkin frekanslar ve mod şekilleri üzerinde sönümleyici elemanların etkisi yansıtılarak, daha tutarlı bir dinamik tepki analizi elde edilmiştir.

Ayrıca, Taylor Devices Inc. tarafından yayımlanan teknik dokümanlarda, FVD elemanlarının yapıya entegre edildiği analiz senaryolarında, modal çözümlemenin doğruluğu açısından tanımlanan mod sayısının kullanılan FVD elemanlarının sayısı kadar artırılması gerektiği belirtilmektedir. Bu doğrultuda, tez kapsamında değerlendirilen tüm zenginleştirilmiş taşıyıcı sistem (ZTS) varyantlarına ilişkin analizlerde, mod sayıları her konfigürasyonun içerdiği FVD adedi dikkate alınarak yeniden hesaplanmış ve her biri ETABS analiz modellerine ayrı ayrı tanımlanmıştır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

FVD bağlantılarının yerleşim konfigürasyonlarına göre tanımlanan bu mod sayıları ise, **Çizelge 3.8**'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.8. Mod Birleştirme Yöntemi Eigen / Ritz Mod Sayıları

Taşıyıcı Sistem Türleri	Mod Birleştirme Eigen / Ritz Mod Sayıları
GTS	60 / 60
ZTS (1)	123 / 123
ZTS (2)	303 / 303
ZTS (3)	423 / 423
ZTS (4)	303 / 303
ZTS (5)	103 / 103
ZTS (6)	203 / 203
ZTS (7)	723 / 723

Load Case Data

General

Load Case Name: Modal_Eigen [Design...]

Load Case Type/Subtype: Modal Eigen [Notes...]

Mass Source: MsSrc1

Analysis Model: Default

P-Delta/Nonlinear Stiffness

☒ Use Preset P-Delta Settings [Iterative based on loads] [Modify/Show...]

☐ Use Nonlinear Case (Loads at End of Case NOT Included)

Nonlinear Case: []

Loads Applied

Load Type	Load Name	Target Mass Par. Ratio, %	Static Correction
Acceleration	UY	99	Yes
Acceleration	UZ	99	Yes
Link	All	99	Yes

[Add] [Delete] [Advanced]

Other Parameters

Maximum Number of Modes: 303

Minimum Number of Modes: 1

Frequency Shift (Center): 0 cyc/sec

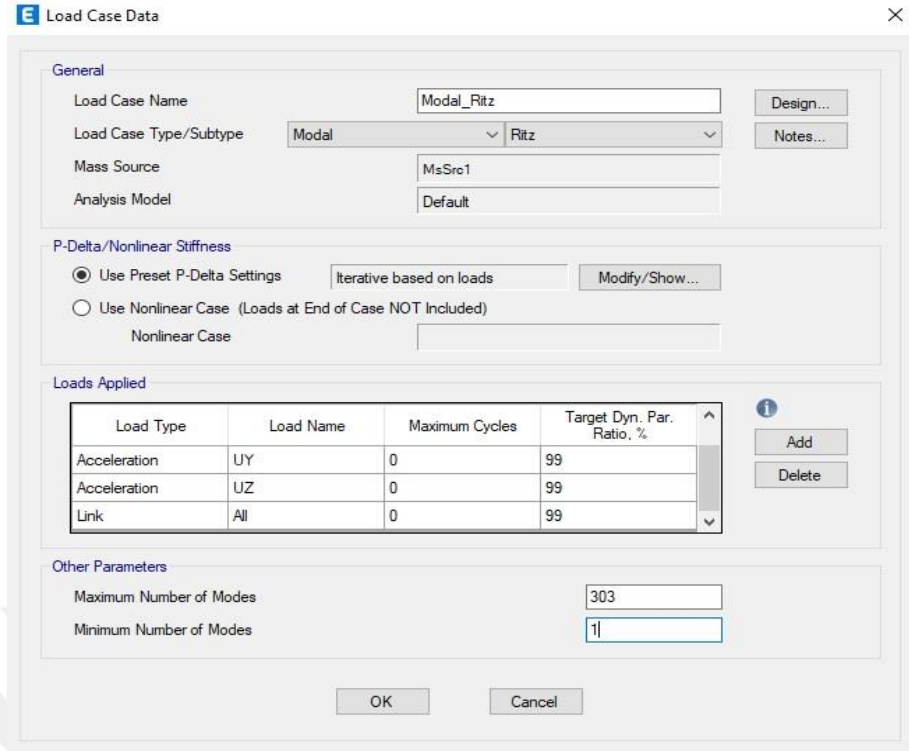
Cutoff Frequency (Radius): 0 cyc/sec

Convergence Tolerance: 1E-09

☒ Allow Auto Frequency Shifting

[OK] [Cancel]

Şekil 3.21. Mod Birleştirme Yöntemi (Eigen) / FVD Bağlantılarının Aktifleştirilmesi



Load Type	Load Name	Maximum Cycles	Target Dyn. Par. Ratio, %
Acceleration	UY	0	99
Acceleration	UZ	0	99
Link	All	0	99

Şekil 3.22. Mod Birleştirme Yöntemi (Ritz) / FVD Bağlantılarının Aktifleştirilmesi

Şekil 3.(21.-22.)’ deki görsellerde, sayfa düzeni nedeniyle UX görüntülenememektedir.

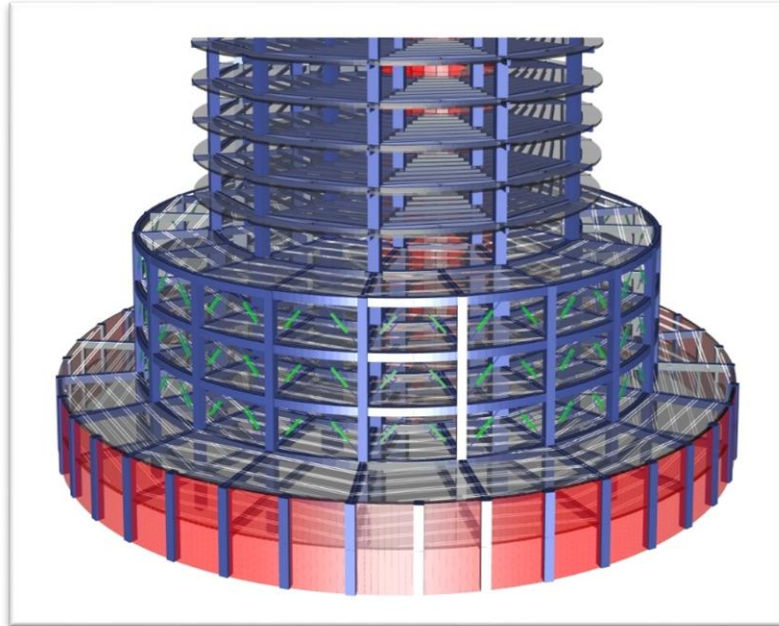
3.2.3. FVD Bağlantılarının Konfigürasyon Çeşitleri

Tez çalışması, çelik-beton kompozit taşıyıcı sistemlere entegre edilen akışkan viskoz sönümleyici (FVD) bağlantılarının, farklı yerleşim konfigürasyonları altında yapının sismik performansı üzerindeki etkilerini, doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizleri aracılığıyla incelemeye odaklanmaktadır. Literatürde hem FVD sistemlerinin genel anlamda enerji sönümleme kapasiteleri ve sismik performansa katkıları üzerine çalışmalar hem de bu elemanların çelik-beton kompozit veya karma taşıyıcı sistemlerle etkileşimi, yerleşim stratejileri ve konum bazlı performans çıktılarıyla ilgili araştırmalar sınırlı düzeydedir.

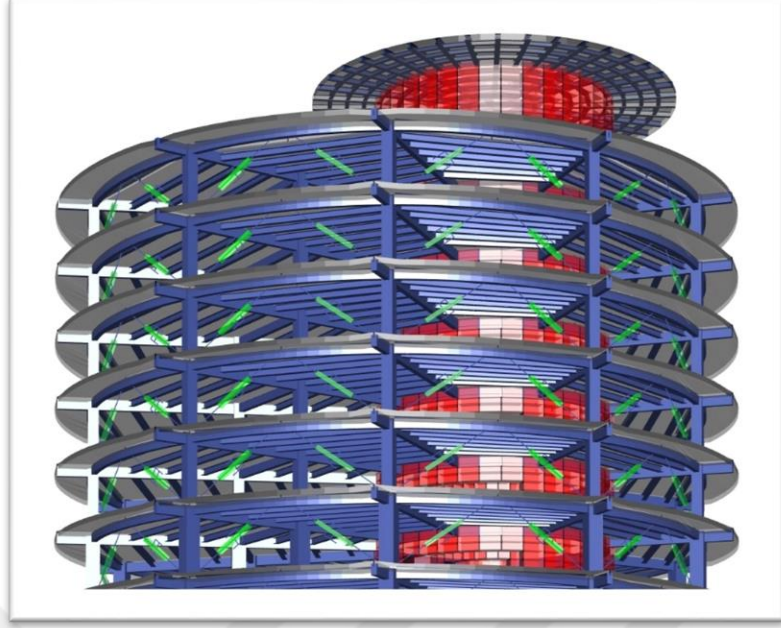
Bu kapsamda, FVD elemanları yapının taşıyıcı sistemine, sismik davranışı etkileyebileceği öngörülen yedi farklı yerleşim varyantı kapsamında entegre edilmiştir. Her bir konfigürasyonda, sönümleyici bağlantılar podyum ve normal katlardaki iç ve dış kolon-kiriş çerçeve sistemlerine, chevron düzeninde yerleştirilmiştir. Bu yerleşim

stratejileri; göreceli kat ötelemeleri, maksimum kat deplasmanları, kat düzeyi kuvvetleri (moment, kesme kuvveti) ve enerji sönümleme kapasitesi bakımından karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Böylece, FVD elemanlarının yapının genel sismik performansı üzerindeki etkileri hem varlıkları ile hem de taşıyıcı sistem içerisindeki konumlarına göre sayısal olarak tespit edilmiştir. Analizlerde değerlendirilen zenginleştirilmiş taşıyıcı sistem (ZTS) konfigürasyonları aşağıda belirtilmektedir;

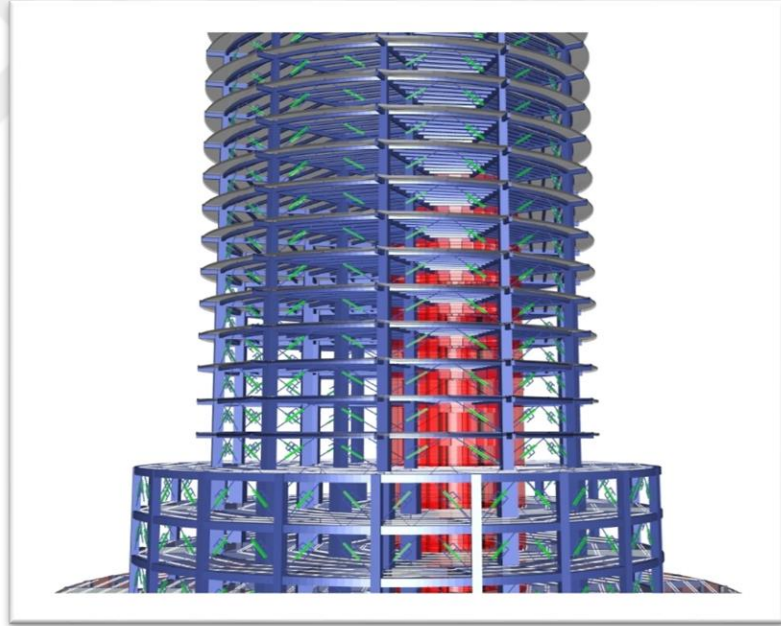
- ✓ **ZTS (1):** Podyum katların dış kolon-kiriş çerçeve sistemleri üzerinde,
- ✓ **ZTS (2):** Normal katların dış kolon-kiriş çerçeve sistemleri üzerinde,
- ✓ **ZTS (3):** Podyum ve normal katların dış kolon-kiriş çerçeve sistemleri üzerinde,
- ✓ **ZTS (4):** Podyum ve normal katların iç kolon-kiriş çerçeve sistemleri üzerinde,
- ✓ **ZTS (5):** Podyum bölgesinin ani rijitlik değişiminin gerçekleştiği kat ile kolon kesitlerinin azaltıldığı normal katların dış kolon-kiriş çerçeve sistemleri üzerinde,
- ✓ **ZTS (6):** Podyum bölgesinin ani rijitlik değişiminin gerçekleştiği kat ile kolon kesitlerinin azaltıldığı normal katlar ve bir üst katlarının dış kolon-kiriş çerçeve sistemleri üzerinde,
- ✓ **ZTS (7):** Podyum ve normal katların hem dış hem de iç kolon-kiriş çerçeve sistemleri üzerinde, olarak konumlandırma stratejileri tanımlanmıştır.



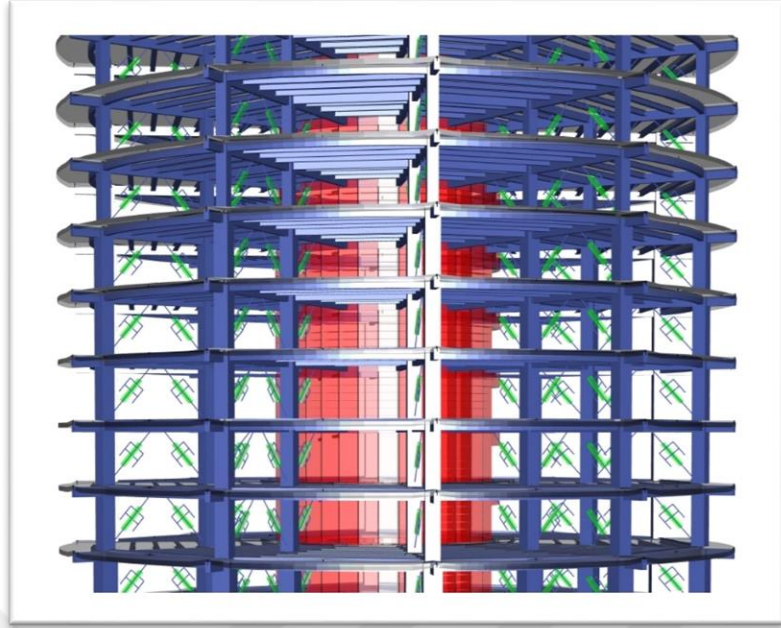
Şekil 3.23. ZTS (1) Tasarım Görünümü



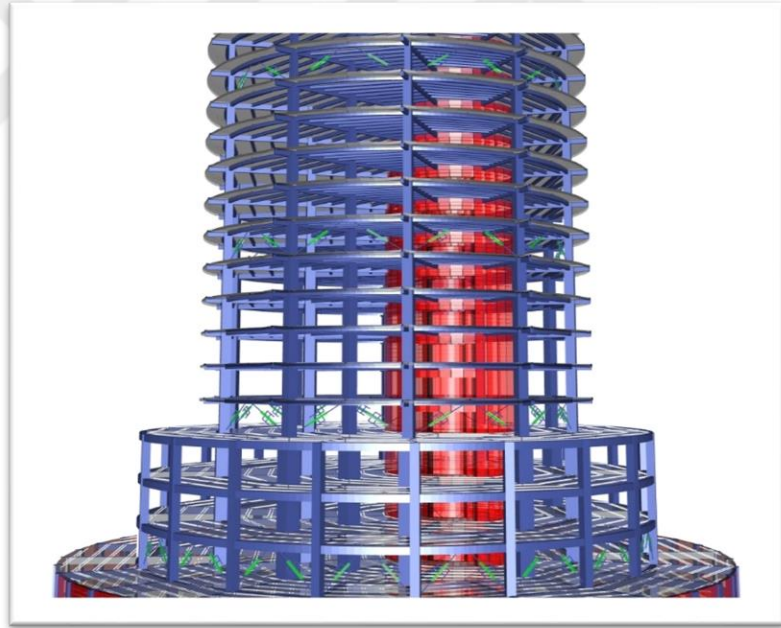
Şekil 3.24. ZTS (2) Tasarım Görünümü



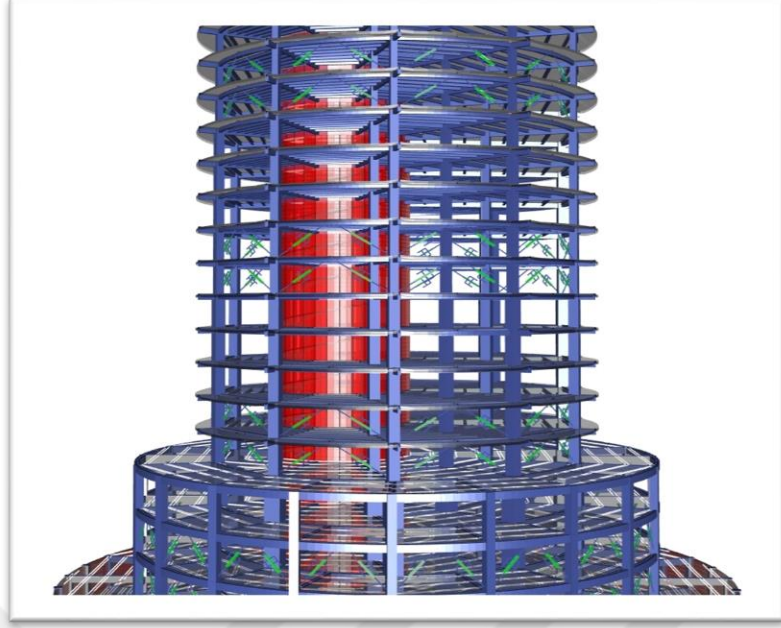
Şekil 3.25. ZTS (3) Tasarım Görünümü



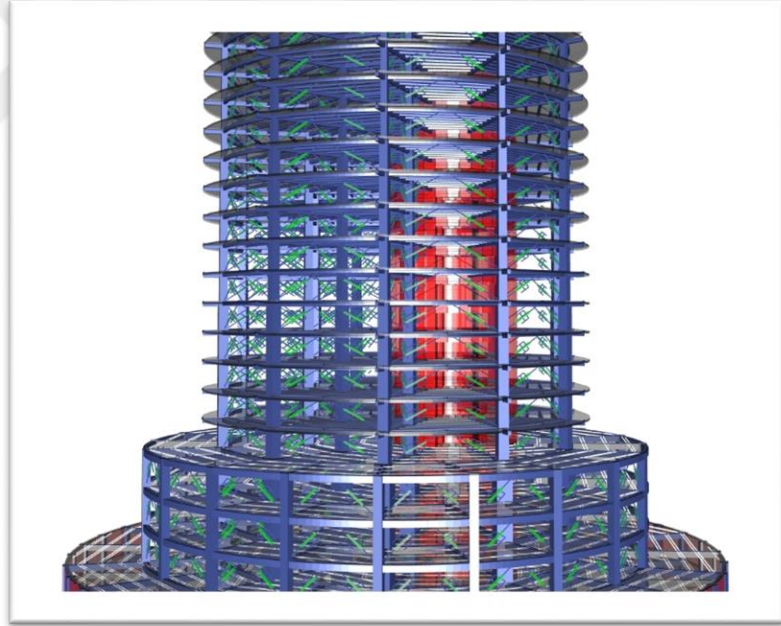
Şekil 3.26. ZTS (4) Tasarım Görünümü



Şekil 3.27. ZTS (5) Tasarım Görünümü



Şekil 3.28. ZTS (6) Tasarım Görünümü



Şekil 3.29. ZTS (7) Tasarım Görünümü

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu bölümde, tez kapsamında geliştirilen çelik-beton kompozit taşıyıcı sisteme ait yapısal modelin, doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizleri sonucunda elde edilen sismik performans bulguları sunulmaktadır. İncelemeler, yapı davranışını etkileyen temel mühendislik parametreleri üzerinden gerçekleştirilmiş ve FVD (akışkan viskoz sönümleyici) bağlantı elemanlarının taşıyıcı sisteme entegrasyonu ile oluşturulan zenginleştirilmiş taşıyıcı sistem (ZTS) varyantları, geleneksel taşıyıcı sistem (GTS) modeli ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Her bir ZTS varyantı, sönümleyici elemanların podyum ya da normal katlarda, dış veya iç kolon-kiriş çerçeve sistemlerine konumlandırılması esasına dayanmaktadır. Bazı varyantlarda ise ani rijitlik değişiminin meydana geldiği ara katlar ve kolon kesiti azaltılmış üst katlar da bu yerleşim stratejisine dâhil edilmiştir. Bu doğrultuda, yalnızca FVD elemanlarının taşıyıcı sisteme entegre edilmesinin genel etkileri değil, aynı zamanda bu elemanların farklı yapısal bölgelerde konumlandırılmasına dayalı yerleşim konfigürasyonlarının davranış üzerindeki göreceli katkıları da mühendislik parametreleri temelinde teknik olarak analiz edilmiş ve yorumlanmıştır.

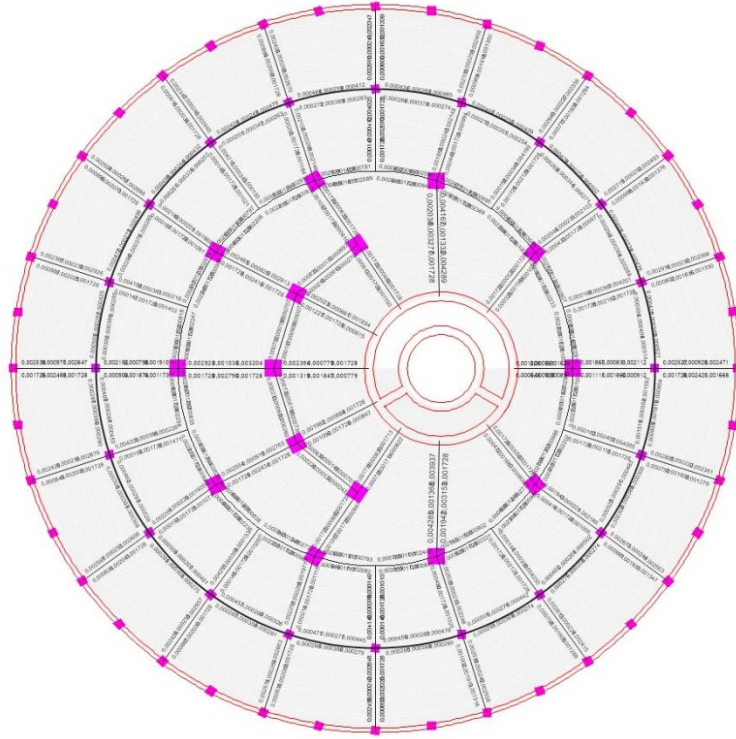
Yapılan karşılaştırmalar aşağıdaki temel performans göstergeleri üzerinden yürütülmüştür:

- ✓ Kat Yer Değiştirmeleri
- ✓ Göreceli Kat Ötelemeleri
- ✓ Kat Kesme Kuvvetleri
- ✓ Kat Moment Kuvvetleri
- ✓ Yapı Enerji Sönüm Miktarları

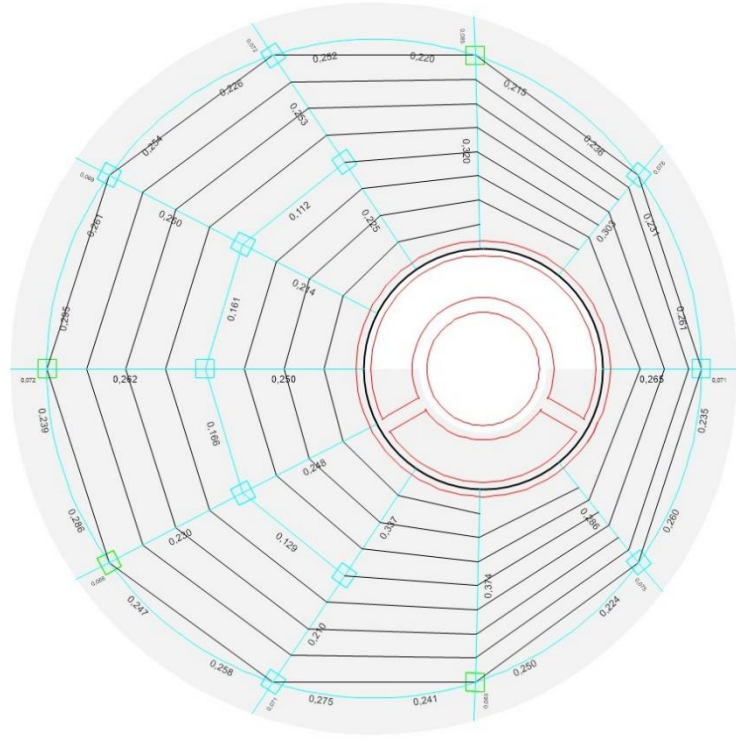
Ayrıca, GTS modeline ait betonarme ve çelik-beton kompozit taşıyıcı elemanların kapasite oranları hesaplanarak, sismik yük etkisindeki davranış düzeyleri sistematik olarak değerlendirilmiştir. Eleman seviyesindeki kapasite oranları doğrultusunda gerilme ve deformasyon miktarları analiz edilmiş; sönümleyici entegrasyonunun sistem

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

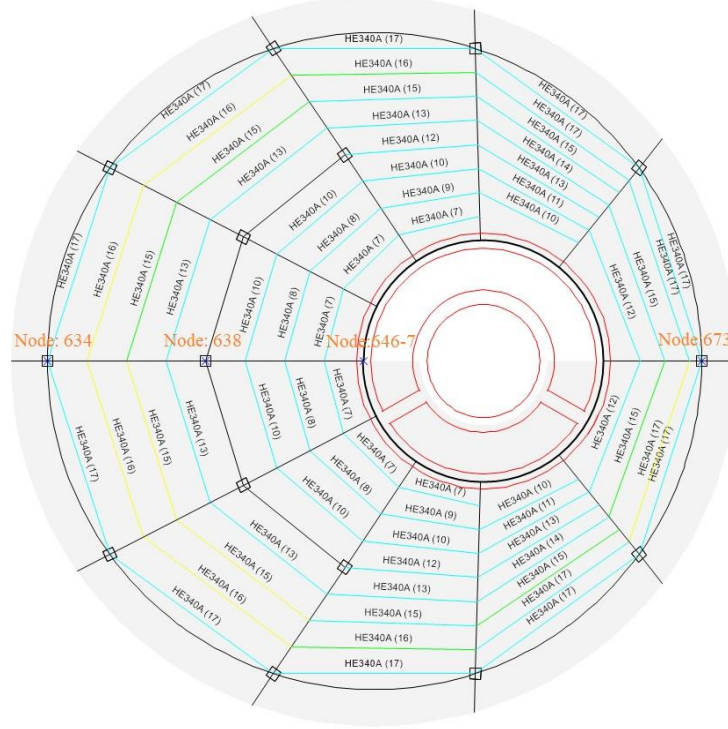
düzeyindeki sismik performans ve eleman seviyesindeki gerilme değerleri üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.



Şekil 4.1. Betonarme Kolon-Kiriş Taşıma Kapasitesi Oranları (GTS, 1. Kat)



Şekil 4.2. Kompozit Kolon-Kiriş Taşıma Kapasitesi Oranları (GTS, 6. Kat)

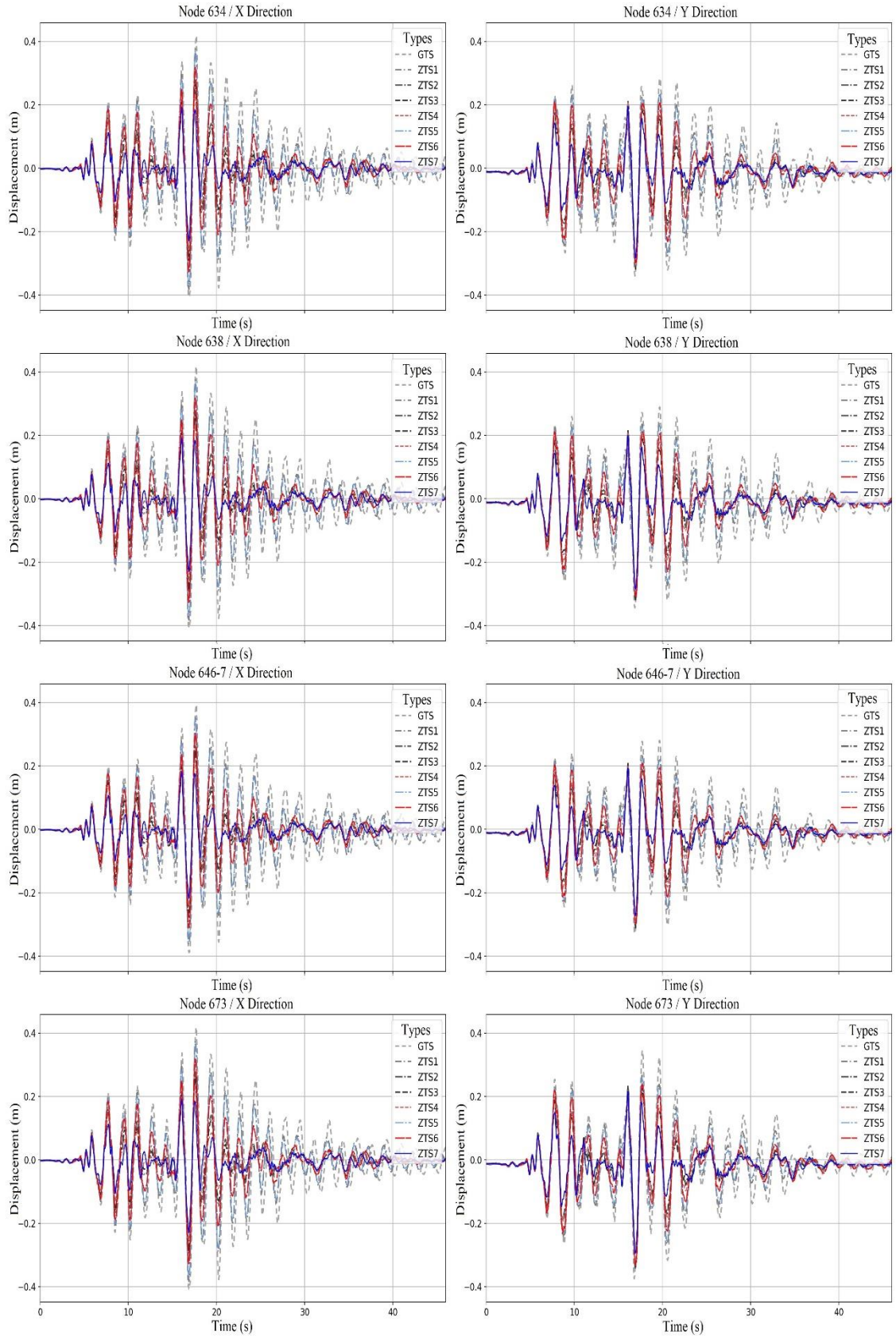


Şekil 4.3. Kompozit Döşeme-Kiriş Taşıma Kapasitesi Oranları (GTS, 20. Kat)

Bu kapsamda ayrıca, normal katlardaki üst katlara doğru kompozit kolonlarda yapılan kesit azaltmaları kapsamında, kolon toplam yüksekliği sabit tutulmakla birlikte kesit boyutları sırasıyla 100 cm, 80 cm ve 60 cm olarak kademelendirilmiş; çelik kaplama kalınlığı ise 25 mm olarak sabit bırakılmıştır. Bu sayede, kolonların brüt kesit alanlarına oranla çelik katkı oranı artırılarak hem kompozit kolonların eleman düzeyindeki dayanım ve süneklik özellikleri iyileştirilmiş, hem de tüm taşıyıcı sistemin süneklik kapasitesi üzerinde olumlu katkılar sağlanmıştır. Bu yaklaşım, yüksek bina tasarımında ileri düzey mühendislik çözümleri arasında değerlendirilmektedir.

Hem GTS hem de ZTS konfigürasyonlarının 83 m kotuna karşılık gelen (Kat: 20) düzlem içerisinde yer alan ve dairesel çekirdek perdelerin merkezi ise (0,00/0,00/83,00) m koordinatları olmak üzere X ekseninde negatif bölgede bulunan sırasıyla dış kolon, iç kolon, dış çekirdek perde sol uç noktası ile pozitif bölgede yer alan dış kolon düğüm noktalarının (634, 638, 646-7, 673) X ve Y doğrultularında zamana bağlı yer değiştirme değerleri analiz edilerek, sismik etkilerin dinamik karakteristikleri ile zamansal değişimi ayrıntılı biçimde belirlenmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



Şekil 4.4. Yer Değiştirme - Zaman Grafikleri (Node: 634, 638, 646-7, 673)

Ayrıca her ne kadar FVD'lerin yapı periyotları üzerinde ihmal edilebilir düzeyde etkili olduğu ve sismik enerjiyi yer değiştirme oranı yoluyla sönümleyerek deplasman taleplerini azalttığı belirlenmiş olsa da, bu durumun temel nedeni FVD'lerin rijitlik artırıcı değil, enerji tüketici şekilde çalışmalarıdır. Kuvvet üretimleri hız bağımlı olduğundan, sistemin kütle-rijitlik dengesi üzerinde doğrudan etkili olmazlar ve dolayısıyla yapıların doğal periyotlarında anlamlı bir değişim oluşturmazlar. Ancak artan sönüm oranı, rezonans etkilerini sınırlandırarak yapının titreşim genliğini azaltır ve daha dengeli bir dinamik davranış sağlar. Özellikle periyodu zemin periyoduna yakın olan sistemlerde bu etki daha belirgin hale gelir. Bununla birlikte, ilave viskoz kuvvetlerin taşıyıcı sistemle etkileşimi sonucunda, temel seviyesine aktarılan kesme kuvveti ve moment miktarlarında belirli miktarlarda azalmalar gözlemlenebilmektedir. Bu durum, FVD'lerin yapı rijitliğine değil, enerji sönümleme kapasitesine dayalı performans iyileştirme mekanizmasıyla ilişkilidir.

Bu kapsamda, yapı sistemine ait doğal titreşim periyotları analiz sonuçlarına göre belirlenmiş; birinci, ikinci ve üçüncü modlara karşılık gelen değerler, sistemin dinamik karakteristiklerini belirlemek amacıyla **Çizelge 4.1'** de belirtilmiştir.

Çizelge 4.1. Doğal Titreşim Periyod Değerleri (Ritz)

Taşıyıcı Sistem Türleri	Mode (1)	Mode (2)	Mode (3)
GTS	1,88888	1,67550	0,85929
ZTS (1)	1,87505	1,66094	0,53859
ZTS (2)	1,88118	1,66657	0,67134
ZTS (3)	1,88382	1,66937	0,82689
ZTS (4)	1,87717	1,66381	0,30037
ZTS (5)	1,87324	1,65926	0,43455
ZTS (6)	1,87694	1,66264	0,59941
ZTS (7)	1,88699	1,67223	0,82833

Yapı mühendisliği faaliyetleri kapsamında kullanılan ve pasif sismik kontrol mekanizmaları olan akışkan viskoz sönümleyicilerin (FVD), çelik-beton kompozit taşıyıcı sistemlerde uygulanabilirliğinin araştırılması, yapı güvenliği, enerji sönüm kapasitesi ve sürdürülebilir mühendislik açısından önemli bir adımdır. Bu kapsamda elde edilen bulgular, yüksek sismik tehlike altındaki bölgelerde güvenli, performans temelli

ve optimize taşıyıcı sistemlerin geliştirilmesine katkı sağlayarak uygulayıcı mühendislik disiplinleri için yol gösterici nitelik taşımaktadır.

4.1. Kat Yer Değiştirme Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bu bölümde, yapı sisteminin doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizleri kapsamında X ve Y doğrultuları bileşkesinde (TH-XY), meydana gelen kat yer değiştirmeleri değerlendirilmiştir. Referans niteliğindeki GTS modeli ile, farklı kat seviyelerinde ve çerçeve bölgelerinde FVD bağlantılarının entegre edilmesiyle oluşturulan ZTS konfigürasyonları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Karşılaştırmalarda yalnızca mutlak yatay yer değiştirme değerleri değil, bu değerlerin yapı boyunca gösterdiği dağılım karakteristikleri de dikkate alınmış; FVD bağlantılarının sayısı, yerleştirdikleri kat seviyeleri ve çerçeve bölgeleri bağlamında sistem davranışı üzerindeki etkileri, analiz sonuç grafiklerine dayalı olarak karşılaştırmalı biçimde değerlendirilmiştir.

GTS modeline ait analiz sonuçları, X ve Y doğrultularındaki yatay kat deplasmanlarının kat yüksekliğine bağlı olarak benzer bir eğilim sergilediğini göstermektedir. Her iki doğrultuda da maksimum deplasman taleplerinin üst kat seviyelerinde meydana geldiği belirlenmiştir. Bu, yapı mühendisliğinde beklenen bir durum olup, yapı yükseklik durumuna bağlı olarak kütle ve rijitlik dağılımıyla doğrudan ilişkilidir. Normal katlarda, taşıyıcı sistemin çelik-beton kompozit yapıya dönüşmesi ve belirli kat seviyelerinde gözlenen rijitlik değişimlerinin etkisiyle deplasmanlar daha dengeli bir dağılım sergilemiştir. Alt katlarda yer alan betonarme taşıyıcı sistem ise sahip olduğu yüksek rijitlik nedeniyle yatay deplasmanları sınırlayıcı bir rol oynamıştır.

Ancak X doğrultusu, dairesel kat planı ve asimetrik taşıyıcı sistem yerleşimi nedeniyle daha büyük deplasman değerlerine maruz kalmış; bu doğrultudaki yatay yer değiştirmeler Y doğrultusuna kıyasla daha yüksek seviyelerde gerçekleşmiştir. Özellikle üst kat seviyelerinde bu fark daha belirgin hale gelmiş; söz konusu plan asimetrisi, X doğrultusundaki deplasman dağılımında görece bir artışa neden olmuştur.

ZTS konfigürasyonlarına ait kat yer değiştirme analiz sonuçları;

➤ **ZTS (1):** X ve Y doğrultularındaki kat deplasmanları benzer eğilimler sergilemiştir. Alt kat seviyelerinde, her iki doğrultuda da sınırlı düzeyde azalmalar gözlemlenmiştir. Orta katlarda da, deplasman miktarlarında azalma eğilimi sürmüş ve eğri profili dengeli bir dağılım göstermeye devam etmiştir. Üst katlara doğru ise sınırlı azalma gözlemlenmiş; bu durum, yapı genelinde özellikle üst katlarda sönümleyici etkinin sınırlı düzeyde gerçekleştiğini göstermektedir. Eğrilerin genel görünümü, sönümleyici sistemlerin özellikle Y doğrultusunda kat deplasmanlarını azaltmada daha etkili olduğunu ve yatay yer değiştirme davranışını dengelemede daha fazla katkı sağladığını göstermektedir.

➤ **ZTS (2):** X ve Y doğrultularındaki kat deplasmanları benzer eğilimler sergilemiştir. Alt kat seviyelerinde, her iki doğrultuda da sınırlı düzeyde azalmalar gözlemlenmiştir. Orta katlarda da deplasman miktarlarında azalma eğilimi sürmüş ve eğri profili dengeli bir dağılım göstermeye devam etmiştir. Üst katlara doğru ise kontrollü bir azalma gözlemlenmiştir; bu durum, sönümleyici etkinin yapı boyunca etkili bir şekilde çalıştığını göstermektedir. Eğrilerin genel görünümü, sönümleyici sistemlerin özellikle X doğrultusunda kat deplasmanlarını azaltmada daha etkili olduğunu ve yatay yer değiştirme davranışını dengelemede daha fazla katkı sağladığını göstermektedir.

➤ **ZTS (3):** X ve Y doğrultularındaki kat deplasmanları benzer eğilimler sergilemiştir. Alt kat seviyelerinde her iki doğrultuda da belirgin düzeyde azalmalar sağlanmıştır. Orta kat seviyelerinde de bu azalma eğilimi devam etmiş, eğri profili bu katlarda dengeli ve sürekli bir dağılım göstermiştir. Üst katlara doğru ise deplasman miktarlarında belirgin bir azalma gözlemlenmiştir; bu durum, yapı genelinde daha dengeli ve kararlı bir yatay yer değiştirme davranışının oluştuğunu göstermektedir. Eğrilerin genel görünümü, sönümleyici sistemlerin her iki doğrultuda da kat deplasmanlarını azaltmada etkili olduğunu ve önemli derecede katkılar sağladığını göstermektedir.

➤ **ZTS (4):** X ve Y doğrultularındaki kat deplasmanları benzer eğilimler sergilemiştir. Alt kat seviyelerinde her iki doğrultuda da belirgin düzeyde azalmalar sağlanmıştır. Orta kat seviyelerinde de bu azalma eğilimi devam etmiş, eğri profili bu

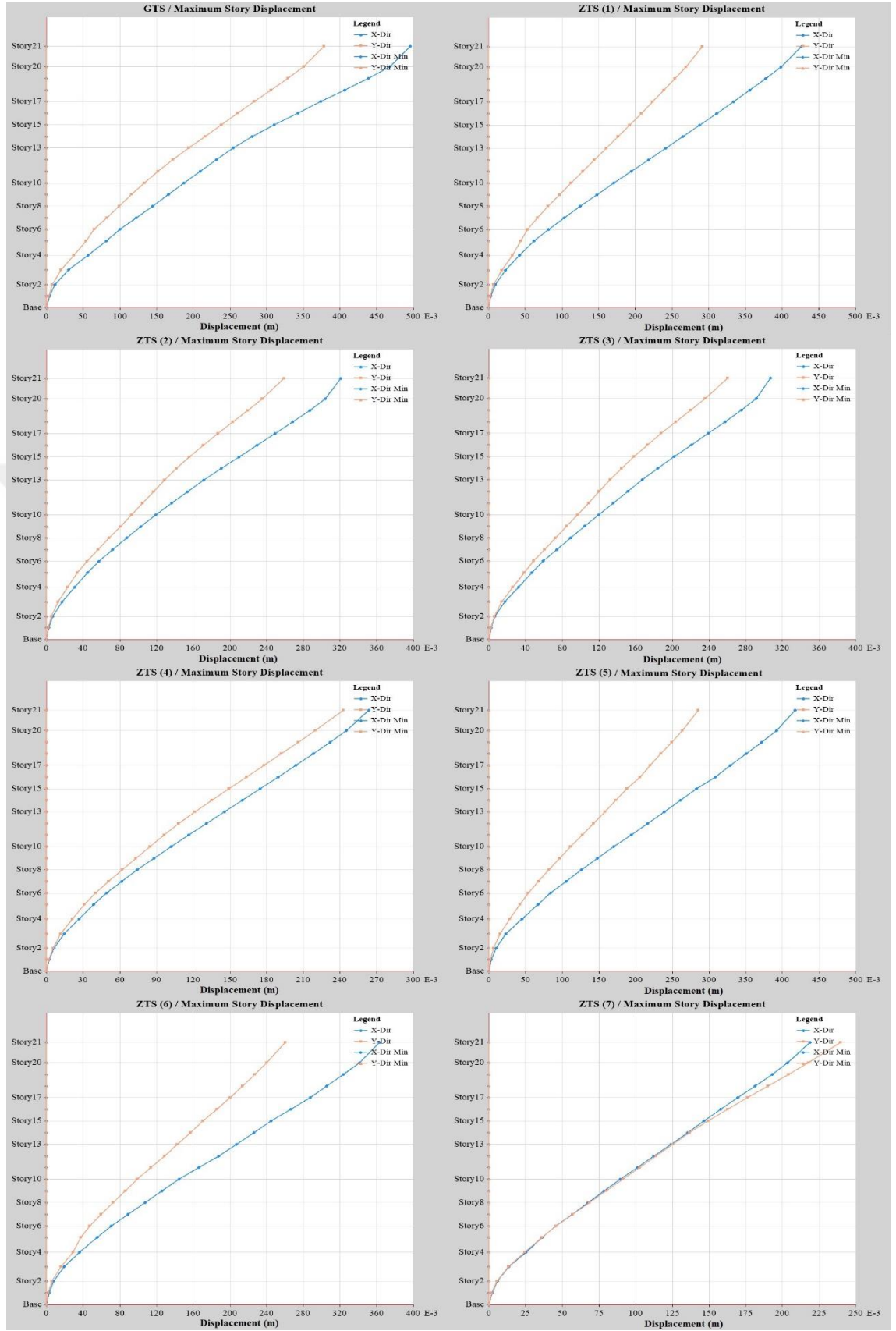
katlarda dengeli ve sürekli bir dağılım göstermiştir. Üst katlara doğru ise deplasman miktarlarında belirgin bir azalma gözlemlenmiştir; bu durum, yapı genelinde daha dengeli ve kararlı bir yatay yer değiştirme davranışının oluştuğunu göstermektedir. Eğrilerin genel görünümü, sönümleyici sistemlerin her iki doğrultuda da kat deplasmanlarını azaltmada etkili olduğunu ve önemli derecede katkılar sağladığını göstermektedir.

➤ **ZTS (5):** X ve Y doğrultularındaki kat deplasmanları benzer eğilimler sergilemiştir. Alt kat seviyelerinde her iki doğrultuda da sınırlı düzeyde azalmalar sağlanmıştır. Orta kat seviyelerinde de bu azalma eğilimi devam etmiş, eğri profili bu katlarda dengeli ve sürekli bir dağılım göstermiştir. Üst katlara doğru ise deplasman miktarlarında sınırlı bir azalma gözlemlenmiştir; bu durum, yapı genelinde daha dengeli ve kararlı bir yatay yer değiştirme davranışının oluştuğunu göstermektedir. Eğrilerin genel görünümü, sönümleyici sistemlerin özellikle Y doğrultusunda kat deplasmanlarını azaltmada daha etkili olduğunu ve yatay yer değiştirme davranışını dengelemede daha fazla katkı sağladığını göstermektedir.

➤ **ZTS (6):** X ve Y doğrultularındaki kat deplasmanları benzer eğilimler sergilemiştir. Alt kat seviyelerinde her iki doğrultuda da belirgin düzeyde azalmalar sağlanmıştır. Orta kat seviyelerinde de bu azalma eğilimi devam etmiş, eğri profili bu katlarda dengeli ve sürekli bir dağılım göstermiştir. Üst katlara doğru ise deplasman miktarlarında belirgin bir azalma gözlemlenmiştir; bu durum, yapı genelinde daha dengeli ve kararlı bir yatay yer değiştirme davranışının oluştuğunu göstermektedir. Eğrilerin genel görünümü, sönümleyici sistemlerin her iki doğrultuda da kat deplasmanlarını azaltmada etkili olduğunu ve önemli derecede katkılar sağladığını göstermektedir.

➤ **ZTS (7):** X ve Y doğrultularındaki kat deplasmanları benzer eğilimler sergilemiştir. Alt kat seviyelerinde her iki doğrultuda da belirgin düzeyde azalmalar sağlanmıştır. Orta kat seviyelerinde de bu azalma eğilimi devam etmiş, eğri profili bu katlarda dengeli ve sürekli bir dağılım göstermiştir. Üst katlara doğru ise deplasman miktarlarında belirgin bir azalma gözlemlenmiştir; bu durum, yapı genelinde daha dengeli ve kararlı bir yatay yer değiştirme davranışının oluştuğunu göstermektedir. Eğriler, sönümleyici sistemlerin özellikle X doğrultusunda kat deplasmanlarını azaltmada ve yatay yer değiştirme davranışını dengelemede daha etkili olduğunu göstermektedir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



Şekil 4.5. Kat Yer Değiştirmeleri Analiz Sonuç Grafikleri (TH-XY)

Sonuç olarak, FVD elemanlarının yalnızca taşıyıcı sisteme eklenmesi değil, aynı zamanda hangi kat seviyelerine ve çerçeve bölgelerine yerleştirildiklerinin de yapıdaki kat deplasmanları üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğu değerlendirilmiştir. Katlar boyunca meydana gelen rijitlik geçişleri, podyum-normal kat ayrımları ve yapısal süreksizliklerle birlikte ele alındığında, FVD yerleşim stratejisinin yatay deplasman davranışını doğrudan etkilediği görülmektedir. Bu bağlamda; yapılan analizlerde sırasıyla ZTS (6), ZTS (5) ve ZTS (1) varyantlarının kat yer değiştirmelerinin kontrolü açısından en başarılı performansı gösteren konfigürasyonlar olduğu belirlenmiştir.

4.2. Göreli Kat Ötelemeleri Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bu bölümde, yapı sisteminin doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizleri kapsamında X ve Y doğrultuları bileşkesinde (TH-XY), meydana gelen göreli kat ötelemeleri değerlendirilmiştir. Referans niteliğindeki GTS modeli ile, farklı kat seviyelerinde ve çerçeve bölgelerinde FVD bağlantılarının entegre edilmesiyle oluşturulan ZTS konfigürasyonları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Karşılaştırmalarda yalnızca göreli kat ötelemesi değerleri değil, bu değerlerin katlar boyunca gösterdiği dağılım biçimleri de dikkate alınmış; FVD bağlantılarının sayısı, yerleştirildikleri kat seviyeleri ve çerçeve bölgeleri bağlamında sistem davranışı üzerindeki etkileri, analiz sonuç grafiklerine dayalı olarak karşılaştırmalı biçimde değerlendirilmiştir.

GTS modeline ait analiz sonuçları, X ve Y doğrultularındaki göreli kat ötelemelerinin genel olarak benzer bir eğilim sergilediğini göstermektedir. Her iki doğrultuda da maksimum göreli kat ötelemesi taleplerinin orta kat seviyelerinde oluştuğu belirlenmiş olup, bu durum yapı mühendisliğinde beklenen bir davranış olarak değerlendirilmekte; yapı yükseklik durumuna bağlı olarak kütle ve rijitlik dağılımıyla doğrudan ilişkilendirilmektedir. Normal katlarda, taşıyıcı sistemin çelik-beton kompozit yapıya dönüşmesi ve belirli kat seviyelerinde meydana gelen rijitlik değişimlerinin etkisiyle, göreli kat ötelemeleri her iki doğrultuda da daha dengeli bir eğilim göstermiştir. Bununla birlikte, fonksiyonel kat bölge geçişlerinde rijitlik farklılıklarına bağlı olarak yerel artışlar gözlemlenmiştir.

Ancak X doğrultusu, plan düzlemindeki asimetrik taşıyıcı sistem yerleşimi nedeniyle daha büyük görelî kat ötelemesi taleplerine maruz kalmış, bu durum görelî kat ötelemelerinin Y doğrultusuna kıyasla daha yüksek ve daha dengesiz bir dağılım sergilemesine neden olmuştur. Özellikle orta kat seviyelerinde ve fonksiyonel geçiş bölgelerinde bu etki, X doğrultusundaki görelî kat ötelemesi dağılımında görelî bir artışa neden olmuştur.

ZTS konfigürasyonlarına ait görelî kat ötelemeleri analiz sonuçları;

➤ **ZTS (1):** X ve Y doğrultularındaki görelî kat ötelemeleri benzer eğilimler sergilemiştir. Alt kat seviyelerinde her iki doğrultuda da sınırlı düzeyde azalmalar gözlemlenmiştir. Orta kat seviyelerinde bu azalma eğilimi devam etmiş, eğri profili bu bölgelerde dengeli bir dağılım göstermiştir. Üst katlara doğru ise görelî kat ötelemeleri daha düzenli hâle gelmiş ve azaltıcı etkinin belirgin düzeyde olduğu anlaşılmıştır. Eğrilerin genel görünümü, sönümleyici sistemlerin özellikle Y doğrultusunda görelî kat ötelemelerini azaltmada daha etkili olduğunu ve yatay yer değiştirme davranışını kontrol etmede sınırlı düzeyde katkılar sağladığını göstermektedir.

➤ **ZTS (2):** X ve Y doğrultularındaki görelî kat ötelemeleri benzer eğilimler sergilemiştir. Alt kat seviyelerinde her iki doğrultuda da sınırlı düzeyde azalmalar gözlemlenmiştir. Orta kat seviyelerinde bu azalma eğilimi daha belirgin hâle gelmiş, eğri profili bu bölgelerde dengeli ve kontrollü bir dağılım göstermiştir. Üst katlara doğru ise görelî kat ötelemelerinde azaltıcı etkinin daha net hissedildiği gözlemlenmiştir. Eğrilerin genel görünümü, sönümleyici sistemlerin özellikle X doğrultusunda görelî kat ötelemelerini azaltmada daha etkili olduğunu ve yatay yer değiştirme davranışını dengelemede önemli derecede katkılar sağladığını göstermektedir.

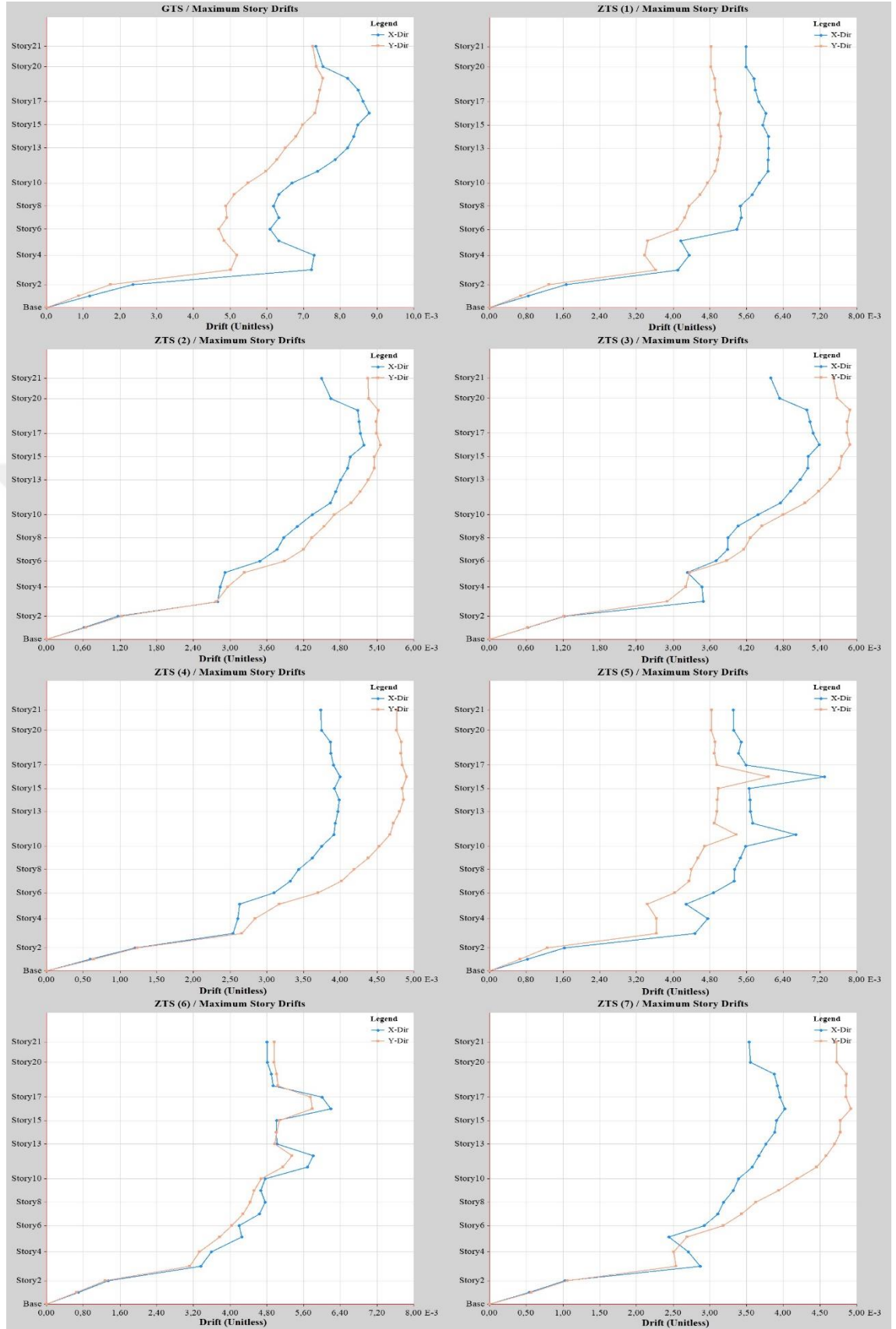
➤ **ZTS (3):** X ve Y doğrultularındaki görelî kat ötelemeleri benzer eğilimler sergilemiştir. Alt kat seviyelerinde her iki doğrultuda da sınırlı düzeyde azalmalar gözlemlenmiştir. Orta kat seviyelerinde bu azalma eğilimi istikrarlı biçimde devam etmiş, eğri profili bu katlarda dengeli ve kontrollü bir dağılım göstermiştir. Üst katlara doğru ise görelî kat ötelemelerinde azaltıcı etkinin sınırlı düzeyde hissedildiği gözlemlenmiştir. Eğrilerin genel görünümü, sönümleyici sistemlerin her iki doğrultuda görelî kat

ötelemelerini azaltmada sınırlı düzeyde etkili olduğunu ve yatay yer değiştirme davranışını dengelemede sınırlı düzeyde katkılar sağladığını göstermektedir.

➤ **ZTS (4):** X ve Y doğrultularındaki görelî kat ötelemeleri benzer eğilimler sergilemiştir. Alt kat seviyelerinde her iki doğrultuda da belirgin düzeyde azalmalar gözlemlenmiştir. Orta kat seviyelerinde bu azalma eğilimi istikrarlı biçimde devam etmiş, eğri profili bu katlarda dengeli ve kontrollü bir dağılım göstermiştir. Üst katlara doğru ise görelî kat ötelemelerinde azaltıcı etkinin belirgin hâle geldiği gözlemlenmiştir. Eğrilerin genel görünümü, sönümleyici sistemlerin her iki doğrultuda görelî kat ötelemelerini azaltmada belirgin düzeyde etkili olduğunu ve yatay yer değiştirme davranışını dengelemede önemli düzeyde katkılar sağladığını göstermektedir.

➤ **ZTS (5):** X ve Y doğrultularındaki görelî kat ötelemeleri benzer eğilimler sergilemiştir. Alt kat seviyelerinde her iki doğrultuda da sınırlı düzeyde azalmalar gözlemlenmiştir. Orta kat seviyelerinde bu azalma eğilimi devam etmiş, eğri profili bu bölgelerde daha dengeli bir dağılım göstermiştir. Orta kat seviyelerinde gözlemlenen yerel dalgalanmalar, bu bölgelerde uygulanan rijitlik değişimlerinden kaynaklanmakta olup; benzer durum, fonksiyonel kat geçiş bölgelerinde de yapının düşey doğrultudaki ani rijitlik farklılıklarından kaynaklanmaktadır. Üst katlara doğru ise görelî kat ötelemelerindeki azalma eğilimi devam etmiş, ancak azaltıcı etkinin sınırlı kaldığı anlaşılmıştır. Eğrilerin genel görünümü, sönümleyici sistemlerin özellikle Y doğrultusunda görelî kat ötelemelerini azaltmada daha etkili olduğunu ve yatay yer değiştirme davranışını kontrol etmede sınırlı düzeyde katkılar sağladığını göstermektedir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



Şekil 4.6. Görelî Kat Ötelemeleri Analiz Sonuç Grafikleri (TH-XY)

➤ **ZTS (6):** X ve Y doğrultularındaki görelî kat ötelemeleri benzer eğilimler sergilemiştir. Alt kat seviyelerinde her iki doğrultuda da belirgin düzeyde azalmalar gözlemlenmiştir. Orta kat seviyelerinde bu azalma eğilimi devam etmiş, eğri profili bu bölgelerde dengeli bir dağılım göstermiştir. Orta kat seviyelerinde gözlemlenen yerel dalgalanmalar, bu bölgelerde uygulanan rijitlik değişimlerinden kaynaklanmakta olup; benzer durum, fonksiyonel kat geçiş bölgelerinde de yapının düşey doğrultudaki ani rijitlik farklılıklarından kaynaklanmaktadır. Üst katlara doğru ise görelî kat ötelemelerinde azaltıcı etkinin belirgin hâle geldiği gözlemlenmiştir. Eğrilerin genel görünümü, sönümleyici sistemlerin her iki doğrultuda görelî kat ötelemelerini azaltmada belirgin düzeyde etkili olduğunu ve yatay yer değiştirme davranışını dengelemede önemli derecede katkılar sağladığını göstermektedir.

➤ **ZTS (7):** X ve Y doğrultularındaki görelî kat ötelemeleri benzer eğilimler sergilemiştir. Alt kat seviyelerinde her iki doğrultuda da belirgin düzeyde azalmalar gözlemlenmiştir. Orta kat seviyelerinde bu azalma eğilimi istikrarlı biçimde devam etmiş, eğri profili bu katlarda dengeli ve kontrollü bir dağılım göstermiştir. Üst katlara doğru ise görelî kat ötelemelerinde azaltıcı etkinin belirgin hâle geldiği gözlemlenmiştir. Eğrilerin genel görünümü, sönümleyici sistemlerin her iki doğrultuda görelî kat ötelemelerini azaltmada belirgin düzeyde etkili olduğunu ve yatay yer değiştirme davranışını dengelemede önemli düzeyde katkılar sağladığını göstermektedir.

Sonuç olarak, FVD elemanlarının yalnızca taşıyıcı sisteme entegre edilmesi değil, aynı zamanda hangi kat seviyelerine ve yapısal bölgelere yerleştirildiklerinin de görelî kat ötelemeleri üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Katlar boyunca rijitlik değişimleri, podyum-normal kat geçişleri ve kolon kesiti süreksizlikleri ile birlikte değerlendirildiğinde, FVD yerleşim stratejisinin kat düzeyindeki deplasman değerlerini doğrudan etkilediği görülmektedir. Bu bağlamda, yapılan analizlerde sırasıyla ZTS (6), ZTS (5) ve ZTS (1) varyantlarının yatay deplasman kontrolü açısından en başarılı konfigürasyonlar olduğu belirlenmiştir.

4.3. Kat Kesme Kuvvetleri Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bu bölümde, yapı sisteminin doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizleri kapsamında X ve Y doğrultuları bileşkesinde (TH-XY), meydana gelen kat kesme kuvvetleri değerlendirilmiştir. Referans niteliğindeki GTS modeli ile, farklı kat seviyelerinde ve çerçeve bölgelerinde FVD bağlantılarının entegre edilmesiyle oluşturulan ZTS konfigürasyonları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Karşılaştırmalarda yalnızca toplam taban kesme kuvveti değerleri değil, bu kuvvetlerin katlar boyunca gösterdiği dağılım biçimleri de dikkate alınmış; FVD bağlantılarının sayısı, yerleştirildikleri kat seviyeleri ve çerçeve bölgeleri bağlamında sistem davranışı üzerindeki etkileri, analiz sonuç grafiklerine dayalı olarak karşılaştırmalı biçimde değerlendirilmiştir.

GTS modeline ait analiz sonuçları, X ve Y doğrultularındaki kat kesme kuvvetlerinin, kat yüksekliği boyunca benzer eğilimli ancak büyüklük açısından farklılık gösteren bir dağılım sergilediğini göstermektedir. Her iki doğrultuda da kesme kuvvetleri yapı tabanında maksimum değerlere ulaşmakta; katlar yükseldikçe ise düzenli bir azalma göstermektedir. Bu durum, deprem yüklerinin tabandan üst katlara doğru azalması prensibiyle uyumludur. Taşıyıcı sistemin normal katlarda çelik-beton kompozit yapıya dönüşmesi ve belirli kat seviyelerinde meydana gelen rijitlik değişimleri, yük aktarımında dengeli bir davranışın oluşmasına katkı sağlamıştır. Kesme kuvveti eğrilerinin düzgün ve sürekli formu, sistemin her iki doğrultuda da rijitlik ve süreklilik bakımından tutarlı davrandığını göstermektedir. Katlar boyunca yük aktarımı sırasında kesme kuvvetlerinin dengeli bir dağılım sergilediği ve ani sıçramaların gözlemlenmediği belirlenmiştir.

Ancak X doğrultusunda, özellikle orta ve alt kat seviyelerinde kesme kuvveti büyüklüklerinin Y doğrultusuna kıyasla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu fark, plan düzlemindeki asimetrik taşıyıcı sistem yerleşimi ve çekirdek perdenin X yönünde daha fazla yük alacak şekilde konumlandırılmasıyla ilişkilidir. Bu durum, X yönünde daha geniş eğrilerin oluşmasına ve yatay yük aktarımında daha fazla iç kuvvetin gelişmesine neden olmuş; böylece X doğrultusunda daha baskın bir sismik tepki meydana gelmiştir.

ZTS konfigürasyonlarına ait kat kesme kuvvetleri analiz sonuçları;

➤ **ZTS (1):** X ve Y doğrultularındaki kat kesme kuvvetleri benzer eğilimler sergilemiştir. Ancak X doğrultusunda, özellikle alt ve orta kat seviyelerinde kesme kuvvetlerinde sınırlı düzeyde azalma sağlanmış, kuvvet dağılımı düşey doğrultuda dengeli bir biçimde üst katlara kadar istikrarlı şekilde devam etmiştir. Y doğrultusunda ise kesme kuvveti değerlerinde hem alt hem de üst katlarda daha belirgin azalmalar sağlanmıştır. Bu durum, sönümleyici sistemlerin Y yönünde daha etkin çalıştığını ve bu doğrultudaki kesme kuvveti etkilerini azaltmada daha verimli bir performans sağladığını göstermektedir.

➤ **ZTS (2):** X ve Y doğrultularındaki kat kesme kuvvetleri benzer eğilimler sergilemiştir. X doğrultusunda, özellikle alt ve orta kat seviyelerinde kesme kuvvetlerinde belirgin azalmalar sağlanmış, kuvvet dağılımı düşey doğrultuda düzenli bir biçimde üst katlara kadar devam etmiştir. Y doğrultusunda ise kesme kuvvetlerinde daha sınırlı azalmalar gözlemlenmiş, özellikle orta kat seviyelerinde daha dengeli bir dağılım göstermiştir. Bu durum, sönümleyici sistemlerin her iki doğrultuda farklı etkiler oluşturduğunu ve özellikle X yönünde kesme kuvvetlerinin azaltılması ve kontrol altına alınmasında daha etkin rol oynadığını göstermektedir.

➤ **ZTS (3):** X ve Y doğrultularındaki kat kesme kuvvetleri benzer eğilimler sergilemiştir. Her iki doğrultuda da, özellikle alt ve orta kat seviyelerinde kesme kuvvetlerinde belirgin azalmalar sağlanmış, kuvvet dağılımlarındaki azalma düşey doğrultuda düzenli bir biçimde üst katlara kadar devam etmiştir. Azalma eğilimlerinin paralel seyretmesi, sönümleyici sistemlerin iki doğrultuda da dengeli bir performans gösterdiğini ve yatay yüklerin her iki yönde benzer düzeyde kontrol altına alındığını göstermektedir. Bu durum, sistemin genel sismik yük aktarımı açısından daha tutarlı ve kararlı bir davranış sergilediğini işaret etmektedir.

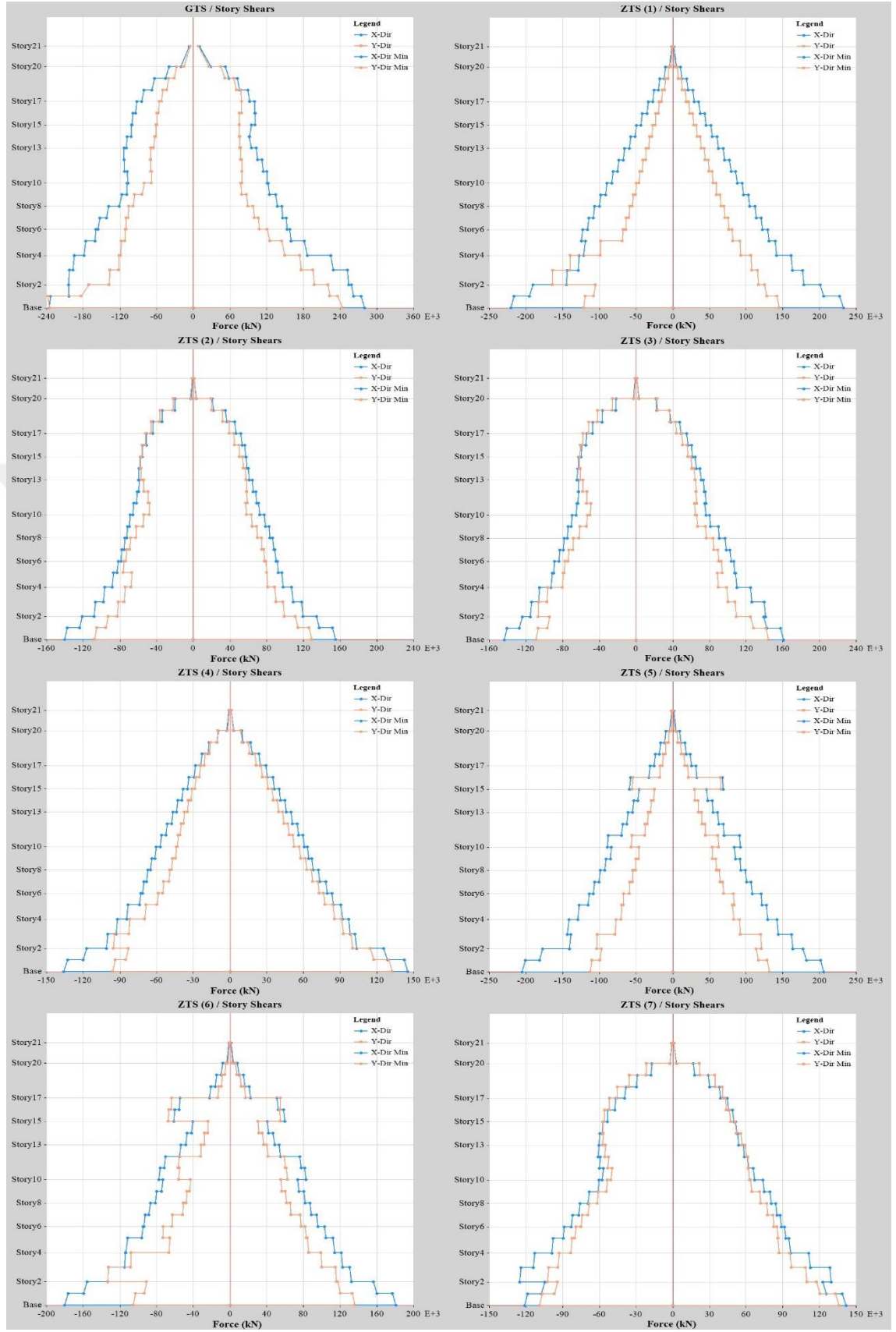
➤ **ZTS (4):** X ve Y doğrultularındaki kat kesme kuvvetleri benzer eğilimler sergilemiştir. Her iki doğrultuda da, özellikle alt ve orta kat seviyelerinde kesme kuvvetlerinde belirgin azalmalar sağlanmış, kuvvet dağılımlarındaki azalma düşey doğrultuda düzenli bir biçimde üst katlara kadar devam etmiştir. Azalma eğilimlerinin

paralel seyretmesi, sönümleyici sistemlerin iki doğrultuda da dengeli bir performans gösterdiğini ve yatay yüklerin her iki yönde benzer düzeyde kontrol altına alındığını göstermektedir. Bu durum, sistemin genel sismik yük aktarımı açısından tutarlı ve kararlı bir davranış sergilediğini işaret etmektedir.

➤ **ZTS (5):** X ve Y doğrultularındaki kat kesme kuvvetleri benzer eğilimler sergilemiştir. Her iki doğrultuda da, özellikle orta ve üst kat seviyelerinde kesme kuvvetlerinde sınırlı azalmalar sağlanmış, kuvvet dağılımlarındaki azalma düşey doğrultuda düzenli bir biçimde üst katlara kadar devam etmiştir. Orta katlarda gözlemlenen yerel dalgalanmalar, bu seviyelerde uygulanan rijitlik değişimlerinden kaynaklanmakta olup; benzer durum, fonksiyonel kat geçiş bölgelerinde de yapının düşey doğrultudaki ani rijitlik değişimlerinden kaynaklanmaktadır. Azalma eğilimlerinin paralel seyretmesi, sönümleyici sistemlerin iki doğrultuda da dengeli bir performans sergilediğini ve yatay yüklerin her iki yönde benzer düzeyde sınırlandırıldığını göstermektedir.

➤ **ZTS (6):** X ve Y doğrultularındaki kat kesme kuvvetleri benzer eğilimler sergilemiştir. Her iki doğrultuda da, özellikle orta ve üst kat seviyelerinde kesme kuvvetlerinde belirgin azalmalar sağlanmış, kuvvet dağılımlarındaki azalma düşey doğrultuda düzenli bir biçimde üst katlara kadar devam etmiştir. Orta kat seviyelerinde her iki doğrultuda gözlemlenen yerel dalgalanmalar, bu seviyelerde uygulanan rijitlik değişimlerinden kaynaklanmakta olup; benzer durum, fonksiyonel kat geçiş bölgelerinde de yapının düşey doğrultudaki ani rijitlik değişimlerinden kaynaklanmaktadır. Azalma eğilimlerinin paralel seyretmesi, sönümleyici sistemlerin iki doğrultuda da dengeli bir performans sergilediğini ve yatay yüklerin her iki yönde benzer düzeyde sınırlandırıldığını göstermektedir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



Şekil 4.7. Kat Kesme Kuvvetleri Analiz Sonuç Grafikleri (TH-XY)

➤ **ZTS (7):** X ve Y doğrultularındaki kat kesme kuvvetleri benzer eğilimler sergilemiştir. Her iki doğrultuda da, özellikle tüm kat seviyelerinde kesme kuvvetlerinde belirgin azalmalar sağlanmış; kuvvet dağılımlarındaki azalma düşey doğrultuda düzenli bir biçimde üst katlara kadar devam etmiştir. Orta kat seviyelerinde gözlemlenen dengeli kuvvet profili, bu bölgelerde uygulanan rijitlik değişimlerinin etkili biçimde dengelendiğini göstermektedir. Fonksiyonel kat geçiş bölgelerinde ise yapının düşey doğrultudaki ani rijitlik değişimleri dikkatli bir şekilde kontrol altına alınmış; bu da sistem genelinde dengeli bir yük aktarım profiline katkı sağlamıştır. Azalma eğilimlerinin istikrarlı biçimde ilerlemesi, sönümleyici sistemlerin her iki doğrultuda da tutarlı bir performans sergilediğini ve yatay yüklerin etkili biçimde sınırlandırıldığını göstermektedir.

Sonuç olarak, FVD elemanlarının yalnızca taşıyıcı sisteme entegre edilmesi değil, aynı zamanda hangi kat seviyelerine ve yapısal bölgelere yerleştirildiklerinin de kesme kuvveti dağılımı üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Katlar boyunca rijitlik değişimleri, podyum-normal kat geçişleri ve kolon kesiti süreksizlikleri ile birlikte değerlendirildiğinde, FVD yerleşim stratejisinin kesme kuvvetlerinin katlar boyunca dengeli aktarılmasında doğrudan etkili olduğu görülmektedir. Bu bağlamda, yapılan analizlerde sırasıyla ZTS (6), ZTS (5) ve ZTS (1) varyantlarının kesme kuvveti kontrolü açısından en başarılı konfigürasyonlar olduğu belirlenmiştir.

4.4. Kat Moment Kuvvetleri Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bu bölümde, yapı sisteminin doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizleri kapsamında X ve Y doğrultuları bileşkesinde (TH-XY), meydana gelen kat moment kuvvetleri değerlendirilmiştir. Referans niteliğindeki GTS modeli ile, farklı kat seviyelerinde ve çerçeve bölgelerinde FVD bağlantılarının entegre edilmesiyle oluşturulan ZTS konfigürasyonları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Karşılaştırmalarda yalnızca maksimum moment değerleri değil, bu momentlerin katlar boyunca gösterdiği dağılım karakteristikleri de dikkate alınmış; FVD bağlantılarının sayısı, yerleştirildikleri kat seviyeleri ve çerçeve bölgeleri bağlamında sistem davranışı üzerindeki etkileri analiz sonuç grafiklerine dayalı olarak karşılaştırmalı biçimde değerlendirilmiştir.

GTS modeline ait analiz sonuçları, X ve Y doğrultularındaki kat moment kuvvetlerinin kat yüksekliği boyunca benzer eğilimler sergilediğini, ancak büyüklük açısından anlamlı farklılıklar oluşturduğunu göstermektedir. Her iki doğrultuda da moment kuvvetleri, yapı tabanına yakın seviyelerde maksimum değerlere ulaşmakta; katlar yükseldikçe ise bu kuvvetlerde belirgin bir azalma gözlemlenmektedir. Bu durum, deprem etkisi altındaki moment miktarlarının alt katlarda yoğunlaştığını ve üst katlara doğru enerji aktarımının azaldığını göstermektedir. Bu dağılım, taşıyıcı sistemin sismik yük aktarımına verdiği tepki açısından tutarlı bir davranış sergilediğini göstermektedir. Eğrilerin genel görünümü incelendiğinde, Y doğrultusundaki moment miktarlarının X doğrultusuna kıyasla daha yüksek seviyelere ulaştığı ve özellikle alt ve orta katlarda daha yoğunlaştığı gözlemlenmektedir. Bu durum, taşıyıcı sistemin Y yönünde daha yüksek moment miktarlarına maruz kaldığını ve bu doğrultuda yapı elemanlarının daha fazla iç kuvvet taşıdığını göstermektedir. X doğrultusunda ise moment kuvvetleri daha dengeli bir dağılım sergilemekte ve düşey doğrultuda daha dar bir aralıkta kalmaktadır. Bu farklılık, taşıyıcı sistemin plan düzlemindeki yerleşimi ve rijitlik organizasyonunun iki doğrultuda farklı biçimlerde yapılandırıldığını göstermektedir.

Moment eğrilerinin düzgün ve sürekli formu, taşıyıcı sistemin her iki doğrultuda da rijitlik ve süreklilik bakımından istikrarlı bir davranış sergilediğini göstermektedir. Katlar boyunca yük aktarımı sırasında moment kuvvetlerinin dengeli şekilde dağıldığı ve ani değişimlerin oluşmadığı gözlemlenmiştir. Bu durum, sistemin genel sismik performansı açısından güvenilir bir moment aktarım kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir.

Normal katlarda, taşıyıcı sistemin çelik-beton kompozit yapıya dönüşmesiyle birlikte belirli kat seviyelerinde meydana gelen rijitlik değişimlerinin etkisiyle moment kuvvetlerinin yapı boyunca daha dengeli dağıldığı gözlemlenmiştir. Alt katlardaki betonarme sistem, yüksek rijitliği sayesinde iç kuvvetleri sınırlayıcı bir rol üstlenmiş; üst katlardaki sünek kompozit sistem ise momentlerin düzenli aktarımını desteklemiştir. Taşıyıcı sistemin düşey doğrultudaki rijitlik uyumu sayesinde moment kuvvetleri ani değişimler olmaksızın katlar boyunca süreklilik göstermiştir. Ayrıca, fonksiyonel kat geçiş bölgelerinde yapısal süreksizlik kaynaklı belirgin bir düzensizlik oluşmamıştır.

ZTS konfigürasyonlarına ait kat moment kuvvetleri analiz sonuçları;

➤ **ZTS (1):** X ve Y doğrultularındaki kat moment kuvvetleri benzer eğilimler sergilemiştir. Her iki doğrultuda da, özellikle alt ve orta kat seviyelerinde moment kuvvetlerinde sınırlı düzeyde azalmalar sağlanmış; moment dağılımları düşey doğrultuda dengeli bir biçimde üst katlara kadar devam etmiştir. Bu durum, sönümleyici sistemin her iki yönde de moment kuvvetlerini azaltmada sınırlı düzeyde etkili olduğunu ve moment aktarımının kontrolünde kısıtlı katkı sunduğunu göstermektedir.

➤ **ZTS (2):** X ve Y doğrultularındaki kat moment kuvvetleri benzer eğilimler sergilemiştir. X doğrultusunda, özellikle alt ve orta kat seviyelerinde moment kuvvetlerinde sınırlı düzeyde azalmalar sağlanmış; moment dağılımı düşey doğrultuda dengeli bir biçimde üst katlara kadar devam etmiştir. Y doğrultusunda ise moment kuvveti değerlerinde hem alt hem de üst katlarda daha belirgin azalmalar gözlemlenmiştir. Bu durum, sönümleyici sistemlerin Y yönünde daha etkin çalıştığını ve bu doğrultudaki moment kuvveti etkilerini azaltmada daha verimli bir performans sağladığını göstermektedir.

➤ **ZTS (3):** X ve Y doğrultularındaki kat moment kuvvetleri benzer eğilimler sergilemiştir. X doğrultusunda, özellikle alt ve orta kat seviyelerinde moment kuvvetlerinde sınırlı düzeyde azalmalar sağlanmış; dağılım üst katlara doğru dengeli bir biçimde devam etmiştir. Y doğrultusunda ise moment kuvvetlerinde daha belirgin düzeyde azalmalar gözlemlenmiş, özellikle orta kat seviyelerinde düşey doğrultuda düzenli bir yayılım göstermiştir. Bu durum, sönümleyici sistemin özellikle Y yönünde moment kuvvetlerini azaltmada daha etkili çalıştığını ve yatay yük aktarımını bu doğrultuda daha verimli şekilde sınırlandırdığını göstermektedir.

➤ **ZTS (4):** X ve Y doğrultularındaki kat moment kuvvetleri benzer eğilimler sergilemiştir. Her iki doğrultuda da, özellikle alt ve orta kat seviyelerinde moment kuvvetlerinde belirgin düzeyde azalmalar sağlanmış; moment dağılımları üst katlara kadar dengeli bir biçimde devam etmiştir. Bu durum, sönümleyici sistemin hem X hem de Y yönlerinde moment kuvvetlerini azaltmada etkili bir performans gösterdiğini ve yatay yük aktarımını iki doğrultuda da daha güvenli hâle getirdiğini göstermektedir.

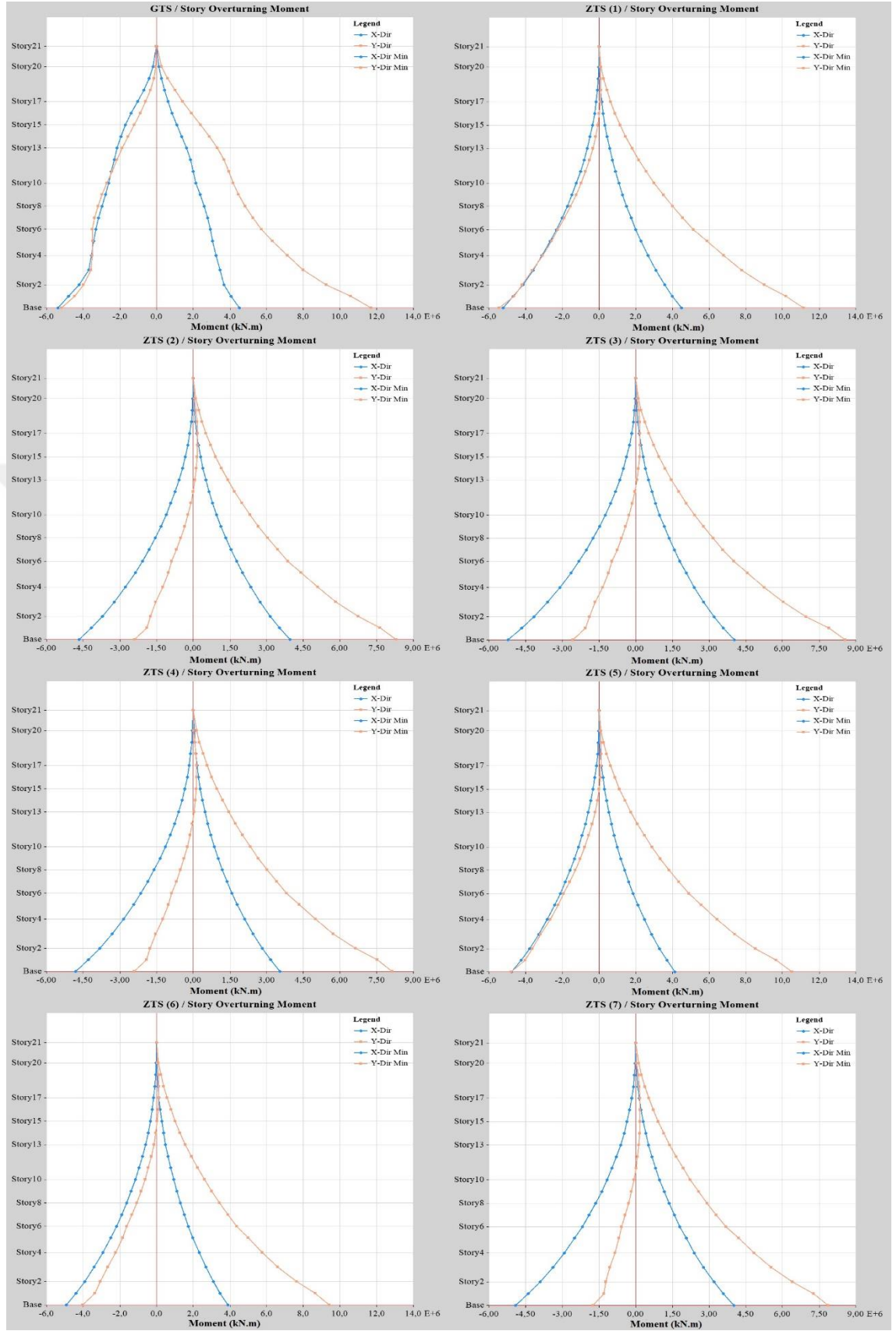
➤ **ZTS (5):** X ve Y doğrultularındaki kat moment kuvvetleri benzer eğilimler sergilemiştir. Her iki doğrultuda da, özellikle orta ve üst kat seviyelerinde moment kuvvetlerinde sınırlı düzeyde azalmalar gözlemlenmiştir. Moment dağılımları düşey doğrultuda düzenli ve sürekli bir biçimde ilerlemiş, ani değişiklik veya düzensizlik gözlemlenmemiştir. Bu durum, sönümleyici sistemin her iki doğrultuda da moment kuvvetlerini sınırlandırma konusunda sınırlı düzeyde etkili olduğunu ve yatay yük aktarımı açısından kısmi katkılar sağladığını göstermektedir.

➤ **ZTS (6):** X ve Y doğrultularındaki kat moment kuvvetleri benzer eğilimler sergilemiştir. Özellikle alt ve orta kat seviyelerinde her iki doğrultuda da sınırlı düzeyde azalmalar gözlemlenmiştir. Üst kat seviyelerinde ise moment dağılımı düzenli bir biçimde devam etmiş, herhangi bir ani değişiklik ya da yapısal süreksizlik kaynaklı düzensizlik gözlemlenmemiştir. Moment eğrilerinin genel görünümü, sönümleyici sistemin her iki doğrultuda da moment kuvvetlerini sınırlandırmada sınırlı düzeyde etkili olduğunu ve yatay yük aktarımında kısmi katkılar sağladığını göstermektedir.

➤ **ZTS (7):** X ve Y doğrultularındaki kat moment kuvvetleri benzer eğilimler sergilemiştir. Her iki doğrultuda da, özellikle alt ve orta kat seviyelerinde moment kuvvetlerinde belirgin düzeyde azalmalar sağlanmış; moment dağılımları üst katlara kadar dengeli bir biçimde devam etmiştir. Bu durum, sönümleyici sistemin hem X hem de Y yönlerinde moment kuvvetlerini azaltmada etkili bir performans gösterdiğini ve yatay yük aktarımını iki doğrultuda da daha güvenli hâle getirdiğini göstermektedir.

Sonuç olarak, FVD elemanlarının yalnızca taşıyıcı sisteme entegre edilmesi değil, aynı zamanda hangi kat seviyelerine ve yapısal bölgelere yerleştirildiklerinin de moment kuvveti dağılımı üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Katlar boyunca meydana gelen rijitlik geçişleri, podyum-normal kat ayrımları ve kolon kesiti süreksizlikleri ile birlikte değerlendirildiğinde, FVD yerleşim stratejisinin yatay sismik yükler altında oluşan moment taleplerini doğrudan etkilediği görülmektedir. Bu bağlamda, yapılan analizlerde sırasıyla ZTS (6), ZTS (5) ve ZTS (1) varyantlarının moment kuvveti kontrolü açısından en başarılı performansı gösteren konfigürasyonlar olduğu belirlenmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



Şekil 4.8. Kat Moment Kuvvetleri Analiz Sonuç Grafikleri (TH-XY)

4.5. Enerji Sönüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bu bölümde, yapı sisteminin doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizleri kapsamında X ve Y doğrultuları bileşkesinde (TH-XY), meydana gelen enerji sönüm miktarları değerlendirilmiştir. Referans niteliğindeki GTS modeli ile, farklı kat seviyelerine ve çerçeve bölgelerine FVD bağlantılarının entegre edilmesiyle oluşturulan ZTS konfigürasyonları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Karşılaştırmalarda yalnızca maksimum enerji sönüm değerleri değil, aynı zamanda bu değerlerin yapı genelinde gösterdiği dağılım karakteristikleri de dikkate alınmıştır. Bu kapsamda, FVD bağlantılarının sayısı, yerleştirildikleri kat seviyeleri ve konumlandırıldıkları çerçeve bölgelerinin, yapı sisteminin enerji sönüm kapasitesi üzerindeki etkileri analiz sonuç grafiklerine dayalı olarak karşılaştırmalı biçimde değerlendirilmiştir.

Zaman tanım alanı analizleri sonucunda elde edilen veriler, yapı sisteminin sismik yükler altındaki enerji tüketim mekanizmalarını detaylı şekilde göstermektedir. Deprem etkisi altında yapı, öncelikle kinetik ve potansiyel enerji bileşenleri arasında sürekli dönüşüm gerçekleştirmektedir. Kinetik enerji, kütlelerin hızına bağlı hareket enerjisini temsil ederken; potansiyel enerji, elastik deformasyon sonucu yapı elemanlarında depolanan geri çağırıcı enerjiyi ifade etmektedir. Bununla birlikte, yapı sisteminde oluşan toplam titreşim enerjisinin zamanla sönümlenmesi, farklı enerji tüketim mekanizmaları yoluyla gerçekleşmektedir. Bu kapsamda, Global Damping, yapı sistemine genel viskoz sönüm oranı (örneğin, modal damping oranı olarak %2,5) üzerinden tanımlanan ve tüm doğal titreşim modlarında eş zamanlı olarak etkili olan sönümleme enerjisini ifade etmektedir. ETABS analizlerinde global damping; sistemin elastik davranış bölgesinde, doğal titreşim enerjisinin modelde tanımlı oranda azaltılmasını sağlayan temel sönüm kapasitesini temsil etmektedir. Bunun yanı sıra, akışkan viskoz sönümleyicilerin hız bağımlı doğrusal olmayan davranışına bağlı olarak gerçekleşen enerji tüketimi Nonlinear Viscous Damping kapsamında değerlendirilirken; yapısal plastisite ve malzeme histerezisinden kaynaklanan enerji kayıpları ise Nonlinear Hysteretic Damping bileşeni ile ifade edilmektedir. Analiz sırasında oluşan sayısal denge farkları ise Error bileşeni altında hesaplanmıştır.

GTS modeline ait analiz sonuçları, yapı sisteminin sismik enerji tüketim mekanizmalarının genel itibarıyla dengeli ve kararlı bir davranış sergilediğini göstermektedir. Deprem etkisinin başlangıç aşamasında kinetik ve potansiyel enerji bileşenleri arasında belirgin bir dönüşüm gerçekleşmiş; özellikle ilk titreşim anlarında her iki bileşenin de yüksek seviyelere ulaştığı belirlenmiştir. Süreç ilerledikçe, kinetik ve potansiyel enerji bileşenlerinde kademeli bir azalma eğilimi gözlemlenmiş; buna karşılık global damping bileşeni zamanla istikrarlı ve sürekli bir artış göstermiştir.

Modelde herhangi bir pasif sönümleyici sistemin bulunmaması nedeniyle, sismik etkiler sonucu oluşan titreşim enerjisinin tamamı, yapı sistemine tanımlanan global damping kapasitesi aracılığıyla tüketilmiştir. Global damping bileşeni, yapı sisteminin titreşim enerjisini etkin biçimde sönümlemesini sağlamış ve enerji tüketiminin yapı boyunca dengeli bir şekilde dağılmasına olanak tanımıştır.

Bunun yanında, nonlinear viscous damping ve nonlinear hysteretic damping bileşenleri kapsamında da enerji tüketimi meydana gelmemiştir. Bu durum, yapı sisteminde plastikleşme ve histeretik deformasyon oluşmadığını ve sistem davranışının tamamen elastik sınırlar içerisinde gerçekleştiğini göstermektedir.

ZTS konfigürasyonlarına ait enerji sönüm analiz sonuçları;

➤ **ZTS (1):** Nonlinear viscous damping bileşeninin sınırlı düzeyde katkı sağladığı görülmektedir. Kinetik ve potansiyel enerji artışı, deprem hareketinin ilk saniyelerinde hızla yükselmiş; ardından sistem, enerji sönümleme mekanizmaları aracılığıyla dengeye ulaşmıştır. Global damping bileşeni, analiz sürecinin başlangıcında artış göstermiş, sürecin ilerleyen bölümlerinde ise durağan bir seyir izlemiştir. Nonlinear hysteretic damping bileşeninde enerji tüketimi oluşmamıştır. Yapı, hem kendi rijitlik ve kütle özellikleriyle hem de viskoz sönümlemeye dayalı olarak kontrollü ve kararlı bir enerji performansı sergilemiştir.

➤ **ZTS (2):** Nonlinear viscous damping bileşeninin belirgin düzeyde katkı sağladığı görülmektedir. Kinetik ve potansiyel enerji artışı, deprem hareketinin ilk saniyelerinde hızla yükselmiş; ardından sistem, enerji sönümleme mekanizmaları aracılığıyla dengeye

ulaşmıştır. Global damping bileşeni, analiz sürecinin başlangıcında artış göstermiş, sürecin ilerleyen bölümlerinde ise durağan bir seyir izlemiştir. Nonlinear hysteretic damping bileşeninde enerji tüketimi oluşmamıştır. Yapı, hem kendi rijitlik ve kütle özellikleriyle hem de viskoz sönümlmeye dayalı olarak kontrollü ve kararlı bir enerji performansı sergilemiştir.

➤ **ZTS (3):** Nonlinear viscous damping bileşeninin belirgin düzeyde katkı sağladığı görülmektedir. Kinetik ve potansiyel enerji artışı, deprem hareketinin ilk saniyelerinde hızla yükselmiş; ardından sistem, enerji sönümleme mekanizmaları aracılığıyla dengeye ulaşmıştır. Global damping bileşeni, analiz sürecinin başlangıcında artış göstermiş, sürecin ilerleyen bölümlerinde ise durağan bir seyir izlemiştir. Nonlinear hysteretic damping bileşeninde enerji tüketimi oluşmamıştır. Yapı, hem kendi rijitlik ve kütle özellikleriyle hem de viskoz sönümlmeye dayalı olarak kontrollü ve kararlı bir enerji performansı sergilemiştir.

➤ **ZTS (4):** Nonlinear viscous damping bileşeninin belirgin düzeyde katkı sağladığı görülmektedir. Kinetik ve potansiyel enerji artışı, deprem hareketinin ilk saniyelerinde hızla yükselmiş; ardından sistem, enerji sönümleme mekanizmaları aracılığıyla dengeye ulaşmıştır. Global damping bileşeni, analiz sürecinin başlangıcında artış göstermiş, sürecin ilerleyen bölümlerinde ise durağan bir seyir izlemiştir. Nonlinear hysteretic damping bileşeninde enerji tüketimi oluşmamıştır. Yapı, hem kendi rijitlik ve kütle özellikleriyle hem de viskoz sönümlmeye dayalı olarak kontrollü ve kararlı bir enerji performansı sergilemiştir.

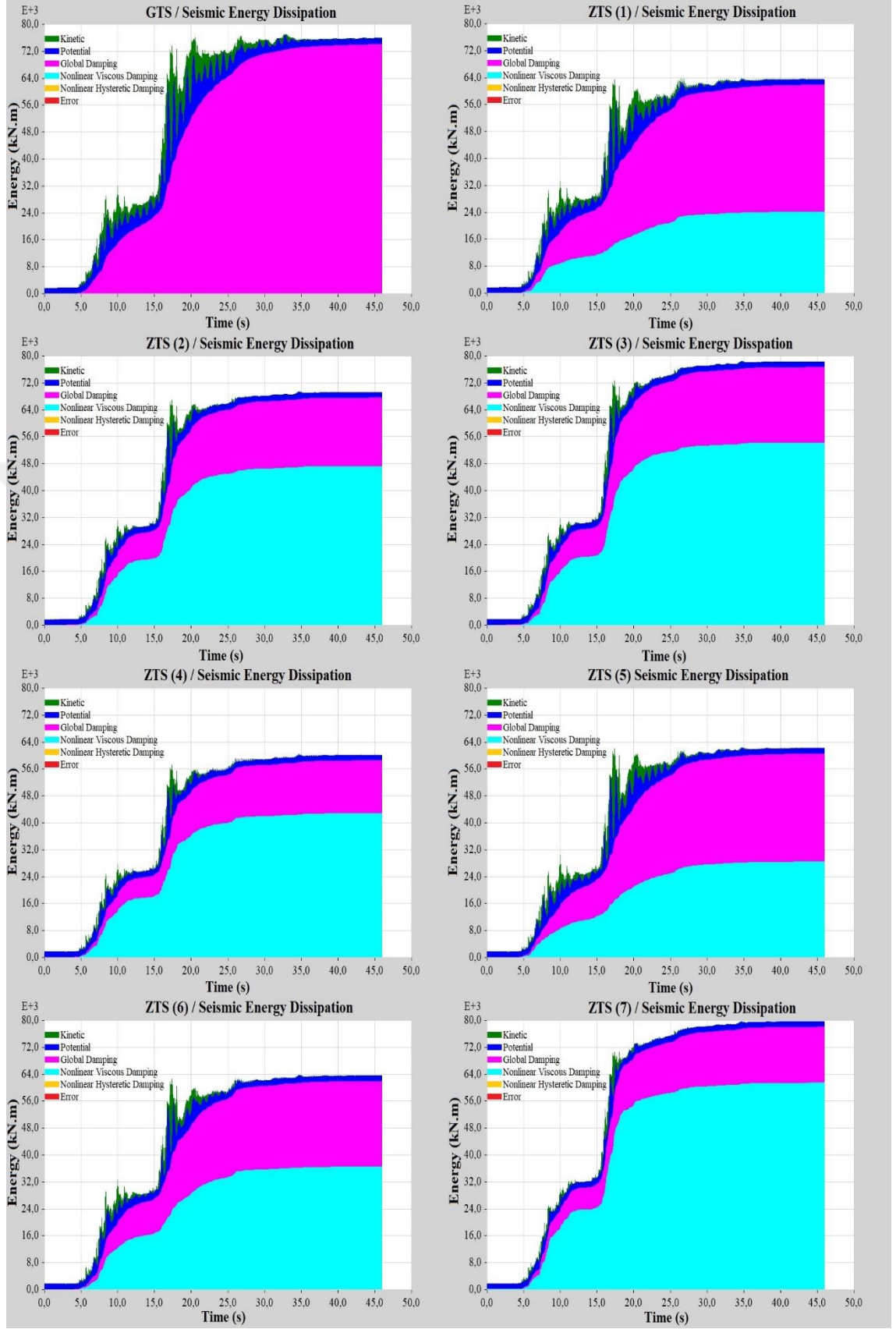
➤ **ZTS (5):** Nonlinear viscous damping bileşeninin sınırlı düzeyde katkı sağladığı görülmektedir. Kinetik ve potansiyel enerji artışı, deprem hareketinin ilk saniyelerinde hızla yükselmiş; ardından sistem, enerji sönümleme mekanizmaları aracılığıyla dengeye ulaşmıştır. Global damping bileşeni, analiz sürecinin başlangıcında artış göstermiş, sürecin ilerleyen bölümlerinde ise durağan bir seyir izlemiştir. Nonlinear hysteretic damping bileşeninde enerji tüketimi oluşmamıştır. Yapı, hem kendi rijitlik ve kütle özellikleriyle hem de viskoz sönümlmeye dayalı olarak kontrollü ve kararlı bir enerji performansı sergilemiştir.

➤ **ZTS (6):** Nonlinear viscous damping bileşeninin belirgin düzeyde katkı sağladığı görülmektedir. Kinetik ve potansiyel enerji artışı, deprem hareketinin ilk saniyelerinde hızla yükselmiş; ardından sistem, enerji sönümleme mekanizmaları aracılığıyla dengeye ulaşmıştır. Global damping bileşeni, analiz sürecinin başlangıcında artış göstermiş, sürecin ilerleyen bölümlerinde ise durağan bir seyir izlemiştir. Nonlinear hysteretic damping bileşeninde enerji tüketimi oluşmamıştır. Yapı, hem kendi rijitlik ve kütle özellikleriyle hem de viskoz sönümlemeye dayalı olarak kontrollü ve kararlı bir enerji performansı sergilemiştir.

➤ **ZTS (7):** Nonlinear viscous damping bileşeninin belirgin düzeyde katkı sağladığı görülmektedir. Kinetik ve potansiyel enerji artışı, deprem hareketinin ilk saniyelerinde hızla yükselmiş; ardından sistem, enerji sönümleme mekanizmaları aracılığıyla dengeye ulaşmıştır. Global damping bileşeni, analiz sürecinin başlangıcında artış göstermiş, sürecin ilerleyen bölümlerinde ise durağan bir seyir izlemiştir. Nonlinear hysteretic damping bileşeninde enerji tüketimi oluşmamıştır. Yapı, hem kendi rijitlik ve kütle özellikleriyle hem de viskoz sönümlemeye dayalı olarak kontrollü ve kararlı bir enerji performansı sergilemiştir.

Sonuç olarak, FVD elemanlarının yalnızca taşıyıcı sisteme entegre edilmesi değil, aynı zamanda hangi kat seviyelerine ve yapısal bölgelere yerleştirildiklerinin de enerji sönüm kapasitesi üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Katlar boyunca meydana gelen rijitlik geçişleri, podyum-normal kat ayrımları ve kolon kesiti süreksizlikleriyle birlikte değerlendirildiğinde, FVD yerleşim stratejisinin, yapıdaki sismik enerji dağılımı ve sönüm davranışı üzerinde doğrudan etkili olduğu görülmektedir. Bu bağlamda, yapılan analizlerde sırasıyla ZTS (6), ZTS (5) ve ZTS (1) varyantlarının, enerji sönüm kapasitesi açısından en başarılı performansı sergileyen konfigürasyonlar olduğu belirlenmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



Şekil 4.9. Enerji Sönüm Miktarları Analiz Sonuç Grafikleri (TH-XY)

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Tez çalışması kapsamında, çelik-beton kompozit taşıyıcı sistemlerde pasif sismik kontrol mekanizmalarından biri olan akışkan viskoz sönümleyici (FVD) bağlantı elemanlarının, yapıların deprem etkisi altındaki dinamik davranışları üzerindeki katkıları çağdaş yapısal mühendislik yaklaşımları doğrultusunda kapsamlı ve çok boyutlu olarak analiz edilmiştir. Günümüzde sismik risklerin yönetilmesi amacıyla giderek daha fazla tercih edilen pasif sismik kontrol mekanizmaları, yapı güvenliğini artırmanın yanı sıra ekonomik ve sürdürülebilir çözümler sağlamaları açısından da önem kazanmaktadır. Bu bağlamda, FVD sistemlerinin sismik performans iyileştirme potansiyeli, modern yapı mühendisliğinde öne çıkan teknolojik uygulamalar ışığında ele alınmış; bu sistemlerin yapı davranışına olan etkileri, ileri düzey modelleme teknikleri ve analiz yöntemleri aracılığıyla sayısal olarak değerlendirilmiştir.

Çalışmada temel analiz yaklaşımı olarak, yapının zamana bağlı dinamik tepkilerini gerçeğe en yakın şekilde simüle etmeye olanak tanıyan doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizleri (Nonlinear-Time History Analysis) tercih edilmiştir. Bu kapsamda, analizlerde 6 Şubat 2023 tarihinde ülkemizde meydana gelen Kahramanmaraş/Pazarcık Depremi'nin AFAD tarafından yayımlanan ve 4614 numaralı istasyona ait işlenmiş ivme kayıtları (Doğu-Batı Bileşeni, X doğrultusu / 34-80 saniyeler arası) esas alınmıştır. Bu kayıtlar, SeismoMatch yazılımı aracılığıyla DD-1 düzeyine karşılık gelen hedef tasarım spektrumları ile uyumlu hale getirilmiş ve elde edilen benzeştirilmiş ivme değerleri dikkate alınarak analizler (FNA) gerçekleştirilmiştir. Kullanılan akışkan viskoz sönümleyici elemanlar, Taylor Devices Inc. firmasına ait 17071 seri numaralı modelden seçilmiş olup, yapının doğrusal olmayan dinamik davranışı bu sönümleyicilerin etkisiyle değerlendirilmiştir. Tüm analiz süreci, ETABS V21 yapı analiz yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem sayesinde, deprem yer hareketlerinin zamansal karakteristikleri göz önünde bulundurularak, yapı sistemlerinin sismik performansı detaylı bir biçimde incelenmiştir.

Tez kapsamında analizi gerçekleştirilen yapı, 90 metre yüksekliği, dairesel ancak simetrik olmayan plan geometrisi, X eksenini boyunca aksel sapma gösteren çekirdek perde sistemi ve düşey yönde belirgin rijitlik ile kütle geçişleri ile karakterize edilmektedir. Ayrıca, yapının konumlandığı Bakırköy/İstanbul bölgesine ait yerel zemin koşullarına göre, Türkiye Deprem Tehlike Haritası'ndan elde edilen kısa periyot (S_s) ve bir saniyelik periyot (S_1) harita spektral ivme katsayılarının yüksek olması nedeniyle, yapı Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018) kapsamında yüksek bina sınıfında değerlendirilmektedir. Yapının taşıyıcı sistem davranışı, plan düzleminde gözlenen asimetri, fonksiyonel kat bölgeleri arasındaki ani rijitlik geçişleri ve yapının en üst kısmında konumlanan helikopter iniş platformu gibi kütleli düzensizliklerin etkisiyle karmaşık bir sismik yanıt oluşturmaktadır.

FVD bileşenlerinin farklı yerleşim konfigürasyonlarıyla taşıyıcı sisteme entegrasyonu sonrasında ortaya çıkan davranış farklılıkları; kat yer değiştirme miktarları, göreceli kat ötelemeleri, kat kesme kuvvetleri, moment dağılımları ve enerji sönümleme kapasiteleri gibi çok sayıda mühendislik parametresi üzerinden karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

Yapılan bu analizler sonucunda, FVD sistemlerinin yalnızca yapıların yer değiştirme performansını iyileştirmekle kalmayıp; aynı zamanda iç kuvvet dağılımını, enerji sönümleme kapasitesini ve yapının rijitlik karakteristiklerini daha dengeli ve süreklilik arz eden bir yapıya dönüştürdüğü görülmüştür.

5.1.1. Çelik-Beton Kompozit Taşıyıcı Sistemlerin Sismik Yükler Etkisinde Davranışının Değerlendirilmesi

Bu çalışmada, çelik-beton kompozit taşıyıcı sistemlerin deprem yükleri altındaki dinamik tepkileri, FVD gibi pasif sönümleyici elemanlar kullanılmadan modellenen Geleneksel Taşıyıcı Sistem (GTS) üzerinden değerlendirilmiştir. GTS modeli, yapı sisteminin yalnızca kendi yapısal kapasitesiyle sismik taleplere verdiği yanıtı temel alan referans varyantı olarak tanımlanmıştır. Söz konusu varyantta, rijitlik sürekliliği, süneklik kapasitesi, yapısal düzensizlikler ve katlar arası iç kuvvet dağılımları gibi birçok

parametre, enerji sönümleme sistemlerinden bağımsız olarak gözlemlenmiş; böylece yapı davranışının doğal sınırları belirlenmiştir.

Analizlerde, 6 Şubat 2023 tarihinde ülkemizde meydana gelen Kahramanmaraş/Pazarcık Depremi'nin AFAD tarafından yayımlanan ve 4614 numaralı istasyona ait işlenmiş ivme kayıtları (Doğu-Batı Bileşeni, X doğrultusu / 34-80 saniyeler arası) kullanılmıştır. Kısa periyot bileşeni baskın ve yüksek ivmeli bu kayıt, rijit taşıyıcı sistemlerin dinamik sınırlarının test edilmesinde kritik bir veri olarak değerlendirilmiştir. Spektral uyum işlemi sonrası doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizlerinde kullanılmaya uygun hale getirilen bu ivme kaydı sayesinde, yapı taşıyıcı sisteminin zamana bağlı tepkileri yüksek duyarlılıkla tespit edilmiştir.

Kat yer değiştirme analizleri, yapı yüksekliği boyunca artan bir eğilim göstermiş; maksimum deplasmanlar her iki yatay doğrultuda da üst katlarda oluşmuştur. Bu durum, yüksek binalarda beklendiği üzere, üst seviyelerde kütle ve ivme kaynaklı etkilerin birikmesinden kaynaklanmıştır. X doğrultusunda ise hem çekirdek perdenin eksen dışı yerleşimi hem de asimetri kolon yerleşimi ile rijitlik merkezi ile kütle merkezi arasındaki uyumsuzluk burulma etkilerinin oluşmasına ve bu doğrultuda rijitlik kayıplarına yol açmıştır. Buna bağlı olarak deplasmanlar Y eksenine göre simetrik olmayan bir biçimde dağılmış, bu durum üst katlarda daha belirgin hale gelmiştir. Y doğrultusunda ise, daha dengeli bir geometrik yerleşim nedeniyle deplasman dağılımı düzenli seyretnmiştir.

Görelî kat ötelemeleri, özellikle orta kat seviyelerinde yüksek değerler göstermiştir. X doğrultusunda asimetrik çekirdek perde yerleşiminin etkisiyle orta katlarda belirgin artışlar gözlemlenmiş, Y doğrultusunda ise daha simetrik bir eğilim kaydedilmiştir. Bu durum, yapıdaki burulma etkilerinin, yalnızca deplasman değil, rölatif deformasyonlara da yansıdığını göstermektedir.

Kesme kuvveti dağılımları, X ve Y doğrultularında genellikle tabandan başlayarak üst kata doğru düzenli şekilde azalan bir profil göstermiştir. Bu beklenen eğilim, deprem yüklerinin temel seviyede yoğunlaşıp üst katlara doğru dağılırarak azaldığını yansıtmaktadır. Yine de X doğrultusunda tüm kat seviyelerinde kesme kuvveti büyüklüklerinin Y doğrultusuna göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu fark,

taşıyıcı sistemin X yönündeki yatay yük aktarımı açısından daha yüksek iç kuvvet taşıdığına işaret etmektedir.

Moment kuvvetleri değerlendirmesinde ise X ve Y doğrultularında taban seviyelerinde yüksek moment değerlere ulaşıldığı, katlar yükseldikçe bu değerlerin kademeli olarak azaldığı görülmüştür. Moment eğrilerinde ani dalgalanmalara rastlanmamış, ancak Y doğrultusunda tüm kat seviyelerinde X doğrultusuna göre daha yüksek moment değerleri elde edilmiştir. Bu farklılık, asimetrik rijitlik ve yük aktarım koşullarından kaynaklanan iç kuvvet yoğunlaşmasının bir yansımasıdır.

Enerji sönümü açısından incelendiğinde, GTS modeli yalnızca doğal (global) sönümleme kapasitesi ile çalışmıştır. Deprem enerjisi, yapı elemanları tarafından doğrudan sönümlenmiş; analiz süresince global damping eğrisinin zamanla kararlı biçimde yükseldiği gözlemlenmiştir.

Bu değerlendirmeler sonucunda, GTS modelinin sergilemiş olduğu davranış karakteristiği, çelik-beton kompozit taşıyıcı sistemin süneklik kapasitesi, rijitlik uyumu ve taşıyıcı sistem sürekliliği açısından yapı güvenliğini sağlayabilecek düzeyde bir performansa sahip olduğunu göstermiştir. Yapı, mevcut doğal sönümleme kapasitesi ile deprem yüklerine karşı yeterli dayanımı göstermiş; doğrusal olmayan dinamik analizler sonucunda hem yer değiştirme hem de iç kuvvet sınırlarının, yürürlükteki yönetmelik değerleriyle genel olarak uyumlu kaldığı tespit edilmiştir. Bu durum, çelik-beton kompozit taşıyıcı sistemin enerji yutma ve yük taşıma açısından sahip olduğu yapısal avantajları desteklemekte, sünekliğe dayalı davranışın sismik performans üzerindeki olumlu etkilerini açıkça göstermektedir.

Ancak plan düzlemindeki asimetri, düşey yönlü rijitlik geçişleri ve kat fonksiyonel bölgelerinin, yapı davranışında önemli değişimlere yol açtığı da belirgin biçimde ortaya çıkmıştır. Özellikle çekirdek perde sisteminin eksen dışı yerleşimi, burulma etkilerinin belirginleşmesine neden olmuş; bu durum hem yatay deplasmanlarda asimetriye hem de iç kuvvet dağılımında farklılıklara zemin hazırlamıştır. Fonksiyonel kat bölge geçişleri gibi düşey süreksizlikler ise, kesme kuvveti ve göreceli kat ötelemelerinde yerel artışlara sebep olmuş; bu kat seviyelerinde talep yoğunlaşmaları

gözlemlenmiştir. Bu etkiler, yapı elemanlarının sünek davranışa sahip olmasına rağmen, taşıyıcı sistem düzeyindeki sürekliliğin ve rijitlik dengesinin ne kadar önemli olduğunu vurgulamaktadır.

Dolayısıyla GTS modeli, yalnızca yer değiştirme performansının değerlendirilmesiyle sınırlı kalmadan; iç kuvvet dağılımı, enerji sönüm kapasitesi ve rijitlik sürekliliği gibi çok sayıda mühendislik parametresine ışık tutmakta ve yapı sisteminin zayıf noktalarının belirlenmesini mümkün kılmaktadır. FVD gibi pasif enerji sönümleyici sistemlerin entegrasyonu öncesinde, mevcut yapısal sınırların belirlenebilmesi açısından GTS varyantı, referans niteliğinde bir temel sağlamaktadır. Bu çerçevede, sönümleyici sistemlerin yapıya entegrasyonu; yalnızca yatay düzlemdeki yer değiştirme taleplerini azaltmakla kalmayıp, aynı zamanda iç kuvvetlerin homojenleştirilmesi, enerji birikiminin kontrol altına alınması ve rijitlik sürekliliğinin sağlanması açısından da stratejik bir müdahale olarak değerlendirilmelidir. Böylece hem bileşen düzeyinde hem de sistem bütününde sismik performansın optimize edilmesine yönelik ileri mühendislik çözümleri daha etkin bir biçimde geliştirilebilecektir.

Sonuç olarak, yüksek bina tasarımında plan geometrisi, rijitlik süreksizlikleri ve kütleli asimetri, sismik performans doğrudan etkileyen temel unsurlardır. GTS modeli, mevcut yönetmelik koşullarına uygun şekilde tasarlanmış ve yapı güvenliğini sağlayacak performans düzeyini başarıyla göstermiştir. Ancak elde edilen bulgular, rijitlik geçiş bölgeleri ile üst katlarda gözlenen tepkilerin, pasif sismik kontrol sistemleriyle daha etkin yönetilebileceğini göstermekte ve bu stratejinin mühendislikte önemli bir alternatif olduğunu işaret etmektedir.

5.1.2. Akışkan Viskoz Sönümleyici Sistemlerin Yerleşim Konfigürasyonlarının Yapı Mühendisliği Açısından Değerlendirilmesi

Tez çalışması kapsamında, çelik-beton kompozit taşıyıcı sistemlerin sismik performansını iyileştirmeye yönelik olarak geliştirilen yedi farklı ZTS (Zenginleştirilmiş Taşıyıcı Sistem) varyantı, referans model olarak kabul edilen GTS (Geleneksel Taşıyıcı Sistem) ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu varyantlar yalnızca FVD (Akışkan Viskoz Sönümleyici) elemanlarının yapıya entegre edilip edilmemesini değil, aynı

zamanda bu elemanların taşıyıcı sistem içerisindeki yerleşim stratejilerinin sismik davranış üzerindeki etkilerini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Bu doğrultuda, pasif enerji sönümleme mekanizmalarının çağdaş deprem mühendisliği yaklaşımıyla modellenmesi ve analiz edilmesi hedeflenmiştir.

Her bir ZTS varyantı, FVD bileşenlerinin farklı kat yüksekliklerinde ve iç-dış kolon-kiriş çerçeve bölgelerinde stratejik biçimde yerleştirilmesine dayalı olarak oluşturulmuştur. Tasarım sürecinde; düşey rijitlik profili, ani kesit geçişleri, zayıf kat oluşum riski ve yük aktarım sürekliliği gibi kritik yapısal faktörler dikkate alınarak, FVD sistemlerinin yalnızca entegrasyon düzeyinde değil, optimum konfigürasyonla değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Bu stratejik yaklaşım, pasif sönümleyicilerin yapısal sistemde maksimum etkinlikle kullanılmasını sağlamıştır.

ZTS varyantlarının temel amacı; yapının belirli bölgelerinde rijitlik ve sönüm oranını artırmak suretiyle genel sismik performansını optimize etmek ve davranış sürekliliğini güçlendirmektir. Sayısal ve grafiksel analizler sonucunda, FVD sistemlerinin hangi yerleşim senaryoları altında daha verimli sonuçlar sağladığı tespit edilmiş; özellikle taşıyıcı sistemin farklı bölgelerindeki tepkisel davranışlar üzerinden karşılaştırmalı yorumlamalar yapılmıştır. Bu bulgular, pasif enerji sönümleme sistemlerinin yalnızca yapıya entegre edilmesiyle sınırlı kalmayıp, yapısal parametrelerle uyumlu biçimde yerleştirilmesinin önemini vurgulayan bütüncül bir mühendislik yaklaşımını yansıtmaktadır.

Gerçekleştirilen analizler, her bir ZTS varyantının çelik-beton kompozit taşıyıcı sistemin sismik davranışına olan etkisini çeşitli mühendislik ölçütleri temelinde tespit edilmesini sağlamıştır. Kat deplasmanları, görelî kat ötelemeleri, kat kesme kuvvetleri, kat moment dağılımları ve enerji sönümleme kapasiteleri gibi temel performans parametreleri üzerinden yapılan karşılaştırmalar, FVD yerleşim stratejilerinin etkisini doğrultulara göre farklılaşan yapısal tepkiler üzerinden değerlendirmeye olanak sağlamıştır. Aşağıdaki alt başlıklarda, ZTS varyantlarına ait analiz sonuçları bu çerçevede özet olarak belirtilmiştir.

➤ **ZTS (1) Konfigürasyonu;** FVD elemanlarının yalnızca podyum katların dış kolon-kiriş çerçeve sistemlerine entegre edildiği bu yerleşim stratejisinde, yapısal davranış üzerindeki etkiler çeşitli mühendislik parametreleri doğrultusunda değerlendirilmiştir.

Kat yer değiştirmeleri ve görelî kat ötelemeleri açısından her iki doğrultuda da sınırlı düzeyde iyileşmeler sağlanmıştır. Alt ve orta katlarda gözlemlenen azalmalar, sistemin rijitlik özellikleri ve sönümleyici katkısı ile dengeye ulaşmasına olanak sağlamıştır. Üst katlarda ise bu etkinin sınırlı kaldığı anlaşılmaktadır. Kat kesme kuvvetleri değerlendirmesinde, X doğrultusunda kısmî azalmalar sağlanırken, Y doğrultusunda daha belirgin azalmalar elde edilmiştir. Moment kuvvetleri açısından da her iki yönde kısıtlı düzeyde azalma kaydedilmiş, özellikle alt ve orta kat seviyelerinde sönümleyici etkisi gözlenmiştir. Enerji sönümleme performansında nonlinear viscous damping sınırlı katkı sağlamış, global damping bileşeni ise enerji tüketiminin büyük kısmını üstlenmiştir.

Sonuç olarak, podyum kat düzeyinde yerel iyileştirmeler sağlanmış olsa da yapının genel sismik performansını bütüncül olarak artırma açısından bu yerleşim senaryosu yetersiz kalmıştır. Üst katlardaki deplasman miktarlarında gözlemlenen artış eğilimi, sönümleyici yerleşim stratejisinin yalnızca sınırlı bölgelerde etkili olabildiğini göstermektedir.

➤ **ZTS (2) Konfigürasyonu;** FVD elemanlarının yalnızca normal katların dış kolon-kiriş çerçeve sistemlerine entegre edildiği bu yerleşim stratejisinde, yapısal davranış üzerindeki etkiler çeşitli mühendislik parametreleri doğrultusunda değerlendirilmiştir.

Kat yer değiştirmeleri ve görelî kat ötelemelerinde özellikle X doğrultusunda belirgin iyileşmeler sağlanmıştır. Alt ve orta kat seviyelerinde azalma daha kontrollü ve dengeli seyretmiş, üst katlarda ise sönümleyici etkisi daha belirgin olarak devam etmiştir. Kat kesme kuvvetleri değerlendirmesinde, X doğrultusunda kesme kuvvetleri önemli oranda azaltılmış, Y doğrultusunda ise sınırlı iyileşme gözlemlenmiştir. Moment kuvvetleri değerlendirmesinde Y yönünde belirgin iyileşmeler sağlanırken, X

doğrultusunda daha kısıtlı bir azalma kaydedilmiştir. Enerji sönümlemede nonlinear viscous damping bileşeninin katkısı oldukça belirgin olup, sistemin enerji tüketim kapasitesini anlamlı ölçüde artırmıştır.

Sonuç olarak, yalnızca normal katlara entegre edilen FVD sistemleri, yatay doğrultularda yapı performansını iyileştirmiş; ancak alt kat seviyelerinde etkisi sınırlı kalmıştır. Kat deplasmanları, iç kuvvet dağılımı ve enerji sönümleme parametrelerine yönelik elde edilen bulgular, bu stratejinin yapının genel sismik davranışını optimize etmede etkili bir çözüm sağladığı göstermektedir.

➤ **ZTS (3) Konfigürasyonu;** FVD elemanlarının hem podyum hem de normal katların dış kolon-kiriş çerçeve sistemlerine entegre edildiği bu yerleşim stratejisinde, yapısal sistem üzerindeki sismik etkiler farklı mühendislik parametreleri kapsamında değerlendirilmiştir.

Kat yer değiştirmeleri ve görelî kat ötelemeleri her iki doğrultuda sınırlı biçimde azalmıştır. Özellikle orta katlarda kontrollü bir azalma eğilimi gözlenmiştir. Kat kesme kuvvetleri açısından hem X hem de Y doğrultularında belirgin azalmalar sağlanmış ve kuvvet dağılımları üst katlara kadar düzenli biçimde devam etmiştir. Moment kuvvetlerinde ise Y doğrultusunda daha belirgin azalmalar, X doğrultusunda ise sınırlı seviyede iyileşmeler elde edilmiştir. Enerji sönümleme performansında nonlinear viscous damping önemli katkılar sağlamış, sistemin elastik sınırlar içinde kontrollü bir davranış göstermesine imkân tanımıştır.

Sonuç olarak, ZTS (3) varyantı, sönümleyici elemanların hem podyum hem de normal katlara yaygın biçimde yerleştirilmesinin yapı performansı üzerinde bütüncül iyileştirmeler sağladığını göstermiştir.

➤ **ZTS (4) Konfigürasyonu;** FVD elemanlarının hem podyum hem de normal katların iç kolon-kiriş çerçeve sistemlerine entegre edildiği bu yerleşim stratejisinde, yapısal sistem üzerindeki sismik etkiler farklı mühendislik parametreleri kapsamında değerlendirilmiştir.

Kat yer değiştirmeleri ve görelî kat ötelemeleri her iki doğrultuda belirgin azalmalar gözlenmiştir. Alt ve orta katlarda düzenli azalma eğilimi üst katlara kadar istikrarlı şekilde sürmüştür. Kat kesme kuvvetleri açısından X ve Y doğrultularında dengeli ve tutarlı azalmalar elde edilmiş, sismik yüklerin güvenli aktarımı sağlanmıştır. Moment kuvvetlerinde de her iki doğrultuda belirgin azalmalar gerçekleşmiş, sistemin moment aktarım kapasitesi önemli ölçüde kontrol altına alınmıştır. Enerji sönümlemede nonlinear viscous damping bileşeni güçlü katkılar sağlamış, global damping ile birlikte sistemin enerji performansını dengeleyici bir rol oynamıştır.

Sonuç olarak, ZTS (4) konfigürasyonu yatay doğrultularda yapı davranışını dengeleyen, iç kuvvet aktarımını optimize eden ve süneklik kapasitesini artıran etkili bir strateji sağlamıştır. FVD bileşenlerinin yalnızca iç kolon-kiriş sistemlerine entegre edilmesi, yapının genel sismik performansını iyileştirmiş; deformasyon miktarlarını yapının genelinde etkin biçimde kontrol edilmesine olanak tanımıştır.

➤ **ZTS (5) Konfigürasyonu;** FVD elemanlarının, fonksiyonel kat geçiş bölgeleri ile kolon kesitlerinin azaltıldığı normal kat seviyelerinde, dış kolon-kiriş çerçeve sistemlerine entegre edildiği bu yerleşim stratejisinde, yapısal davranış çeşitli mühendislik parametreleri kapsamında değerlendirilmiştir.

Kat yer değiştirmeleri ve görelî kat ötelemelerinde sınırlı fakat dengeli azalmalar sağlanmıştır. Orta katlarda rijitlik geçişlerine bağlı lokal dalgalanmalar gözlemlenmiştir. Kat kesme kuvvetlerinde orta ve üst kat seviyelerinde kısmi azalmalar gerçekleşmiş, yük dağılımları üst katlara kadar düzgün biçimde ilerlemiştir. Moment kuvvetleri açısından ise hem X hem de Y doğrultularında kısmi seviyede iyileşmeler kaydedilmiş, özellikle üst katlarda düzenli dağılım devam etmiştir. Enerji sönümlemede nonlinear viscous damping bileşeni sınırlı katkı sağlamış, sistemin enerji tüketimi daha çok global damping etkisiyle gerçekleşmiştir.

Sonuç olarak, ZTS (5) konfigürasyonu, yapıdaki kritik rijitlik değişim noktalarını hedef alan optimize edilmiş yerleşim stratejisi sayesinde hem yatay deplasman kontrolü hem de iç kuvvet dağılımı bakımından başarılı bir performans sergilemiştir. Geçiş bölgelerinde sağlanan enerji sönümü ve deformasyon sınırlaması, bu varyantın yapısal

bütünlük ve sismik güvenlik açısından önemli bir mühendislik çözümü sağladığını göstermektedir.

➤ **ZTS (6) Konfigürasyonu;** FVD elemanlarının, fonksiyonel kat geçiş bölgelerini, kolon kesitlerinin azaltıldığı normal katlar ve bu katların bir üst seviyesindeki dış kolon-kiriş çerçeve sistemlerine entegre edildiği bu yerleşim stratejisinde, yapının sismik davranışı çeşitli mühendislik parametreleri doğrultusunda değerlendirilmiştir.

Kat yer değiştirmeleri ve görelî kat ötelemeleri açısından her iki doğrultuda belirgin iyileşmeler kaydedilmiştir. Alt, orta ve üst katlarda azalmalar düzenli ve istikrarlı biçimde devam etmiştir. Kat kesme kuvvetleri değerlendirmesinde, hem X hem de Y doğrultularında dikkat çekici azalmalar sağlanmış; orta kat seviyelerinde ise rijitlik geçişlerinden kaynaklı lokal dalgalanma miktarları dengelenmiştir. Moment kuvvetleri açısından her iki doğrultuda sınırlı fakat düzenli azalmalar gözlemlenmiştir. Enerji sönümlemede nonlinear viscous damping bileşeni güçlü katkılar sağlamış, sistemin elastik sınırlar içinde kararlı ve dengeli enerji performansı sergilemesine olanak sağlamıştır.

Sonuç olarak, ZTS (6) konfigürasyonu, yalnızca geçiş bölgelerini değil, bu bölgelerin üstündeki zayıf kat potansiyeli taşıyan seviyeleri de kapsayan yaygın bir FVD yerleşimiyle, yapı genelinde sismik performansın dengelenmesini sağlamıştır. Bu varyant, yatay yer değiştirme kontrolü, iç kuvvetlerin dengelenmesi ve enerji sönümü açısından diğer konfigürasyonlara kıyasla daha kapsamlı ve başarılı bir mühendislik çözümü olarak öne çıkmaktadır.

➤ **ZTS (7) Konfigürasyonu;** FVD elemanlarının hem podyum hem de normal katların iç ve dış kolon-kiriş çerçeve sistemlerine entegre edildiği bu yerleşim stratejisinde, yapısal sistem üzerindeki sismik etkiler farklı mühendislik parametreleri doğrultusunda değerlendirilmiştir.

Kat yer değiştirmeleri ve görelî kat ötelemelerinde her iki doğrultuda tutarlı ve dengeli azalmalar sağlanmıştır. Üst katlara doğru sönümleyici etkisi belirgin şekilde hissedilmiştir. Kat kesme kuvvetlerinde tüm kat seviyelerinde belirgin ve düzenli

azalmalar kaydedilmiş; özellikle orta katlardaki rijitlik geçişleri dengelenmiştir. Moment kuvvetleri değerlendirmesinde ise her iki doğrultuda belirgin azalmalar sağlanmış ve yük aktarımı dengeli şekilde sürdürülmüştür. Enerji sönümlemede nonlinear viscous damping bileşeni yüksek düzeyde katkı sağlamış, sistemin sismik enerji tüketimini etkin şekilde dengelemiştir.

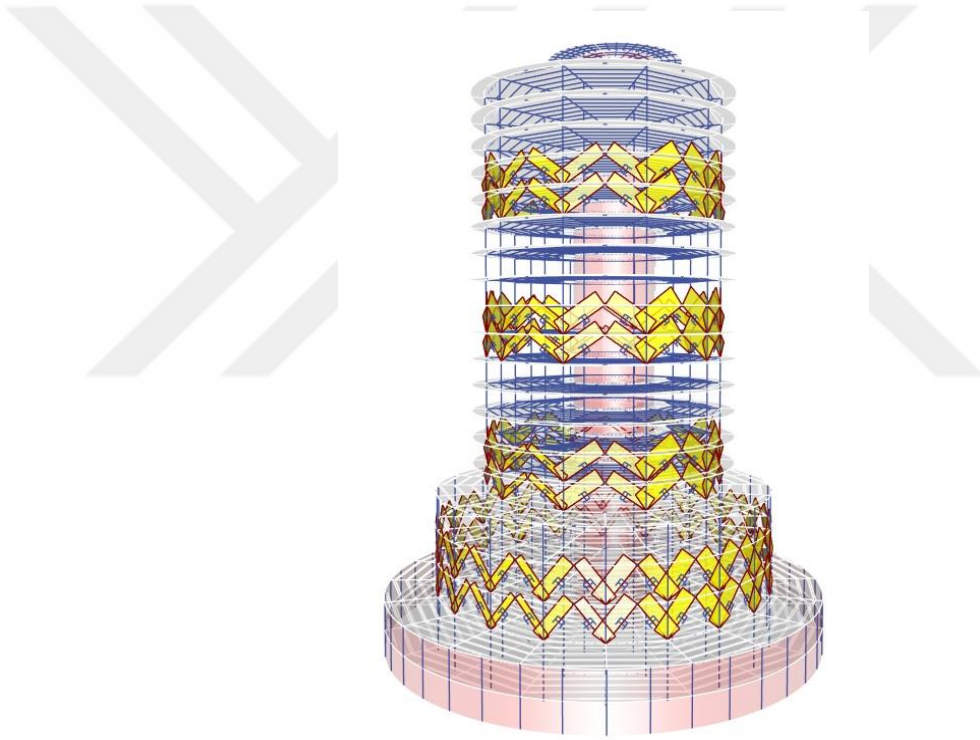
Sonuç olarak, ZTS (7) konfigürasyonu, FVD sistemlerinin yapı genelinde yaygın şekilde entegre edilmesi sayesinde; deplasman kontrolü, iç kuvvet dengesi ve enerji sönümü gibi mühendislik parametrelerinin tamamında üstün bir performans sergilemiştir. Bu varyant, yüksek sismik güvenlik ve sistem bütünlüğü hedefleyen tasarımlar için önemli bir mühendislik çözümü olarak değerlendirilmektedir.

Bu bağlamda; ZTS varyantlarının yapı mühendisliğindeki rolü, yalnızca pasif sönümleme sistemlerinin taşıyıcı sisteme entegre edilmesiyle sınırlı olmayıp, bu sistemlerin yapının hangi bölgelerinde ve nasıl bir yerleşim stratejisiyle uygulandığına bağlı olarak, yapı davranışında belirleyici bir etkisi bulunmaktadır. Bu bağlamda, FVD bileşenlerinin taşıyıcı sistemin zayıf noktalarına yönelik olarak planlı ve hedeflenmiş bir biçimde konumlandırılması, özellikle yüksek yapıların sismik performans sürekliliği açısından kritik bir tasarım yaklaşımı olarak öne çıkmaktadır.

Çalışmada elde edilen bulgular, her bir ZTS varyantının farklı düzlemlerde ve kat seviyelerinde yapı sistemine özgü davranış biçimleri ürettiğini göstermektedir. Varyantlar arasında yapılan karşılaştırmalar, özellikle rijitlik geçiş bölgelerine yerleştirilen konfigürasyonların, deplasman değerlerinin azaltılması ve iç kuvvetlerin daha kontrollü aktarılması açısından daha başarılı sonuçlar verdiğini göstermiştir. Buna karşın, FVD sistemlerinin yalnızca alt kat bölgelerinde sınırlı şekilde uygulandığı varyantlarda, yapı davranışının bütüncül olarak iyileştirilmesinde yetersizlikler gözlemlenmiştir.

Analiz sonuçları, FVD bileşenlerinin yalnızca sistemde yer almasının yeterli olmadığını; bu elemanların mühendislik açısından kritik öneme sahip rijitlik geçiş bölgelerine, kesit süreksizliklerine ve kuvvet yığılmalarının olduğu katlara sistematik biçimde yerleştirilmesinin gerekliliğini göstermektedir. ZTS (6) ve ZTS (7) gibi yerleşim

stratejileri, sismik performans parametrelerinin tamamında daha tutarlı ve etkili sonuçlar sergilemiştir. Bununla birlikte, dikkat edilmesi gereken bir diğer önemli husus maliyet-performans ilişkisidir. FVD bileşenlerinin yapı geneline yaygın şekilde uygulandığı ZTS (7) konfigürasyonu, yüksek düzeyde yapısal performans sağlamış olsa da kullanılan sönümleyici sayısının fazlalığı nedeniyle ilk yatırım maliyeti belirgin ölçüde artmıştır. Buna karşın, ZTS (6) konfigürasyonu daha sınırlı sayıda FVD ile benzer performans seviyelerine ulaşarak, yapısal verimlilik ve ekonomik uygulanabilirlik açısından en verimli çözüm olarak değerlendirilmiştir. Bu bulgular, FVD sistemlerinin yalnızca performans hedefleri doğrultusunda değil, aynı zamanda maliyet-etkinlik dengesi dikkate alınarak tasarlanması gerektiğini göstermektedir.



Şekil 5.1. ZTS (6) / FVD Eksenel Kuvvet Diyagramı (TH-XY)

Bununla birlikte, analiz sonuçları göstermektedir ki, her yapı için tekil ve sabit bir çözüm yaklaşımından ziyade, yapının rijitlik profili, taşıyıcı sistemin davranışsal özellikleri ve düzensizlik türleri gibi faktörlere bağlı olarak özelleştirilmiş varyant seçimi yapılmalıdır. Bu da ZTS konfigürasyonlarının mühendislik tasarımına olan katkısını yalnızca analiz aşamasıyla sınırlı bırakmayıp, performansa dayalı deprem tasarımının bütüncül ve esnek bir anlayışla ele alınması gerektiğine işaret etmektedir.

Sonuç olarak, ZTS varyantlarının değerlendirilmesi, pasif sönümleyici sistemlerin yapısal sistemle bütünleşik ve stratejik bir tasarım bileşeni olarak ele alınması gerektiğini açık biçimde göstermektedir. FVD'lerin yalnızca sistemde yer alması değil, yapının hangi bölgelerinde ve nasıl bir yerleşim stratejisiyle uygulandığı da sismik performans üzerinde doğrudan belirleyici olmaktadır. Bu yönüyle ZTS varyant seçimi, yalnızca teknik bir uygulama değil, aynı zamanda ileri düzey bir mühendislik kararı ve stratejik bir planlama yaklaşımıdır.

5.1.3. Çelik-Beton Kompozit Taşıyıcı Sistemlerde Akışkan Viskoz Sönümleyicilerin Sismik Performans Üzerindeki Etkileri

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen karşılaştırmalı analizler, akışkan viskoz sönümleyici (FVD) sistemlerinin çelik-beton kompozit taşıyıcı sistemlere sahip yapılarda sismik performansa olan etkisini çok boyutlu bir yaklaşımla değerlendirmiştir. GTS (Geleneksel Taşıyıcı Sistem) modeli ile ZTS (Zenginleştirilmiş Taşıyıcı Sistem) konfigürasyonları arasındaki karşılaştırmalar, FVD elemanlarının yalnızca bir ek kontrol mekanizması değil, aynı zamanda yapının dinamik tepkilerini bütünsel olarak dönüştürebilen stratejik bir ileri mühendislik çözümü niteliği taşıdığını göstermektedir.

Değerlendirmeye konu olan yapı, 90 metre yüksekliğe sahip, dairesel plan formuna rağmen tam anlamıyla simetrik olmayan geometrisi, X ekseni boyunca eksenel sapma gösteren çekirdek perde yerleşimi ve yapının en üst düzeyinde konumlandırılmış helikopter iniş platformu gibi belirgin kütsel düzensizlik unsurlarıyla karakterize edilmektedir. Taşıyıcı sistem, yalnızca yatay planda değil, düşey doğrultuda da farklı kat bölgeleri arasında belirgin rijitlik ve kütle geçişleri barındırmakta; bu durum, yapının sismik yükler altındaki dinamik davranışını karmaşıklaştıran temel etkenler arasında yer almaktadır.

Plan düzlemindeki asimetric kütle ve rijitlik dağılımı, burulma etkilerini artırmakta; fonksiyonel katlar arasında meydana gelen ani rijitlik değişimleri ve düşey doğrultudaki süreksizlikler, sistemin sismik performansında dengesiz tepkilerin oluşmasına neden olmaktadır. Özellikle yapının üst kotunda yer alan kütsel yığılmalar, düşey deprem bileşenlerinin etkisiyle birlikte daha karmaşık bir titreşim moduna yol

açmakta ve bu etkiler, taşıyıcı sistemin genel rijitlik uyumunu olumsuz yönde etkilemektedir.

Tüm bu düzensizlikler, klasik mühendislik çözümleriyle kontrol altına alınması güç bir sismik yanıt oluşturmaktadır. Bu nedenle, pasif enerji sönümleyici sistemlerin entegrasyonu yalnızca performans artışı sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda yapısal güvenlik ve sürdürülebilirlik açısından da önemli bir mühendislik yaklaşımı haline gelmektedir.

Kat yer değiştirme miktarları bakımından değerlendirildiğinde, ZTS (6), ZTS (5) ve ZTS (1) konfigürasyonlarında, üst kat seviyelerindeki yatay deplasmanların belirgin biçimde sınırlandığı ve rijitlik geçiş bölgelerinde daha dengeli bir dağılım sağlandığı tespit edilmiştir. Yatay yer değiştirme taleplerinin sınırlandırılması, yapı sisteminin elastik sınırlar içerisinde kalmasına olanak tanımış ve plastikleşme riskini azaltmıştır.

Görelî kat ötelemeleri bakımından, FVD elemanlarının alt katlarda ve rijitlik süreksizliklerinin bulunduğu bölgelerde konumlandırılması, deformasyon sürekliliğinin sağlanmasında önemli bir rol oynamıştır. Orta kat seviyelerinde gözlemlenen öteleme artışları, ZTS (6), ZTS (5) ve ZTS (1) konfigürasyonlarında etkili biçimde bastırılmış; katlar arası deformasyon farkları minimize edilmiştir. Bu durum, plastik mafsall oluşumu riskini azaltmakta ve sistemin sünek davranış potansiyelini güçlendirmektedir.

Kat kesme kuvvetleri açısından yapılan değerlendirmelerde, FVD sistemlerinin özellikle podyum-normal kat geçişleri gibi kuvvet birikimlerinin yoğunlaştığı bölgelerde etkili olduğu gözlemlenmiştir. ZTS (6), ZTS (5) ve ZTS (1) konfigürasyonları, alt ve orta katlardaki kesme kuvvetlerini daha dengeli biçimde dağıtmış; yüklerin sistem boyunca homojen şekilde aktarılmasına olanak tanımıştır. Bu durum, ani kuvvet yığılmalarının önüne geçerek yapının genel rijitlik profilinin korunmasına katkı sağlamıştır.

Moment kuvvetleri açısından değerlendirildiğinde, ZTS (6), ZTS (5) ve ZTS (1) konfigürasyonları dikkat çekici sonuçlar ortaya çıkarmıştır. Bu konfigürasyonlarda moment talepleri daha düzenli bir dağılım sergilemiş; özellikle orta ve üst kat seviyelerinde oluşabilecek moment birikimleri bastırılarak yapısal süreklilik ve süneklik

kapasitesi korunmuştur. Yüksek moment taleplerinin kontrol altına alınması, taşıyıcı sistemdeki iç kuvvet akışının daha dengeli biçimde gerçekleşmesine katkı sağlamıştır.

Enerji sönümleme kapasitesi, FVD sistemlerinin en belirgin katkılarından biri olarak öne çıkmaktadır. ZTS (6), ZTS (5) ve ZTS (1) konfigürasyonlarında, viskoz sönüm bileşeni sayesinde kinetik ve potansiyel enerji bileşenleri etkin biçimde disipline edilmiştir. Sismik enerjinin sistem genelinde dağılarak yutulması, rezonans etkilerini azaltmış ve yapının elastik sınırlar içerisinde kalmasına olanak tanımıştır.

Bu bağlamda, sınırlı sayıda FVD bileşeniyle kat deplasmanları, görelî kat ötelemeleri, iç kuvvet aktarımı ve enerji sönümü gibi çok ölçekli ve disiplinler arası mühendislik performans kriterlerinde istikrarlı ve yüksek düzeyli sonuçların elde edilmesini sağlayan ZTS (6) konfigürasyonu; maliyet etkinliği, yapısal rasyonalite, sistematik entegrasyon kabiliyeti ve uygulama ölçeğinde sürdürülebilirliği birlikte gözeten optimum mühendislik çözüm paradigması olarak tanımlanmakta ve performansa dayalı deprem tasarım yaklaşımlarında öncelikli tercih potansiyeli taşımaktadır.

Bununla birlikte, analiz sürecinde dikkate alınan bir diğer önemli unsur, FVD elemanlarının yapıya eklediği ilave kütle etkisidir. Sönümleyici sistemler yalnızca enerji sönümleme yönüyle değil, aynı zamanda taşıyıcı sisteme entegre edilen bileşenler olarak yapının genel kütle dağılımını da etkilemektedir. Yapıya dâhil edilen bu ek bileşenler, sistemin dinamik karakteristikleri üzerinde sınırlı düzeyde etkiler oluşturmuş; bu etkinin yapı tepkisine yansımaları ise tarafsız biçimde değerlendirilmiştir. Bu bağlamda, FVD'lerin kazandırdığı ilave kütlelerin analizlerde dikkate alınması gereken bir parametre olduğu, ancak performans sonuçlarını belirleyen ana unsur olmaktan çok, bağlantıların sağladığı yapısal katkılar karşısında ikincil düzeyde bir etken olarak değerlendirilmesi gerektiği anlaşılmaktadır.

Sonuç olarak, FVD'lerin taşıyıcı sistemlere entegrasyonu, yalnızca yer değiştirme kontrolü değil; aynı zamanda iç kuvvet yönetimi, süneklik korunumu ve enerji sönümü açısından da çelik-beton kompozit taşıyıcı sistemlerde önemli bir yapı bileşeni haline gelmiştir. ZTS konfigürasyonları üzerinden yapılan değerlendirmeler, performansa dayalı deprem tasarımında pasif sönümleme sistemlerinin yalnızca tamamlayıcı unsurlar değil,

aynı zamanda yapısal tasarım kararlarının merkezine yerleştirilmesi gereken stratejik araçlar olduğunu göstermektedir.

5.2. Öneriler

Yapı mühendisliği pratiği, günümüzde yalnızca taşıyıcı sistemlerin statik güvenliğinin sağlanmasıyla sınırlı kalmayıp, aynı zamanda yapıların deprem kaynaklı dinamik etkiler karşısında enerji sönümü sağlayabilecek sistemlerle donatılmasını da zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda, pasif sismik kontrol sistemleri arasında yer alan akışkan viskoz sönümleyiciler (FVD), modern deprem mühendisliğinde özellikle yüksek yapıların performans iyileştirmesinde öne çıkan yenilikçi çözümlerden biri hâline gelmiştir.

Son yıllarda Türkiye’de meydana gelen Elâzığ (2020), İzmir (2020) ve 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş merkezli depremler, yapı stokunun büyük bir bölümünün sismik dayanım açısından yetersiz olduğunu açık bir biçimde göstermiştir. Bu afetlerin sonucunda yaşanan ağır can ve mal kayıpları; yalnızca taşıyıcı sistem düzeyindeki eksiklikleri değil, aynı zamanda tasarım, uygulama, denetim ve yönetim süreçlerinde yer alan sistematik zafiyetleri de gözler önüne sermiştir. Bu durum hem mühendislik disiplinleri hem de ilgili kamu kurumları açısından, depreme dayanıklı ve dirençli kentlerin inşasını önceleyen çok boyutlu bir dönüşüm gerekliliğini göstermektedir.

Bu kapsamda, yapı tasarımı ve uygulama süreçlerinde görev alan mühendislerin, yalnızca teknik bilgiyle değil; aynı zamanda bilimsel gelişmeleri takip eden, etik değerlere bağlı ve kamu yararını önceleyen bir mesleki sorumluluk anlayışıyla hareket etmeleri büyük önem taşımaktadır. Ancak bireysel etik duyarlılık kadar, mühendislik hizmetlerini yönlendiren kamu kurumlarının, merkezi ve yerel yönetim birimlerinin de bilime dayalı, liyakat esaslı ve çağın teknolojik gereksinimlerine uyumlu yönetim anlayışlarını benimsemeleri gerekmektedir.

Bu çerçevede, yalnızca mevzuat metnlerinin varlığı değil, kanun ve yönetmeliklerin çağdaş mühendislik bilimi ve meslek etiğine uygun şekilde yeniden düzenlenmesi artık kaçınılmaz bir gereklilik hâline gelmiştir. Özellikle kamu

yönetiminde görev alan teknik kadroların, yalnızca referans veya siyasi aidiyetle değil; mesleki deneyim, teknik yeterlilik ve liyakat temelinde görevlendirilmesi, yapı güvenliğini doğrudan etkileyen bir faktördür.

Ayrıca, günümüzde zorunlu bir ihtiyaç hâline gelen ülkemiz yapı stokunun hızlı ve güvenli bir şekilde yenilenmesi amacıyla yürütülen kentsel dönüşüm faaliyetlerinin, yalnızca ekonomik ve estetik kaygılarla değil; mühendislik esaslarına, sismik performans hedeflerine ve kent ölçekli direnç stratejilerine uygun biçimde gerçekleştirilmesi, depreme dayanıklı, dirençli kentlerin oluşturulması açısından son derece kritik bir konudur. Bu dönüşüm sürecinin başarıya ulaşabilmesi, yalnızca özel sektör girişimleriyle sınırlı kalmamalı; kamu otoriteleri, denetim mekanizmaları, yerel yönetimler ve meslek odalarının bilimsel bilgiye dayalı, eşgüdüm içinde çalışan bir iş birliği modeli geliştirmeleriyle mümkün olmalıdır.

Bu bağlamda; tez kapsamında yapılan analizlerde, Geleneksel Taşıyıcı Sistem (GTS) ve Zenginleştirilmiş Taşıyıcı Sistem (ZTS) modelleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş; FVD sistemlerinin yalnızca yatay deplasman taleplerini azaltmakla kalmayıp, aynı zamanda iç kuvvet dengelenmesini sağlamada ve sismik enerjinin katlar boyunca dengeli dağılımında da önemli katkılar sağladığı gösterilmiştir.

ZTS varyantlarının karşılaştırmalı performans değerlendirmeleri, özellikle "chevron" tipi çerçeve sistemlerine entegre edilen FVD uygulama türlerinin, yapı davranışını anlamlı düzeyde iyileştirdiğini göstermiştir. Bu konfigürasyonlar, özellikle orta ve üst katlardaki deplasman taleplerini azaltmış; kesme kuvveti ve moment dağılımlarını daha dengeli bir yapıya kavuşturmuştur. Bununla birlikte, yalnızca bu uygulama tipiyle sınırlı kalınmaksızın, "diyagonal", "kompakt", "değiştirilmiş chevron" gibi alternatif uygulama türlerinin de benzer analizlerle değerlendirilmesi, optimum sönümleme performansına sahip sistem bileşimlerinin belirlenmesine katkı sağlayacaktır. Böylece FVD sistemlerinin yapıya entegrasyonu, mimari kısıtlar ve fonksiyonel kullanım koşullarıyla birlikte düşünülerek, daha esnek ve mühendislik açısından uygulanabilir çözümler sunabilecektir.

Sonuç olarak, bu tez kapsamında elde edilen bulgular; yalnızca yapısal davranışa ilişkin sayısal değerlendirmeler açısından değil, aynı zamanda ülkemizdeki yapı üretim sürecine ilişkin bilimsel, etik ve yönetsel perspektiflerin geliştirilmesi açısından da önemli katkılar sağlamaktadır. Bu çerçevede geliştirilen öneriler, hem güncel mühendislik uygulamaları açısından yol gösterici olacak, hem de FVD sistemlerinin yüksek yapılarda optimize edilmiş biçimde kullanımına dair akademik bir vizyon oluşturacaktır.

5.2.1. Depreme Dayanıklı Yapıların Tasarım Süreçlerinde Sismik Kontrol Mekanizmalarının Önemi ve Entegrasyonu

Depreme dayanıklı yapı tasarımı, çağdaş mühendislik anlayışında yalnızca taşıyıcı sistemin dayanım, rijitlik ve süneklik özellikleriyle sınırlı kalmamakta; aynı zamanda yapıya etkileyen sismik enerjinin disipline edilmesini sağlayacak ilave sistemlerin de tasarım sürecine entegre edilmesinin önemi giderek artmaktadır. Bu doğrultuda, Geleneksel Taşıyıcı Sistemler (GTS) ile sınırlı kalan performans hedeflerinin ötesine geçilmesini amaçlayan Zenginleştirilmiş Taşıyıcı Sistemler (ZTS) yaklaşımı, günümüzde sismik güvenliğin artırılmasına yönelik ileri düzey mühendislik yöntemi olarak değerlendirilmektedir.

ZTS sistemlerinde yapıya entegre edilen pasif sismik kontrol mekanizmaları, özellikle yüksek yapılarda deprem etkisi altındaki dinamik davranışın kontrolünde önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu sistemler arasında yer alan akışkan viskoz sönümleyiciler (Fluid Viscous Dampers-FVD), düşük bakım gereksinimi, uygulama esnekliği, yüksek enerji sönümleme kapasitesi ve doğrusal olmayan sismik etkilere karşı sağladığı etkinlik sayesinde, yapı güvenliğini artıran stratejik çözümlerden biri haline gelmiştir.

FVD sistemleri, yapıya ilave rijitlik katmaksızın enerji sönümü sağlayarak, yatay yer değiştirme miktarlarını azaltmakta, iç kuvvet dağılımlarını dengelemekte ve rijitlik süreksizliklerinden kaynaklanan dinamik düzensizlikleri kontrol altına almaktadır. Bu özellikleriyle FVD sistemleri, ZTS yaklaşımında yalnızca yardımcı bir unsur değil, aynı zamanda tasarımın bütünleyici ve işlevsel bir bileşeni olarak değerlendirilmektedir.

Buna karşın, mevcut tasarım pratiği ve yürürlükteki teknik mevzuat birlikte değerlendirildiğinde, FVD sistemlerinin mühendislik uygulamalarında henüz yaygın biçimde kullanılmadığı görülmektedir. ZTS yaklaşımlarının ise sınırlı sayıda projeye sınırlı kaldığı anlaşılmaktadır. Özellikle Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018) ve Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik (ÇYTHYE-2016) incelendiğinde, pasif sismik kontrol sistemlerine ilişkin tanımlara, hesap yöntemlerine, yerleşim ilkelerine ve performans doğrulama ölçütlerine kapsamlı biçimde yer verilmediği dikkati çekmektedir. Bu durum, tasarımcıların FVD sistemlerini projelere entegre ederken belirsizliklerle karşılaşmasına neden olmakta ve uygulamaların yaygınlaşmasını sınırlandırmaktadır.

Bu bağlamda, FVD sistemlerinin mühendislik tasarım süreçlerine daha etkin biçimde entegre edilebilmesi ve ZTS yaklaşımının ülke genelinde daha yaygın bir uygulama alanı sağlayabilmesi adına aşağıdaki gelişim alanlarının değerlendirilmesi önerilmektedir:

✓ **Mevzuatsal Güncellemeler;**

TBDY-2018 ve ÇYTHYE-2016 gibi temel yönetmelikler, FVD sistemlerini tanımlayan; performans hedeflerini, hesap esaslarını ve yerleşim kriterlerini açıklayan özel bölümlerle desteklenmelidir. Bu sistemlerin farklı yapı tipolojilerine entegre edilebilmesini kolaylaştıracak, açık ve standartlaştırılmış düzenlemelerin getirilmesi gerekmektedir.

✓ **Mühendislik Eğitimi ve Uzmanlık Gelişimi;**

Yapı mühendisliği uygulayıcılarının ve kontrol uzmanlarının, FVD sistemlerinin davranış prensipleri, montaj kriterleri ve analiz yöntemleri konusunda kapsamlı bilgi sahibi olabilmeleri için; sertifikalı meslek içi eğitim programları, teknik seminerler ve yazılım temelli atölye çalışmaları yaygınlaştırılmalıdır.

✓ Yükseköğretim ve Araştırma Altyapısının Geliştirilmesi;

Üniversitelerin inşaat mühendisliği lisans ve lisansüstü programlarında; sismik kontrol sistemleri, doğrusal olmayan analiz teknikleri, zaman tanım alanı analizleri ve performansa dayalı tasarım ilkeleri hem kuramsal hem de uygulamalı düzeyde daha geniş biçimde ele alınmalıdır. Ayrıca, FVD sistemlerini merkeze alan bitirme projeleri, tez çalışmaları ve akademik araştırmaların desteklenmesi teşvik edilmelidir.

✓ Disiplinler Arası Tasarım Koordinasyonu;

Mimari, statik ve mekanik sistemler arasında proje tasarımının erken aşamalarında etkin bir koordinasyon sağlanmalıdır. FVD sistemlerinin chevron, diyagonal, kompakt ve değiştirilmiş chevron gibi yerleşim türleri, yapı geometrisine uygun şekilde entegre edilmeli; böylece hem yapısal verimlilik hem de mimari süreklilik sağlanmalıdır.

✓ Akademi-Sanayi-Kamu İş Birliği;

FVD sistemlerinin ulusal ölçekte yaygınlaştırılabilmesi için üniversiteler, mühendislik odaları, kamu otoriteleri ve özel sektör arasında çok paydaşlı iş birliği modelleri oluşturulmalıdır. Bu iş birlikleri kapsamında pilot uygulama projeleri, saha testleri, prototip yapılar ve mevzuatsal kılavuz dokümanları hazırlanarak sistemin uygulama pratiğine entegrasyonu desteklenmelidir.

Sonuç olarak, Geleneksel Taşıyıcı Sistemler'den (GTS) Zenginleştirilmiş Taşıyıcı Sistemler'e (ZTS) geçişi destekleyen bu bütünsel tasarım anlayışı; yalnızca yapı güvenliğini artırmakla kalmayıp, aynı zamanda sürdürülebilirlik, maliyet etkinliği ve kullanıcı konforu gibi çağdaş mühendislik hedeflerine de hizmet etmektedir. Bu bağlamda, FVD sistemleri, yapı mühendisliği projelerinde yalnızca yardımcı bir çözüm olarak değil, tasarımın stratejik ve performans odaklı bir bileşeni olarak değerlendirilmelidir. Bu dönüşümün kalıcı ve etkili olabilmesi ise yalnızca teknik düzeyde değil; aynı zamanda mevzuatsal altyapı, akademik eğitim, sektörel farkındalık

ve kurumsal iş birliği ile desteklenmesi hâlinde, sismik açıdan güvenli ve dirençli kentlerin inşası yolunda anlamlı bir ilerleme sağlayacaktır.

5.2.2. Akışkan Viskoz Sönümleyici (FVD) Sistemlerinin Gelecekteki Uygulama ve Araştırma Alanları

Akışkan viskoz sönümleyiciler (FVD), son yıllarda küresel ölçekte yapı mühendisliği alanında öne çıkan, sismik enerjiyi disipline ederek taşıyıcı sistem performansını artırmaya yönelik etkili çözümler sağlayan pasif kontrol elemanları arasında yer almaktadır. Yapıya ilave rijitlik kazandırmaksızın sismik enerji sönümleme kapasitesine katkı sağlayan bu sistemler; düşük bakım gereksinimi, geniş uygulama potansiyeli ve farklı yapı tipolojilerine entegre edilebilme esnekliği sayesinde hem yeni yapıların tasarımında hem de mevcut yapıların güçlendirilmesinde önemli bir ileri mühendislik çözümü olarak değerlendirilmektedir.

FVD sistemlerinin Zenginleştirilmiş Taşıyıcı Sistemler (ZTS) kapsamında kullanımı yalnızca deprem etkilerinin azaltılmasıyla sınırlı kalmamakta; aynı zamanda rijitlik süreksizliklerinin dengelenmesi, iç kuvvetlerin kontrollü aktarımı ve doğrusal olmayan davranış senaryoları altında yapının global dinamik tepkisinin iyileştirilmesi gibi çok boyutlu yapısal avantajlar da sağlamaktadır.

Ancak tüm bu olumlu özelliklerine karşın, FVD sistemlerinin gelecekte mühendislik uygulamalarında daha yaygın ve etkili biçimde kullanılabilmesi için; disiplinler arası bilimsel çalışmalara ihtiyaç duyulmakta, tasarım ve analiz yaklaşımlarının geliştirilmesi ile uygulama stratejilerinin açık ve sistematik bir şekilde tanımlanması gerekmektedir.

Bu kapsamda, FVD sistemlerinin gelecekteki mühendislik uygulamaları açısından taşıdığı potansiyel ve araştırmaya açık yönleri aşağıda özetlenmiştir.

✓ **Deneysel ve Prototip Tabanlı Doğrulama Çalışmaları;**

FVD sistemlerinin doğrusal olmayan sınır koşulları altındaki davranışlarının daha iyi anlaşılabilmesi için; büyük ölçekli sarsma tablası testleri, yarı ölçekli saha prototipleri ve çok eksenli deney düzeneği çalışmalarının yaygınlaştırılması gerekmektedir. Bu tür uygulamalar sayesinde, analitik modellerin gerçekçi yapısal tepkilere dayalı olarak kalibre edilmesi ve doğruluğunun artırılması mümkün olacaktır.

✓ **Adaptif ve Yarı-Aktif Kontrol Yaklaşımları ile Entegrasyon;**

FVD sistemlerinin yarı aktif ve tam aktif kontrol teknolojileriyle entegre edilmesi, farklı deprem karakteristiklerine duyarlı ve kendini uyarlayabilen akıllı sönümleme sistemlerinin geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Bu tür hibrit çözümler, yapı davranışının yalnızca pasif değil; aynı zamanda reaktif ve duruma bağlı olarak optimize edilmesini sağlayabilir.

✓ **Sayısal Optimizasyon Teknikleri ve Yapay Zekâ Destekli Tasarım;**

Genetik algoritmalar, parçacık sürü optimizasyonu, makine öğrenmesi ve yapay sinir ağları gibi ileri düzey hesaplama yöntemleri kullanılarak; FVD sistemlerinin yerleşim türleri, konumları ve tasarım parametrelerinin, yapı özelliklerine duyarlı biçimde otomatik olarak optimize edilmesine yönelik yöntemler geliştirilmelidir. Bu yaklaşımlar sayesinde, tasarım sürecinde hesaplama verimliliği artırılabilir, parametrik hassasiyet iyileştirilebilir ve sistemin performansa dayalı olarak özelleştirilmesi sağlanabilir.

✓ **Mevcut Yapıların Performans Tabanlı Güçlendirilmesi;**

Deprem riski yüksek bölgelerde bulunan ve performans yetersizliği tespit edilen mevcut yapıların güçlendirilmesinde, FVD sistemlerinin uygulanabilirliğini esas alan stratejilere yer verilmelidir. Bu kapsamda; yeni uygulama senaryoları, detay çizimleri ve

yerleşim prototipleri oluşturularak sahada kullanılabilecek pratik kılavuzlar hazırlanmalıdır.

✓ **Malzeme ve İmalat Teknolojilerinin Geliştirilmesi;**

FVD sistemlerinde kullanılan viskoz malzemelerin; çevresel koşullara duyarlılık, uzun dönemli dayanım, sıcaklık bağımlılığı ve sızdırmazlık performansı gibi parametreler açısından detaylı olarak araştırılması gerekmektedir. Öte yandan, yerli üretim altyapısının güçlendirilmesine yönelik endüstriyel Ar-Ge süreçlerinin yapılandırılması ve sürdürülebilir imalat teknolojilerinin geliştirilmesi, sistemin yaygın kullanımı açısından kritik öneme sahiptir.

✓ **Ulusal Test Yöntemleri ve Standartların Oluşturulması;**

Türkiye'de FVD sistemlerine özgü kapsamlı bir test standardı ve performans belgelendirme süreci henüz bulunmamaktadır. Bu eksikliği gidermek amacıyla, uluslararası standartlar referans alınarak; yerel koşullara uygun deney yöntemleri, uzun süreli dayanıklılık testleri ve sertifikasyon prosedürleri tanımlanmalı, buna yönelik teknik altyapı ve kurumsal çerçeve yapılandırılmalıdır.

Sonuç olarak, FVD sistemleri yalnızca mevcut mühendislik pratiğinde kullanılan bir çözüm alternatifi değil; aynı zamanda sismik güvenlik odaklı yapı tasarımına yönelik geleceğin vizyonunda da önemli bir bileşen olarak değerlendirilmektedir. Bu sistemlerin çok boyutlu geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması, bir yandan akademik araştırmalara yeni açılımlar kazandırmakta; diğer yandan sektörel düzeyde yenilikçi uygulamalara zemin hazırlamaktadır. Özellikle disiplinler arası iş birlikleri ve uygulama odaklı çalışmalarla geliştirilecek yeni nesil çözümler, depreme karşı dirençli ve güvenli yapı stokunun oluşturulmasına önemli katkılar sağlayacaktır.

5.2.3. Çelik-Beton Kompozit Taşıyıcı Sistemlerde Akışkan Viskoz Sönümleyici Sistemlerinin Uygulanması

Yüksek yapılarda sismik performansı artırmak için yalnızca taşıyıcı sistemin dayanım ve süneklik özelliklerine odaklanmak yeterli değildir; aynı zamanda deprem enerjisinin yapı boyunca dengeli ve kontrollü şekilde dağıtılmasını sağlayacak ilave çözümler de geliştirilmelidir. Bu doğrultuda, çelik-beton kompozit taşıyıcı sistemler, farklı yapı elemanlarının mekanik avantajlarını bir araya getiren hibrit yapılar olarak, yüksek yapılarda tercih edilen çağdaş taşıyıcı sistemler arasında yer almaktadır. Bu sistemlerin deprem etkileri altındaki performansını daha üst seviyeye taşımak amacıyla, akışkan viskoz sönümleyici sistemlerle desteklenmeleri, doğrudan uygulamaya yönelik etkili bir çözüm yaklaşımı olarak öne çıkmaktadır.

Bu doğrultuda, akışkan viskoz sönümleyiciler (Fluid Viscous Dampers – FVD); uygulama kolaylığı, yüksek enerji sönümleme kapasitesi ve taşıyıcı sistemle uyumlu çalışabilirliği sayesinde, çelik-beton kompozit taşıyıcı sistemlere sahip yüksek yapılarda etkili bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. FVD’lerin, özellikle “chevron” uygulama türünün çerçeve sistemlerine entegre edildiği Zenginleştirilmiş Taşıyıcı Sistem (ZTS) konfigürasyonlarında, yatay yer değiştirme taleplerini azalttığı ve iç kuvvet dağılımlarını dengelediği, tez kapsamında gerçekleştirilen analizlerle tespit edilmiştir.

FVD sistemlerinin çelik-beton kompozit yapılarda uygulanması, aşağıdaki temel yapısal katkıları sağlamaktadır:

- ✓ Yatay yer değiştirme ve görelî kat ötelemeleri taleplerinin azaltılması,
- ✓ Kesme kuvveti ve moment dağılımlarının dengelenmesi,
- ✓ Rijitlik süreksizliklerinin etkisinin yumuşatılması,
- ✓ Yapının sismik enerji sönüm kapasitesinin artırılması.

FVD sistemlerinin taşıyıcı sistemlere entegrasyonu sürecinde, yerleşim konfigürasyonlarının belirlenmesi; yapının sismik etkiler altındaki hangi yapısal davranışının disipline edilmek istendiğine bağlı olarak şekillendirilmelidir. Bu bağlamda, yerleşim stratejisi ve uygulama tipi (chevron, diyagonal, kompakt vb.), her yapı özelinde

tanımlanmış mühendislik performans hedeflerine uygun olarak seçilmeli; yalnızca tipolojik uygulamalara dayalı kalıplaşmış şablon anlayışından kaçınılmalıdır. Uygulama kararları, taşıyıcı sistemin dinamik tepkisini doğrudan etkileyen parametreler dikkate alınarak, yapıya özel analiz çıktıları doğrultusunda yapı mühendisi tarafından verilmelidir.

Ancak bu tür uygulamalarda yalnızca yapısal performans değil, aynı zamanda mimari tasarım gereklilikleri ve yapım maliyetleri de FVD sistemlerinin konfigürasyonlarını belirleyen temel faktörler arasında yer almaktadır. Yüksek yapılarda çerçeve açıklıkları, kat yüksekliği, cephe tasarımı ve iç mekân organizasyonu gibi mimari parametreler, FVD yerleşiminin uygulanabilirliğini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, FVD sistemlerinin yerleştirilmesi sürecinde, mimari işlevselliği gözeten çözümler geliştirilmesi; sistemin uygulanabilirliğini ve kabul edilebilirliğini artırmak açısından kritik öneme sahiptir.

Benzer şekilde, FVD sistemlerinin seçimi, boyutlandırılması ve yapı boyunca dağılımı belirlenirken; malzeme, işçilik ve bağlantı maliyetleri de dikkate alınmalıdır. Özellikle büyük açıklıklara sahip yapılarda ya da çok sayıda sönümleyici eleman gerektiren sistemlerde toplam maliyet önemli ölçüde artmakta; bu durum, tasarım kararlarını ve yatırım tercihlerini doğrudan etkilemektedir. Dolayısıyla, FVD sistemlerinin konfigürasyonları yalnızca performansa dayalı olarak değil, aynı zamanda maliyet etkinliği temelinde, çok boyutlu bir optimizasyon yaklaşımıyla belirlenmelidir.

Bu çalışmada her ne kadar burulma davranışı doğrudan ele alınmamış olsa da ileride gerçekleştirilecek araştırmalarda FVD sistemlerinin, asimetrik plan geometrisine ya da düzensiz rijitlik dağılımına sahip yapılarda gözlemlenen burulma etkileri üzerindeki potansiyel katkısının detaylı biçimde incelenmesi önerilmektedir. Özellikle rijitlik merkezi ile kütle merkezi arasındaki sapmanın arttığı sistemlerde, FVD bileşenlerinin burulma davranışını dengeleme potansiyeli, gelecekteki çalışmalar açısından önemli bir araştırma alanı olarak değerlendirilmektedir.

Ayrıca, FVD sistemlerinin farklı temel türleriyle (radye, kazıklı temel vb.) birlikte değerlendirilmesi, yapı-zemin etkileşimli dinamik analizlerde dikkate alınması gereken

önemli bir diğer konudur. Temel sistemlerinin rijitliği ve yer değiştirme karakteristikleri, sönümleyici elemanların davranışını doğrudan etkileyebilmektedir. Bu nedenle, gelecekte yapılacak çalışmalarda FVD sistemleri ile temel davranışı arasındaki etkileşimin kapsamlı biçimde incelenmesi gerekmektedir.

FVD sistemlerinin yüksek yapılarda etkin ve başarılı biçimde uygulanabilmesi için aşağıdaki tasarım esaslarına dikkat edilmesi gerekmektedir:

- ✓ Taşıyıcı sistem ile FVD bağlantı detaylarının uyumlu ve entegre şekilde çözümlenmesi,
- ✓ FVD yerleşiminin yapı yüksekliği boyunca sistematik ve dengeli biçimde planlanması,
- ✓ Zemin koşulları ve temel sisteminin FVD performansı üzerindeki etkilerinin analiz sürecine dâhil edilmesi,
- ✓ Performans, mimari bütünlük ve maliyet arasında denge kurularak tasarım kararlarının yönlendirilmesi.

Sonuç olarak, akışkan viskoz sönümleyici (FVD) sistemlerinin çelik-beton kompozit taşıyıcı sistemlere sahip yüksek yapılarda uygulanması; yalnızca sismik performansın iyileştirilmesine değil, aynı zamanda mimari bütünlüğün korunması, ekonomik uygulanabilirliğin sağlanması ve sürdürülebilir mühendislik hedeflerine ulaşılmasına katkı sağlayan bütüncül bir tasarım yaklaşımı kapsamında ele alınmalıdır. Bu sistemlerin tasarıma entegrasyonu, teknik gerekliliklerin yanı sıra kullanıcı beklentileri ve çağdaş yapı üretim anlayışları doğrultusunda çok boyutlu bir perspektifle değerlendirildiğinde; yönetmeliklerin ötesine geçen performans sergileyen, sismik tehlikelere karşı daha dirençli, güvenli ve sürdürülebilir kentsel alanların oluşturulmasına anlamlı katkılar sağlanabilir.

KAYNAKLAR

- T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Türk Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018), Resmî Gazete, 30364 (Mükerrer), 2018.
- Uluslararası Sivil Havacılık Teşkilatı (ICAO), Heliport Manual-Doc 9261-AN/903, Uluslararası Sivil Havacılık Teşkilatı, Kanada, 2018.
- T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik (ÇYTHYE-2016), Resmî Gazete, 29848, 2016.
- Türk Standartları Enstitüsü (TSE), Yapı Elemanlarının Boyutlandırılmasında Alınacak Yüklerin Hesap Değerleri (TS 498), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1997.
- Al Agha, W. ve Umamaheswari, N., 2020. Comparative Study on Seismic Performance of Reinforced Concrete Building with and Without Fluid Viscous Dampers, International Journal of Engineering Research And Management.
- Amanullah, ve Arora, S., 2019. Optimization of Bracing and Viscous Damper and Comparison of Fluid Viscous Damper and Bracing System for Stabilization of High-Rise Building, International Journal of Civil Engineering and Technology, 10(3), 1978-1986.
- Altieri, D., Tubaldi, E., De Angelis, M., Patelli, E. ve Dall'Asta, A., 2018. Reliability-Based Optimal Design of Nonlinear Viscous Dampers for the Seismic Protection of Structural Systems, Bulletin of Earthquake Engineering, 16, 963–982.
- Amini, H., 2018. Kompozit Yapıların Dinamik Davranışlarının Geleneksel Yapılar ile Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Asgarkhani, N., Kazemi, F., Jankowski, R. 2023. Optimal Retrofit Strategy Using Viscous Dampers Between Adjacent RC and SMRFs Prone to Earthquake-Induced Pounding, Archives of Civil and Mechanical Engineering.
- Aye, S. M. ve Aung, K. M., 2014. Comparative Study on Seismic Response of RC Structure Using Viscous Dampers and Viscoelastic Dampers, International Journal of Scientific Engineering and Technology Research, 3(8), 1468-1478.

- Bao, L., Chen, J., Qian, P., Huang, Y., Tong, J. ve Wang, D., 2015. The New Structural Design Process of Supertall Buildings in China, *International Journal of High-Rise Buildings*, 4(3), 219-226.
- Brown, A., Uno, M., Stratford, J., Thompson, J., 2015. Steel Moment Frame with Supplemental Fluid Viscous Dampers – 12 Moorhouse Avenue: A Case Study, *Steel Innovations Conference*, Auckland.
- Canney, N., Klembczyk, A., Eriksen, K. 2023. Prescriptive Design of Damped Moment Frames, *STRUCTURE Magazine*, November, 12-16.
- Canney, N.E., Burkett, L.A., Camajani, J. 2024. Improving Structural Performance of an Existing EBF and Moment Frame Structure Using Fluid Viscous Dampers, *NZSEE 2024 Annual Conference*, Paper 0097.
- Celep, Z. ve Özuygur, A. R., 2017. Yüksek Binaların Yapısal Tasarımı, *İnşaat Mühendisleri Odası (İMO) Bursa Bülteni*.
- Chikhalekar, D. A. ve Murudi, M. M., 2015. Seismic Performance of Structure with Fixed Base, Base Isolated Structure and Structure with Viscous Damper, *International Journal of Research in Engineering and Technology*.
- Deepthi Sharon 2022. Investigation of the Effectiveness of TMD on an Asymmetrical Building Frame Fitted with FVD, *PES University*.
- De Domenico, D. ve Hajirasouliha, I. 2021. Multi-level Performance-Based Design Optimisation of Steel Frames with Nonlinear Viscous Dampers, *Bulletin of Earthquake Engineering*.
- Del Gobbo, G. M., 2019. Placement of Fluid Viscous Dampers to Improve Total-Building Seismic Performance, *CSCE Annual Conference*.
- Doğangün, A. 2024. Betonarme Yapıların Hesap ve Tasarımı. *Birsan Yayınevi*, 88, İstanbul.
- Duflot, P. ve Taylor, D., 2018. Experience and Practical Considerations in the Design of Viscous Dampers, *Taylor Devices Europe & Taylor Devices Inc*.
- Emre, S., 2010. Çelik-Beton Karma Yapıların Sismik Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Anabilim Dalı.

- Erickson, S. 2024. Necessity Is the Mother of Invention: How Challenges for The Artise Turned into a Willingness to Create Something New. STRUCTURE Magazine, November, 32–35.
- Ghanbari, A., Mousavi, H., Almohammad-albakkar, M., Habibi, M. R. 2022. Seismic Responses of Multi-Storey Structures Equipped with Linear and Nonlinear Viscous Dampers: A Comparison Study, SSRN Electronic Journal.
- Hatipoğlu, Y. S. ve Düzgün, O. A., 2020. Investigation of the Effectiveness of Viscous Dampers Connected to Adjacent Buildings on Dynamic Behavior Under Soil-Structure Interaction Effects. Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences, 11(1), 51–72.
- Hattab, M. 2022. Farklı Kompozit Kolon Sistemlerinin Deprem Performanslarının Karşılaştırmalı İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Hiçyılmaz, M., 2017. Yapısal Düzensizliğe Sahip Çelik Yapılarda Viskoz Sönümleyici Etkilerinin Araştırılması ve Yeni Bir Bağlantı Tipi Önerisi, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi.
- Hiçyılmaz, M., Doğan, M. ve Gönen, H., 2019. Viskoz Sönümleyicilerin Burulma Düzensizliği Bulunan Çelik Yapılardaki Etkilerinin İncelenmesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 19(2019), 814-823.
- Huang, X., 2018. Strategic Placement of Viscous Dampers in Steel Buildings under Strong Earthquake Ground Motions, PhD Thesis, University of Warwick.
- Hussain, D., Shukla, A., Bansal, S., Gupta, N., Charyulu, S. V., Jose, S., Jain, A., Parmar, A., ve Laith, Z. N. 2024. Seismic Parametric Analysis of RC Multi-Storied Buildings with and Without Fluid Viscous Dampers, E3S Web of Conferences, 529.
- İnce, G., İnce, H. H. ve Kaya, F., 2015. Kompozit Yapı Sistemlerinin İncelenmesi, Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 6(1): 43-47.
- Javaid, K. ve Verma, N. 2023. Vibration Control of Seismic Forces Using Viscous Dampers and Buckling Restrained Braces in Irregular Composite Buildings, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1110(1).

- Kasai, K., Ito, H., Ooki, Y., Hikino, T., Kajiwar, K., Motoyui, S., Ozaki, H., ve Ishii, M., 2010. Full-Scale Shake Table Tests of a 5-Story Steel Building with Various Dampers, 7th International Conference on Urban Earthquake Engineering & 5th International Conference on Earthquake Engineering.
- Li, J. ve Wang, W. 2022. Seismic Design of Low-Rise Steel Building Frames with Self-Centering Hybrid Damping Connections, Resilient Cities and Structures, 1(2022), 10-22.
- Mathew, L. ve Prabha, C., 2014. Effect of Fluid Viscous Dampers in Multi-Storeyed Buildings, IMPACT: International Journal of Research in Engineering & Technology, 2(9), 59-64.
- Mir, M. ve Moon, K. S., 2018. Advances in Structural Systems for Tall Buildings: Emerging Developments for Sustainability and Efficiency, Buildings, 8(104).
- Olabi, M. N., Çağlar, N., Kısa, M. H. ve Yüksel, S. B., 2018. Kompozit Perde Duvarların Döngüsel Yanal Yükler Altındaki Davranışının İncelenmesi, 6. Uluslararası Mühendislik ve Bilimde Yenilikçi Teknolojiler Sempozyumu (ISITES2018), Alanya, Antalya, Türkiye.
- Özer, E. 2024. Akışkan Viskoz Sönümleyicilerin Bitişik Nizamlı Betonarme Binalarda Gerekli Boşluk Mesafesine Etkisi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 13(4), 1231-1239.
- Öztürk, D. 2022. Viskoz Sönümleyici Elemanların Mevcut Bir Okul Yapısının Sismik Davranışı Üzerindeki Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Pham, T. B. ve Vu, N. Q. 2021. Effectiveness of Fluid Viscous Dampers for Steel Frame Building Subjected to Earthquake Load, E3S Web of Conferences, 263.
- Ras, A. ve Boumechra, N., 2016. Seismic Energy Dissipation Study of Linear Fluid Viscous Dampers in Steel Structure Design, Alexandria Engineering Journal, 55, 2821–2832.
- Reddy, C. R. K., Ghorpade, V. G., ve Rao, H. S., 2017. Analyze and Design of a High-Rise Unsymmetrical Building with Dampers, The Asian Review of Civil Engineering.

- Santhosh Kumar, P., Vasudeva Naidu, M., Madhan Mohan, S. ve Sreenatha Reddy, S., 2016. Application of Fluid Viscous Dampers in Multi-Story Buildings, International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, 5(9), 17064-17069.
- Santa Ana, P., Santa Ana, L. ve Baez, J., 2017. Seismic Engineering Technology: Changing the Face of Architecture, 16. Dünya Deprem Mühendisliği Konferansı (16WCEE), Santiago, Şili, 9-13 Ocak.
- Sesigür, H., 2013. Çelik Yapılar: Yüksek Binalar ve Taşıyıcı Sistem Düzenleme İlkeleri, İstanbul Teknik Üniversitesi Mimarlık Fakültesi, Yapı ve Deprem Mühendisliği Çalışma Grubu.
- Shanmuga Priya, D., Cinitha, A., Umesha, P. K. ve Iyer, N. R., 2015. A Critical Review on Enhancing the Seismic Response of Buildings with Energy Dissipation Methods, Journal of Structural Engineering, 42(3), 78-88, Ağustos-Eylül.
- Shariati, A., Kamgar, R. ve Rahgozar, R., 2020. Optimum Layout of Nonlinear Fluid Viscous Damper for Improvement the Responses of Tall Buildings, International Journal of Optimization in Civil Engineering, 10(3), 411-431.
- Şenoğlu, G., 2016. Kompozit Yüksek Bir Yapının Deprem Performansının Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Yöntem Kullanılarak Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Mühendisliği Programı, İstanbul.
- Sinha, A. K. ve Singh, S., 2017. Structural Response Control of RCC Moment Resisting Frame Using Fluid Viscous Dampers, International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCET).
- Suarez, L. E. ve Gaviria, C. A., 2015. Dynamic Properties of a Building with Viscous Dampers in Non-Proportional Arrangement, Structural Engineering and Mechanics, 55(6), 1241-1260.
- Szolomicki, J. ve Golasz-Szolomicka, H., 2019. Technological Advances and Trends in Modern High-Rise Buildings, Buildings, 9(193).
- Taylor Devices, Inc. 2023. Test Report for 50 Tonne Force Viscous Damping Devices, Internal Technical Report.
- Taylor Devices, Inc., 2020. Earthquake Protective Systems for Buildings, Bridges, and Other Structures. Taylor Devices, Inc.

Taylor Devices, Inc., 2020. The Application of Energy Dissipating Damping Devices to an Engineered Structure or Mechanism. Taylor Devices, Inc.

Taylor Devices, Inc., Taylor Devices Official Website, [Çevrimiçi] Erişim Adresi: <https://www.taylordevices.com/>, Erişim tarihi: 15 Mart 2025.

Tubaldi, E., Gioiella, L., Scozzese, F., Ragni, L., ve Dall'Asta, A., 2020. A Design Method for Viscous Dampers Connecting Adjacent Structures, *Frontiers in Built Environment*, 6.

Vatansever, C. ve Şimşek, Y. E. 2021. Taşıyıcı Sistemi Beton Dolgulu Kompozit Kolonlar ve Çelik Kirişlerden Oluşan Çok Katlı Bir Binanın Tasarımı ve Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Analizi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(3), 264-273.

Wang, S. ve Mahin, S., 2016. Seismic Upgrade of an Existing Tall Building by Different Energy Dissipation Devices, *SEAOC 2016 Convention Proceedings*.

Welch, D.P., DeBock, D.J., Canney, N.E., Harris, J.R. 2022. Practical Design Procedure for Steel Moment Frames with Fluid Viscous Dampers, *SEAOC 2022 Convention Proceedings*.

Wu, X., Zhou, D., Huang, T. 2021. Structural Analysis of a School Building with Viscous Dampers Applied, *Journal of Physics: Conference Series*.

Yaman, A. ve İlerisoy, Z. 2024. İstanbul'daki Yüksek Binaların Depreme Dayanıklılığını Belirleyen Tasarım Kriterleri Üzerine Bir İnceleme, *Mimarlık ve Bilimsel Araştırmalar Dergisi*, 6(1), 45-58.

Yazar, Y., 2020. Çelik Gömülü Kompozit Kolonların Dayanım ve Süneklik Özellikleri Üzerine Bir İnceleme, *Journal of Innovative Science and Technology*.

Yükselen, R. E., 2015. Seismic Performance of Steel-Concrete Composite Building with Reinforced Concrete Shear Walls, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Mühendisliği Programı, İstanbul.

Zhang, C., An, D. ve Zhu, L., 2019. Axial Compressive Behavior of Steel-Damping-Concrete Composite Wall, *Applied Sciences*, 9(21), 4679.