PREFABRİK SANAYI YAPILARIN SIVI VİSKOZ SÖNÜMLEYİCİ İLE GÜÇLENDİRİLMESİ

JOLTAI KHONAIV

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PREFABRİK SANAYI YAPILARIN SIVI VİSKOZ SÖNÜMLEYİCİ İLE GÜÇLENDİRİLMESİ

Joltai KHONAIV
0009-0000-4994-3294

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Ömer TİMURAĞAOĞLU
(Danışman)

Prof. Dr. Ramazan LİVAOĞLU
(İkinci danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2025
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

PREFABRİK SANAYI YAPILARIN SIVI VİSKOZ SÖNÜMLEYİCİ İLE GÜÇLENDİRİLMESİ

Joltai KHONAIV

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Ömer TİMURAĞAOĞLU
İkinci danışman: Prof. Dr. Ramazan LİVAOĞLU

Deprem sonrası sahada yapılan hasar çalışmaları Türkiye'de ve Dünyada yaygın olarak kullanılan pimli bağlantıya sahip endüstriyel betonarme prefabrik yapıların deprem performansının zayıf olmasının çoğunlukla birleşim bölgesi detaylarının eksikliğinden kaynaklandığını otaya çıkarmıştır. Bu tür yapıların deprem gibi yatay yükler altındaki davranışlarının iyileştirilmesi ve yeni yapıların birleşim bölgesi detaylarının geliştirilmesi hem yapısal hem ekonomik kayıpların önüne geçmek için önem arz etmektedir. Bu tez çalışmasında tek katlı tek açıklıklı betonarme prefabrik sanayi yapısının deprem performansına dolgu duvarın ve sıvı viskoz sönümleyicilerin (SVS) etkisi sayısal modelleme yardımıyla araştırılmaktadır. Dolgu duvarsız, dolgu duvarlı, değiştirilmiş-toggle ve diyagonal sönümleyici konfigürasyonlar olmak üzere oluşturulan altı farklı yapı modeli üzerinde zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Her biri TBDY (2018)'e göre ölçeklenen ve 3 farklı zemin ve lokasyon için deprem kayıt çiftleri (toplamda 33 adet deprem çifti) seçilmiştir. Yapısal modelde kolonlara belirli aralıklarla plastik mafsallar tanımlanmıştır. Guse-çatı makası birleşiminde doğrusal olmayan moment-dönme ve kuvvet-deplasman ilişkileri literatürde önerilen ve deneysel çalışmalara bağlı olarak belirlenen ampirik bağıntılar kullanılarak tanımlanmıştır. Aşık-çatı makası birleşiminde ise kuvvet-deplasman davranışı tanımlanmıştır. Yapının deprem performansı, göçmenin önlenmesi performans sınırına karşılık gelen şekil değiştirme kapasiteleri kullanılarak hesaplanan talep/kapasite (T/K) oranlarına dayalı olarak değerlendirilmektedir. Performans parametreleri; kolonlardaki beton/donatı birim şekil değiştirmeleri, guse–çatı makası bağlantısındaki moment–dönme ve kesme kuvvetleri, aşık–çatı makası bağlantısındaki kesme kuvveti, kolon üst ucundaki göreli kat ötelemesi ile yapıya giren ve sönümlenen enerji bileşenlerini içermektedir. Elde edilen sonuçlar, dolgu duvarların ve özellikle kullanılan SVS konfigürasyonlarının yapısal talepleri önemli ölçüde azalttığını ve buna bağlı olarak talep/kapasite (T/K) oranlarında dikkate değer bir düşüş sağladığını göstermektedir. Bu etkinin özellikle orta ve düşük deprem tehlike düzeylerinde daha belirgin olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Prefabrik Yapı, Sıvı Viskoz Sönümleyici, Dolgu Duvar, Performans Analizi, Güçlendirme
2025, xix + 152 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

RETROFITTING OF PREFABRICATED INDUSTRIAL STRUCTURES WITH FLUID VISCOUS DAMPERS

Joltai KHONAIV

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Ömer TİMURAĞAOĞLU
Co-Supervisor: Prof. Dr. Ramazan LİVAOĞLU

Post-earthquake field damage assessments have revealed that the poor seismic performance of industrial reinforced concrete precast structures with pinned connections—commonly used both in Türkiye and worldwide—is predominantly attributable to deficiencies in connection region detailing. Improving the behavior of such structures under lateral loads, such as those induced by earthquakes, and enhancing the detailing of connection regions in new constructions are of critical importance to mitigate both structural and economic losses. In this thesis, the influence of infill walls and fluid viscous dampers (FVDs) on the seismic performance of a single-story, single-span reinforced concrete precast industrial building is investigated through numerical modeling. Six different structural models are developed, representing configurations without infill walls, with infill walls, and with modified toggle and diagonal damper arrangements. Nonlinear time-history dynamic analyses are conducted on these models. A total of 33 earthquake records, each scaled in accordance with the Turkish Building Seismic Code (TBDY, 2018), were selected for analysis. The records were scaled for three different soil conditions and locations, which have different hazard levels. In the structural model, fiber-based distributed plasticity models are assigned to the columns at predefined intervals. At the gusset–roof beam connection, nonlinear moment–rotation and force–displacement relationships are defined using empirical correlations proposed in the literature and derived from experimental studies. The seismic performance of the structure is evaluated based on demand-to-capacity (D/C) ratios, calculated using the deformation capacities corresponding to the collapse-prevention performance limit. Performance parameters include the concrete and reinforcement strains in columns, the moment–rotation and shear forces at the gusset–roof beam connection, the shear force at the purlin–roof beam connection, the relative story drift at the top of the column, and the components of input and dissipated energy. The incorporation of the considered fluid viscos damper (SVS) configurations considerably reduces the seismic demand on structural components, which in turn leads to a noticeable decrease in demand-to-capacity (D/C) ratios, particularly at moderate and low hazard levels.

Keywords: Prefabricated Structure, Fluid Viscous Damper, Infill Wall, Performance Analysis, Retrofitting
2025, xix + 152 pages.

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmam süresince gösterdiği destek, sabır ve değerli tavsiyeleri ile yoğun programına rağmen tez sürecimde her zaman hızlı geri dönüşleri ve desteğiyle çalışmamın verimli ilerlemesine büyük katkı sağlayan tez danışmanım Dr.Öğr.Üyesi.Mehmet Ömer TİMURAĞAOĞLU'na şükranlarımı sunarım. Ayrıca, yüksek lisans eğitimim boyunca derslerimde ve tez çalışmamda sorduğum sorulara her zaman sabırla ve memnuniyetle yanıt veren, sadece çalışma disiplini kazandırmakla kalmayıp araştırmacı bakış açısı kazanmamı sağlayan ve farklı düşünme yollarını öğreten, yüksek lisans tez çalışmam süresince bana sunduğu tüm imkânlar için eş danışmanım Prof.Dr.Ramazan LİVAOĞLU'na teşekkür ederim.

Lisans ve yüksek lisans dönemlerimde bana verdiği değerli tavsiyeler ve destekleri için hocam Dr.Enkhbaatar Dugersuren'e teşekkür ederim. Ayrıca, İnşaat Mühendisliği bölümünde tanıştığım ilk hocalarımdan olup danışman hocamla tanışmama vesile olan ve o günden bu yana desteğini esirgemeyen Dr.Cavit SERHATOĞLU'na teşekkür ederim. Yuksek lısans tez çalışmam süresince tüm sorularıma sabırla yanıt veren ve farklı bakış açılarıyla mühendislik perspektifimi genişleten ayrıca her zaman değerli önerileriyle bilgi birikimimi artırmama destek olan yüksek mühendis ağabeylerim Yük. İnş. Müh. Özkan HAKAN, Yük. İnş. Müh. Ali Haydar BAYRAM ve Yük. İnş. Müh. Muhammet YILMAZ 'a şükranlarımı sunarım.

Yurtdışı Türkler ve Akraba Topluluklar Başkanlığına (YTB), Türkiye'de yüksek lisans yapmamı mümkün kılan maddi ve manevi destekleri için teşekkür ederim. Ayrıca, başvuru dosyamın hazırlanmasında destek olan Seyfullin ağabey'e şükranlarımı sunarım.

Hayatım boyunca, ne kadar uzakta olsalar da bana güvenleri, inançları ve verdikleri manevi ve maddi desteklerden dolayı sevgili aileme ve değerli amcalarıma en içten teşekkürlerimi sunarım. Çalışma sürecim boyunca, yakınımda ya da uzakta olmalarına bakılmaksızın daima desteklerini hissettiren, motivasyon kaynağım olan tüm değerli dostlarıma ve arkadaşlarıma yürekten teşekkür ederim.

11/08/2025 Joltai KHONAIV

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET viii
ABSTRACT ix
ÖNSÖZ x
İÇİNDEKİLER xi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ xv
ÇİZELGELER DİZİNİ xix
1. GİRİŞ 1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI 7
2.1. Prefabrik Yapılar 7
2.1.1. Yapısal Elemanlar 7
2.1.2. Yapısal olmayan elemanlar 11
2.1.3. Bağlantı elemanları ve şekilleri 15
2.1.4. Kiriş-kolon bağlantıları 18
2.1.5. Panel-panel bağlantıları 22
2.2. Sönümleyiciler 24
2.2.1. Sıvı viskoz sönümleyiciler 29
2.2.2. Viskoelastik sönümleyiciler 37
2.2.3. Sürtünme sönümleyiciler 40
2.2.4. Burkulması önlenmiş çaprazlar 41
2.2.5. Metalik sönümleyiciler 42
2.3. Prefabrik yapıların performans hedefleri 45
2.3.1. TBDY (2018)'e göre performans hedefleri 45
2.3.2. ASCE 41-17'ye göre performans hedefleri 47
2.3.3. Eurocode'a göre performans hedefleri 51
2.3.4. Performans hedeflerinin karşılaştırılması 53
2.4. Kaynak Araştırması 53
2.4.1. Prefabrik yapılar ile ilgili yapılan çalışmalar 54
2.4.2. Dolgu duvar ile ilgili yapılan çalışmalar 57
2.4.3. Sıvı viskoz sönümleyici ile ilgili yapılan çalışmalar 58
3. MATERYAL ve YÖNTEM 62
3.1. Deprem Yer Hareketlerinin Seçilmesi ve Ölçeklendirilmesi 62
3.1.1. Yer hareketi kayıtlarının seçimi 62
3.1.2. Yer hareketi kayıtlarının ölçeklendirilmesi 65
3.2. Prefabrik yapının modellenmesi 67
3.2.1. Malzeme 68
3.2.2. Yapısal elemanlar 74
3.2.3. Düğüm noktaları 78
3.2.4. Dolgu duvar 81
3.2.5. Sıvı viskoz sönümleyici 87
3.2.6. Yapısal Sönüm 89
3.2.7. Yer hareketinin tanımlanması 90
4. BULGULAR VE TARTIŞMA 93
4.1. Model dinamik karakteristiklerinin değerlendirilmesi 95

4.2. Kolon T/K oranlarının değerlendirilmesi 97
4.3. Göreli kat ötelemesi T/K oranlarının değerlendirilmesi 100
4.4. Guse-çatı makası T/K oranlarının değerlendirilmesi 113
4.5. Aşık-çatı makası T/K oranlarının değerlendirilmesi 117
4.6. Dolgu duvar T/K oranlarının değerlendirilmesi 118
4.7. Enerji grafiklerinin değerlendirilmesi 119
4.8. Sıvı Viskoz Sönümleyicilerin kuvvet-deplasman ilişkileri 125
4.9. Guse-çatı makas bağlantı davranışı 130
4.10. Aşık-çatı makas bağlantı davranışı 138
5. SONUÇLAR 141
KAYNAKLAR 144
ÖZGEÇMİŞ 153

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
A	Çapraz Elemanın Alanı
A_{os}	Spiral/Sargı Donatısının Alanı
A_{sh}	Gözönüne Alınan Doğrultuda Enine Donatının Alanı
b_0	Sargı Donatısı Eksenlerinden Ölçülen Sargılı Beton Genişliği
b_k	Dik Doğrultudaki Çekirdek Boyutu
C_d	Sönümleme Sabiti
d_b	Boyuna Donatı Çapı
D	Spiral/Sargı Donatısı Eksenleri Arasındaki Uzaklık
d_m	Duvar Diyagonal Uzunluğu
E_c	Betonun elastisite modülü
E_d	Tasarım Kuvveti
E_s	Donatı çeliğinin elastisite modülü
f	Büyütme Katsayısı
f_{ck}	Beton Karakteristik Basınç Dayanımı
f_c	Sargılı betonda beton basınç gerilmesi
f_{cc}	Sargılı beton dayanımı
f_{co}	Sargısız betonun basınç dayanımı
f_e	Etkili sargılama basıncı
f_s	Donatı çeliğindeki gerilme
f_{sy}	Donatı çeliğinin akma dayanımı
f_{su}	Donatı çeliğinin kopma dayanımı
f_{yw}	Enine donatının akma dayanımı
F	Sönümleme Kuvveti
I_c	Kolonun Atalet Momenti
k_e	Sargılama Etkinlik Katsayısı
K_d	Sönümleyicinin Rijitliği
K_D	Toplam Etkin Rijitlik
K_b	Çapraz Elemanının Rijitliği
L_p	Plastik Mafsal Boyu
L_s	Kesme Açıklığı
N_d	Tasarım Eksenel Kuvveti
R_d	Kayma Direnci
V	Piston Hareket Hızı
w_{we}	Etkin Sargı Donatısının Mekanik Donatı Oranı
w	Eşdeğer Basınç Çubuğu Etkili Genişliği
ρ_{sh}	Gözönüne Alınan Doğrultuda Enine Donatının Hacimsel Oranı
s	Enine Donatı Aralığı veya Spiral Adımı
θ	Diyagonal Çubuğun Yatayla Yaptığı Açı
$\emptyset_u$	Göçme Öncesi Toplam Eğriliği
$\emptyset_y$	Akma Eğriliği
α_{se}	Sargı Donatısı Etkinlik Katsayısı
α_{vd}	Hız Üssü
ξ	Sönüm Oranı
ρ_s	Toplam enine donatının hacimsel oranı

ρ_x, ρ_y	İlgili doğrultulardaki enine donatı hacim oranı
ε_c	Beton basınç birim şekildeğiştirmesi
ε_{cu}	Sargılı betondaki maksimum basınç birim şekildeğiştirmesi
ε_{sy}	Donatı çeliğinin akma birim şekildeğiştirmesi
ε_s	Donatı çeliğinin pekleşme başlangıcındaki birim şekildeğiştirmesi
ε_{su}	Donatı çeliğinin kopma birim şekildeğiştirmesi

Kısaltmalar	**Açıklama**
ASCE	Amerikan İnşaat Mühendisliği Topluluğu
BPS	Betonarme Prefabrik Sanayi Yapıları
BÖÇ	Burkulması Önlenmiş Çapraz Eleman
CP	Collapse Prevention
DSDV	Diyagonal Sönümleyici Duvar Var
DL	Damage Limitation
EC8/3	Eurocode 8 Bölüm 3
FEMA	Federal Emergency Management Agency
GÖ	Göçmenin Önlenmesi
IO	Immediate Occupancy
KH	Kontrollü Hasar
LS	Life Safety
MAB	Moment Aktaran Bağlantılar
MAB1	Islak Betonarme Kolon-Kiriş Bağlantısı
MAB2	Tam Ardgermeli Kolon-Kiriş Bağlantısı
MAB3	Üstte Islak Betonarme, Altta Kaynaklı Kolon-Kiriş Bağlantısı
MAB4	Manşonlu Ve Pimli Kolon-Kiriş Bağlantısı
MFB	Mafsallı Bağlantılar
MFB1	Mafsallı Pimli Bağlantılar
MFB2	Mafsallı Kaynaklı Bağlantılar
MFB3	Mafsallı Yuvalı Bağlantılar
NC	Near Collapse
SD	Significant Damage
SVS	Sıvı Viskoz Sönümleyici
SYDV	Sönümleyici Yok Duvar Var
SYDY	Sönümleyici Yok Duvar Yok
T/K	Talep/Kapasite Oranı
TBDY	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
TSDV	Toggle Sönümleyici Duvar Var

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 1.1.	2023 Kahramanmaraş depremi'nde prefabrik yapılarda oluşan hasarlar	2
Şekil 2.1.	Tipik tek katlı-tek açıklıklı prefabrik yapı	8
Şekil 2.2.	Prefabrik sanayi yapılarında kullanılan kolon çeşitleri	8
Şekil 2.3.	Kolon, panel, makas ve aşık elemanlarından oluşan çok katlı ve çok açıklıklı prefabrik sanayi yapısı ve yapı elemanları (Yapı, 2025)	10
Şekil 2.4.	Prefabrik kirişlere ait çeşitli örnekler, (Gökhan, 2012)	11
Şekil 2.5.	Dolgu duvarlı çerçevelerin farklı göçme türleri: a) Çerçeve göçmesi, b) Köşe ezilmesi , c) Diyagonal basınç ezilmesi, d) Yatay derz kayması biçimli göçme, e) Diyagonal çatlama kırılması (El-Dakhakhni et al., 2003)	13
Şekil 2.6.	Panellerin düşey birleşimi (Ersoy & Tankut, 1988)	14
Şekil 2.7.	Zayıf düşey ve yatay bağlantı (Ersoy & Tankut, 1988)	15
Şekil 2.8.	Kenetsiz ve kenetli yuvalı tekil temel (Ercan et al., 2018)	16
Şekil 2.9.	Kolon-soketli temel bağlantısı (Negro & Toniolo, 2012)	17
Şekil 2.10.	Kolon-soketli temel bağlantısı (Negro & Toniolo, 2012)	18
Şekil 2.11.	Mafsallı kolon-çatı kiriş pimli bağlantı türü (MFB1) (TBDY, 2018)	19
Şekil 2.12.	Mafsallı kolon-çatı kiriş kaynaklı bağlantı türü (MFB2) (TBDY, 2018)	19
Şekil 2.13.	Mafsallı kolon-çatı kiriş yuvalı bağlantı türü (MFB3) (TBDY, 2018)	20
Şekil 2.14.	Moment aktaran kolon-kiriş ıslak bağlantı türü (MAB1) (TBDY, 2018)	21
Şekil 2.15.	Moment aktaran kolon-kiriş tam ard-germeli (MAB2) ve manşonlu-pimli (MAB4) bağlantı türleri (TBDY, 2018)	21
Şekil 2.16.	Moment aktaran kolon-kiriş üstte ıslak altta kaynaklı bağlantı türü (MAB3) (TBDY, 2018)	22
Şekil 2.17.	TBDY 2018'e göre farklı panel birleşimleri için tipik detaylar (TBDY, 2018)	23
Şekil 2.18.	TBDY 2018'e göre panel-panel birleşimi (TBDY, 2018)	24
Şekil 2.19.	İlave sönümleme sistemleri (Katsimpini vd., 2025)	26
Şekil 2.20.	Aktif kontrol sisteminin temel unsurları (M. Symans & Constantinou, 1995)	26
Şekil 2.21.	Pasif kontrol sisteminin temel unsurları (M. Symans & Constantinou, 1995)	27
Şekil 2.22.	Sıvı viskoz sönümleyici bileşenleri (Lee & Taylor, 2001)	30
Şekil 2.23.	Viskoz sönümleyicilerin kuvvet-hız ilişkisi	31
Şekil 2.24.	Viskoz sönümleyicilerin kuvvet-deplasman ilişkisi	32
Şekil 2.25.	SVS için Maxwell modeli (Taylor Devices, 2024; Yu vd., 2013)	33
Şekil 2.26.	Toggle-Brace (bağlantılı) sisteminin geometrik düzenlemesi (Constantinou et al., 2001)	34

Şekil 2.27. Makas kriko sisteminin geometrik düzenlemesi (Şigaher & Constantinou, 2003). 34
Şekil 2.28. Tek katlı yapılarda doğrusal viskoz sönümleme sistemleri için geometrik büyütme faktörleri ve sönüm oranları (Şigaher & Constantinou, 2003). 35
Şekil 2.29. Yeni ve mevcut yapılarda kullanılan viskoz sönümleyici konfigürasyonları a) Jinbocho ofis binası (Tokyo, Japonya) Yeni yapı b) Portland eyalet üniversitesi öğrenci birliği (Portland, OR) Güçlendirme (Mevcut) c) Olimpiyat binası (Kıbrıs) Yeni yapı d) Yerba buena kulesi (San Francisco, CA) Yeni yapı (Taylor Devices, 2024) 36
Şekil 2.30. Sismik izolatörlerle birlikte ve köprülerde kullanılan viskoz sönümleyici uygulamaları a) Loma Linda üniversitesi tıp merkezi (Loma Linda, CA) Yeni İnşaat b) Boğaziçi 1. Köprüsü (İstanbul, Türkiye) Güçlendirme (Mevcut), (Taylor Devices, 2024; Teknik, 2025) 37
Şekil 2.31. Tipik ve sönümleyici şematik diyagramı (Vatanshenas et al., 2018) 38
Şekil 2.32. Kelvin katı modeli (Christopoulos & Filiatrault, 2006) 38
Şekil 2.33. Viskoelastik sönümleyici yerleştirilmiş tek katlı yapı, (Christopoulos & Filiatrault, 2006) 39
Şekil 2.34. Sürtünme tipi sönümleyici (Damptech, 2025)..... 41
Şekil 2.35. Burkulması önlenmiş çapraz (BÖÇ) (Yue et al., 2019) 42
Şekil 2.36. Metalik (Akma) sönümleyici (MS) (Brant Hydraulics, 2025) 43
Şekil 2.37. Akma cihazlarının yatay destekleme sistemlerinin bir parçası olarak kullanımı (Christopoulos & Filiatrault, 2006)..... 43
Şekil 2.38. Üçgen İlave Sönümleme - İlave Rijitlik (ÜİSİRS) Sistemler (TADAS (Mohammadi vd., 2017; Tsai vd., 1993) 44
Şekil 2.39. ASCE 41-17 yönetmeliğinde tanımlanan kesit hasar sınırları (ASCE/SEI 41-17, 2017)..... 48
Şekil 2.40. EC8/3 yönetmeliğinde tanımlanan kesit hasar sınırları ve bölgeleri 51
Şekil 2.41. EC8/3 yönetmeliğinde tanımlanan dönme sınırları..... 52
Şekil 3.1. SET-1 tasarıma esas 2475 yıl dönüş periyodu için hedef ivme spektrumu 66
Şekil 3.2. SET-2 tasarıma esas 2475 yıl dönüş periyodu için hedef ivme spektrumu 66
Şekil 3.3. SET-3 tasarıma esas 2475 yıl dönüş periyodu için hedef ivme spektrumu 67
Şekil 3.4. Çalışmada seçilen deprem setleri ortalama spektrumlarının karşılaştırılması..... 67
Şekil 3.5. Sargılı ve sargısız beton modelleri 69
Şekil 3.6. Modellemede kullanılan beton modeli 70
Şekil 3.7. Donatı çeliği malzeme modeli TBDY 2018 71
Şekil 3.8. Modellemede kullanılan donatı çeliği modeli 71
Şekil 3.9. Tek katlı prefabrik yapının üç boyutlu model görüntüsü 73
Şekil 3.10. Yapısal elemanlar için plastik davranışın dikkate alındığı idealleştirme yöntemleri (Deierlein vd., 2010)..... 75

Şekil 3.11.	Kolonda plastik davranışın fiber plastik mafsal ile tanımlanması...	76
Şekil 3.12.	Modelde kullanan yapısal elemanların boyut detayları.....	77
Şekil 3.13.	Guse- çatı makas kirişi için tanımlanan kuvvet-deplasman ilişkisi.	80
Şekil 3.14.	Guse- çatı makas kirişi için tanımlanan moment-dönme ilişkisi.....	80
Şekil 3.15.	Aşık-çatı makas kirişi için tanımlanan kuvvet-deplasman ilişkisi ..	81
Şekil 3.16.	Diyagonal çubuğun etkili genişliği, (Timurağaoğlu, 2015)	82
Şekil 3.17.	Eşdeğer basınç çubuğunun genişliği (m).....	84
Şekil 3.18.	Eşdeğer basınç çubuğu için kuvvet-deplasman ilişkisi	85
Şekil 3.19.	Artan Çevrimsel Yük Altında Beton Histerezis Modeli (ETABS , 2024).....	87
Şekil 3.20.	Dolgu duvar modelinde kullanılan kuvvet-deplasman ilişkisi	87
Şekil 3.21.	Toggle SVS'lerin yapıya yerleşim detayı (Livaoglu vd., 2025)	89
Şekil 3.22.	Diyagonal SVS'lerin yapıya yerleşim detayı	89
Şekil 4.1.	SYDY, DSDY ve TSDY modellerine ait mod şekilleri	96
Şekil 4.2.	SYDV modeline ait mod şekilleri	97
Şekil 4.3.	DSDV ve TSDV modellerine ait mod şekilleri.....	97
Şekil 4.4.	Kolon donatısı birim şekil değiştirme ortalama T/K oranları	99
Şekil 4.5.	Kolonda beton birim şekildeğiştirme ortalama T/K oranları	100
Şekil 4.6.	Kolon-çatı makası x yönü göreli kat ötelemesine ait ortalama T/K oranları.....	101
Şekil 4.7.	Kolon-çatı makası y yönü göreli kat ötelemesine ait ortalama T/K oranları.....	102
Şekil 4.8.	Modellerin x yönündeki göreli kat öteleme değerleri; a) SYDY, b) SYDV, c) DSDY, d) TSDY e) DSDV f) TSDV	104
Şekil 4.9.	Modellerin y yönündeki göreli kat öteleme değerleri; a) SYDY, b) SYDV, c) DSDY, d) TSDY c) DSDV, d) TSDV.....	106
Şekil 4.10.	Set-1 RSN778 deprem kaydı için x yönü yer değiştirme–zaman ilişkisi	107
Şekil 4.11.	Set-2 RSN3746 deprem kaydı için x yönü yer değiştirme–zaman ilişkisi	108
Şekil 4.12.	Set-3 RSN1614 deprem kaydı için x yönü yer değiştirme–zaman ilişkisi	109
Şekil 4.13.	Set-1 RSN778 deprem kaydı için y yönü yer değiştirme–zaman ilişkisi	110
Şekil 4.14.	Set-2 RSN3746 deprem kaydı için y yönü yer değiştirme–zaman ilişkisi	111
Şekil 4.15.	Set-3 RSN1614 deprem kaydı için y yönü yer değiştirme–zaman ilişkisi	112
Şekil 4.16.	Guse-çatı makası düzlem içi ortalama kesme deplasmanı T/K oranları.....	113
Şekil 4.17.	Guse-çatı makası düzlem dışı ortalama kesme deplasmanı T/K oranları.....	114
Şekil 4.18.	Guse-çatı makası düzlem içi dönme ortalama T/K oranları.....	116
Şekil 4.19.	Guse-çatı makası düzlem dışı dönme ortalama T/K oranları	116
Şekil 4.20.	Aşık-çatı makası x yönü kesme deplasmanı ortalama T/K oranları	117
Şekil 4.21.	Aşık-çatı makası y yönü kesme deplasmanı ortalama T/K oranları	118
Şekil 4.22.	Dolgu duvar ortalama T/K oranları	119

Şekil 4.23. Set-1 RSN1504 deprem kaydı için enerji grafikleri a) SYDY b) SYDV c) DSDY d) TSDY e) DSDV f) TSDV 120
Şekil 4.24. Global sönüm enerjisi (GDE) ortalama enerji değerleri (%)..... 121
Şekil 4.25. Doğrusal olmayan histeretik enerji (NHE) ortalama enerji değerleri (%) 122
Şekil 4.26. Doğrusal olmayan viskoz sönüm (NVD) ortalama enerji değerleri (%) 123
Şekil 4.27. Doğrusal olmayan NVD kaynaklı sönüm oranı (%) 125
Şekil 4.28. SVS, guse–çatı makası ile aşık–çatı makası bağlantısını temsil eden elemanlar..... 126
Şekil 4.29. Set-1 RSN1508 deprem kaydı için sönümleyici kuvvet–deplasman ilişkisi, a) DSDV, b) TSDV c), DSDY, d) TSDY 128
Şekil 4.30. Set-2 TR3115 deprem kaydı için sönümleyici kuvvet–deplasman ilişkisi, a) DSDV, b) TSDV, c) DSDY, d) TSDY 129
Şekil 4.31. Set-3 RSN881 deprem kaydı için sönümleyici kuvvet–deplasman ilişkisi, a) DSDV, b) TSDV, c) DSDY, d) TSDY 129
Şekil 4.32. DSDV modelinde RSN1208 kaydına ait M2–R2 ve V3-U3 ilişkileri..... 131
Şekil 4.33. Guse-çatı makası düzlem dışı moment-dönme (M2–R2) ilişkisi.... 133
Şekil 4.34. Guse- çatı makası düzlem içi moment-dönme (M3–R3) ilişkisi..... 135
Şekil 4.35. Guse- çatı makası düzlem içi kuvvet-deplasman (V2–U2) ilişkisi . 136
Şekil 4.36. Guse- çatı makası düzlem dışı kuvvet-deplasman (V3–U3) ilişkisi 137
Şekil 4.37. SYDV modelinde RSN1208 kaydına ait V2–U2 ve V3-U3 ilişkileri 138
Şekil 4.38. Aşık-çatı makası x yönü kuvvet-deplasman (V2–U2) ilişkisi..... 139
Şekil 4.39. Aşık-çatı makası y yönü kuvvet-deplasman (V3–U3) ilişkisi..... 140

ÇİZELGELER DİZİNİ

		Sayfa
Çizelge 2.1.	Sönümleyici türlerinin karşılaştırılması	28
Çizelge 2.2.	Farklı konfigürasyonlarda sağlanan sönümlemenin sayısal örnekleri (Christopoulos & Filiatrault, 2006)	35
Çizelge 2.3.	Kesit hasar sınırları için izin verilen birim şekil değiştirme değerleri	46
Çizelge 2.4.	Doğrusal olmayan analizler için modelleme ve kabul kriterleri-betonarme kolonlar (ASCE/SEI 41-17, 2017)	48
Çizelge 2.5.	Doğrusal olmayan analizler için modelleme ve kabul kriterleri-betonarme kirişler (ASCE/SEI 41-17, 2017)	50
Çizelge 2.6.	Performans hedeflerinin karşılaştırılması	53
Çizelge 3.1.	Yapısal analizlerde kullanılan deprem yer hareketi kayıtları ve özellikleri	64
Çizelge 3.2.	Analizde kullanılan Göçmenin Önlenmesi (GÖ) performans seviyesine karşılık gelen sınır değerler	72
Çizelge 3.3.	Modelde tanımlanan yükleme türleri	77
Çizelge 3.4.	Guse- çatı makas kirişi bağlantısı boyutları ve malzeme verileri	79
Çizelge 3.5.	Aşık- çatı makas kirişi bağlantısı boyutları ve malzeme verileri	79
Çizelge 3.6.	Dolgu duvarın özellikleri	84
Çizelge 3.7.	Sıvı viskoz sönümleyici modellerinde kullanılan katsayılar	88
Çizelge 4.1.	Oluşturulan 3B model isimleri ve kısaltmaları	94
Çizelge 4.2.	Modellere ait periyod ve kütle katılım oranları	96
Çizelge 4.3.	Maksimum kuvvet, maksimum deplasman ve sönüm oranı	130

1. GİRİŞ

Betonarme prefabrik yapılar imalat süreçlerinin kolaylığı, inşaat süresinin kısalığı, işçilik kaynaklı hataların azlığı ve genel maliyet etkinliği gibi çeşitli avantajları nedeniyle yaygın olarak tercih edilen yapısal sistemlerdir. Bu sistemlerde yapısal elemanlar fabrika ortamında kontrollü şartlar altında üretilmekte ve şantiyede hızlı bir şekilde birleştirilerek iş gücü ihtiyacında ve buna bağlı maliyetlerde önemli tasarruf sağlanmaktadır (Ersoy, 1987). Bu birleşimler yapılarda çoğunlukla guse-çatı kirişi bağlantısında 1, 2 veya nadiren 4 adet, aşık-çatı makasında ise 1 adet donatı çubuğu/pim yardımıyla sağlanmaktadır. İlk dönemlerde yapılan prefabrik yapılarda gusede mevcut olan donatılara çatı makasının geçirilmesiyle birleşim bölgesi tamamlanırdı. Deprem sonrası yapılan saha araştırmaları ve deneysel çalışmalar bu tür birleşimlerin depreme karşı gösterdiği zayıf performansı açıkça ortaya koydu. Bu aşamadan sonra uygulamada çatı makası pimlerden geçirildikten sonra kalan boşluklara harç betonu dökülerek birleşim bölgesi dayanımlarının arttırılmaya çalışıldığı anlaşılmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalar sayesinde çatı makasının üst noktalarında donatı çubuklarının somun ve pul kullanılarak sabitlenmesi ile prefabrik yapılarda sismik davranışın önemli oranda iyileştirildiği ifade edilebilir. Buna ek olarak birleşim bölgesinde davranışı iyileştirmek için önerilen yöntemlerden biri de çatı makasının oturacağı guseye neoprene ped yerleştirmektir. Yerleştirilen bu neoprene ped sayesinde birleşim bölgesindeki relatif hareketlerde esneklik sağlanarak hasarların azaltılması amaçlanmaktadır.

Yapılan araştırmalara göre 6 Şubat 2023 tarihinde Türkiye'de meydana gelen depremler (Şekil 1.1) başta olmak üzere birçok depremde prefabrik sanayi yapılarının hasar aldığı veya göçtüğü gözlemlenmiştir. Deprem sonrası yapılan incelemeler bu yapılarda hasarın büyük ölçüde yetersiz bağlantı detaylandırmasından kaynaklandığını göstermiştir. Özellikle kiriş-kolon birleşim detayları, ve yetersiz ankraj uygulamaları ve düşük beton kalitesi bu davranışın ortaya çıkmasında önemli bir yer tutmaktadır. Literatürde prefabrik elemanlar arasındaki birleşim bölgelerinde görülen zayıf bağlantıların sismik yükler altında meydana gelen hasarların başlıca nedenlerinden biri olduğu sıkça vurgulanmaktadır (Arslan vd., 2024; Avcil, 2023; Bournas vd., 2014; Ghosh & Cleland, 2012; Hamburger vd., 1988; Iverson & Hawkins, 1994; Liberatore vd., 2013; Muguruma

vd., 1995; Ozden vd., 2014; Sagbas vd., 2024; Savoia vd., 2017; Senel vd., 2024; Sezen & Whittaker, 2006; Toniolo & Colombo, 2012). Bu yapı sistemlerinde en yaygın göçme mekanizmaları arasında çatı kirişlerinin guse veya kısa konsollarla bağlantısındaki ankraj yetersizlikleri ile soket temel sistemlerinde gelişen plastik mafsal davranışları öne çıkmaktadır. Önemli bir bulgu olarak bu yapılardaki hasarın çoğunlukla doğrudan deprem kuvvetlerinden ziyade yer değiştirme taleplerinden kaynaklandığı belirlenmiştir. Bu durum, prefabrik sanayi yapılarının yatay rijitliğinin arttırılması ve mafsallı bağlantıların kullanımının sınırlandırılması veya iyileştirilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır (Arslan et al., 2024; Kırtel et al., 2024). Türkiye'deki tipik tek katlı sanayi yapılarında, yetersiz çatı diyaframları ve zayıf diyafram bağlantıları, çerçeveler arasında büyük yatay ötelenme farklarının oluşmasına neden olmuş bu durum yatay rijitliğin yetersizliğiyle birleşerek yapıların hasar almasına veya tamamen göçmesine yol açmıştır.



Şekil 1.1. 2023 Kahramanmaraş depremi'nde prefabrik yapılarda oluşan hasarlar

Bu hususlara bağlı olarak TBDY (2018)'in 8. bölümünde deprem etkisi altındaki ön üretimli betonarme bina taşıyıcı sistemlerinde birleşim bölgeleri tanımlanmaktadır. Birleşim bölgeleri mafsallı bağlantılar (MFB) ve moment aktaran bağlantılar (MAB) olarak iki ana grupta sınıflandırılmaktadır. Yönetmelikte geçen birleşim türleri ile ilgili detaylar Bölüm 2.1.4'te verilmiştir. Bu kapsamda, ön üretimli betonarme yapılarda deprem güvenliğinin arttırılması amacıyla; çatı ve döşeme diyaframlarının oluşturulmasına ve panel birleşim bölgelerine yönelik ilave önlemler getirilmiştir (TBDY, 2018). Prefabrik yapıların davranışını iyileştirmek için ortaya konulan birçok iyileştirme seçeneğine rağmen bu tür yapıların deprem performansı tartışma konusu olmaya devam etmektedir.

Ayrıca, tam yükseklikte ve kısmi yükseklikteki yığma dolgu duvarlar prefabrik betonarme kolonlar üzerinde sismik talepler oluşturmaktadır (Arslan et al., 2006; Saatcioglu et al., 2001). Yapısal analizlerde dolgu duvarlar genellikle taşıyıcı eleman olarak değil yalnızca ek kütle ve yük olarak dikkate alınmaktadır. Ancak, sismik etkiler altında dolgu duvarlar yapının rijitliğine önemli ölçüde katkıda bulunmakta, bu yolla titreşim periyodlarını belirli modlar için kısaltmakta ve iç kuvvetlerin dağılımını etkileyebilmektedir. Bunun yanı sıra, dolgu duvarlar kalıcı şekil değiştirmeler yoluyla deprem enerjisinin sönümlenmesine önemli ölçüde katkı sağlamaktadır. Dolgu duvarlar taşıma kapasitelerine ulaştıklarında çatlamakta ve yapı rijitliği ve dayanımına olan katkıları ani bir şekilde sona ermektedir. Yapısal titreşim nedeniyle çatlak yüzeylerinde oluşan sürtünme ise yapının ürettiği histeretik sönüm oranını artırmaktadır (Grubišić vd., 2023; Ozkaynak vd., 2014). Yapısal sönümdeki bu artış, yapıya etki eden sismik talebin azalması dolayısıyla yapıya etki eden yatay deprem kuvvetlerinin azalmasına olanak sağlamaktadır. Prefabrik sanayi yapılarında ise dolgu duvarlar sadece yatay rijitliği artırmakla kalmayıp, aynı zamanda yer değiştirme taleplerinin ve taban kesme kuvvetlerinin üzerinde de etkili olduğu gözlemlenmiştir (K. A. Korkmaz & Karahan, 2011). Savoia vd. (2017), düzenli ve sürekli dolgu duvarlar ile rijit çatı diyaframlarının yapının sismik performansını arttırıcı etkilerini vurgularken, Toniolo & Colombo (2012) ise cephe panellerinin bağlantı elemanlarının sismik ivmelere karşı yetersiz kaldığını ve bu durumun, yapının cephe elemanlarında yaygın hasar oluşumuna neden olduğunu

belirtmiştir. Bu bulgular, prefabrike sistemlerde bağlantı detaylarının sismik talepleri karşılayacak şekilde yeniden tasarlanması gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Günümüzde, yeni yapıların sismik ve rüzgar gibi dinamik yükler altında titreşim ve yer değiştirmelerin azaltılması amacıyla, ayrıca mevcut yapıların güçlendirilmesi için geliştirilen enerji sönümleme teknolojileri yapısal mühendislik alanında giderek artan bir ilgi görmektedir. Yapılarda kullanılan sönümleyici türleri ile ilgili detaylar Bölüm 2.2'de derlenmektedir. Bu sistemler arasında yer alan pasif enerji sönümleyicilerden biri olan sıvı viskoz sönümleyiciler (SVS) yüksek enerji sönümleme kapasiteleri, kolay uygulanabilir olmaları ve düşük bakım gereksinimleri nedeniyle hem yeni yapıların tasarımında hem de mevcut yapıların güçlendirilmesinde yaygın şekilde kullanılmaktadır (Constantinou et al., 1998). Bu sönümleyiciler sayesinde yapıya ek rijitlik getirilmeden sönüm oranı artırılmış olmaktadır. Pek çok araştırma, bu cihazların yapısal sistemlerde kullanıldığında hem deplasman hem de ivme taleplerini önemli ölçüde azalttığını göstermiştir (Constantinou & Symans, 1992; Guo vd., 2015; Miyamoto & Hanson, 2003). Özellikle çelik ve betonarme yapılarda yapılan deneysel ve sayısal analizler, viskoz sönümleyicilerin yapı davranışını olumlu yönde etkilediğini ortaya koymuştur (Constantinou et al., 1993). Bu amaçla gerek çelik yapıların gerekse betonarme yapıların deprem davranışının sönümleyiciler yardımıyla iyileştirilmesi üzerine birçok çalışma gerçekleştirilmiştir (Alcocer et al., 2002; Guan et al., 2018; H. H. Korkmaz & Tankut, 2005; Restrepo et al., 1995). Deprem sonrası sanayi yapılarına yönelik hasar riskinin azaltılması ve üretim sürekliliğinin sağlanması amacıyla, deprem enerjisini sönümleyen sistemlerin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Öte yandan bu tür sönümleme mekanizmalarının sismik performansı sınırlı prefabrik sanayi yapılarında kullanımı ulusal ve uluslararası boyutta sınırlıdır. Literatürde, SVS'ler kullanan ileri düzey güçlendirme stratejileri de dahil olmak üzere, betonarme prefabrik yapıların sismik olarak güçlendirilmesine yönelik çeşitli katkılar bulunmasına rağmen (Sorace vd., 2024; Sorace & Terenzi, 2017, 2020), bu çalışmaların çoğu yapının düzlem dışı davranışına veya kapsamlı güçlendirme yaklaşımlarına odaklanmaktadır. Buna karşılık, deprem sonrası yapılan hasar gözlemleri, betonarme prefabrik yapılardaki göçme mekanizmalarının çoğunlukla düzlem içindeki yetersizliklerden kaynaklandığını ortaya koymaktadır.

Bu çalışma kapsamında, tek katlı tek açıklıklı betonarme prefabrik sanayi (BPS) yapılarında dolgu duvarların yapının düzlem dışı performansına ve SVS'lerin ise düzlem içi performansına etkisi araştırılmaktadır. Bu kapsamda, duvarlı ve sönümleyici bulunan modeller ile dolgu duvarsız ve sönümleyicisiz referans model olmak üzere toplam altı farklı yapı modeli oluşturularak zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiştir.

Analizlerde kullanılacak deprem yer hareketleri TBDY (2018)'e göre her biri 11 adet yer hareketi çiftinden oluşmak üzere değişik tehlike düzeyini ve farklı zemin koşullarını temsil eden 3 set seçilerek ölçeklenmiştir. Deprem yer hareketinin seçilmesi ve ölçeklenmesiyle ilgili detaylar Bölüm 3.1'de sunulmaktadır. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018) esas alınarak ETABS 21.2 programı kullanılarak Türkiye'deki mevcut prefabrik yapılardaki boyutları temsil eden mafsallı bağlantıya sahip (MFB1) örnek bir yapı modellenerek zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiştir.

Prefabrik yapının modellenmesi ile ilgili detay Bölüm 3.2'de açıklanmaktadır. Yapının modellenmesinde kullanılan malzeme ile ilgili detaylar Bölüm 3.2.1'de verilirken, yapısal elemanların modellenmesi ile ilgili kapsamlı açıklamalar Bölüm 3.2.2'de sunulmaktadır. Prefabrik yapı elemanlarının bağlantı detayları araştırılmış ve deneysel çalışmalar esas alınarak davranışı temsil edebilecek gerçekçi bir sayısal model ortaya konulmuştur. Bu modellerde hem düzlem içi hem de düzlem dışı deprem davranışını iyileştirecek konfigürasyonlar üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bağlantı detaylarının modellenmesi ile ilgili çalışmalar Bölüm 3.2.3'te, dolgu duvarların eşdeğer basınç çubuğu olarak modellenmesiyle ilgili detaylar ise Bölüm 3.2.4'te derlenmektedir. SVS'lerin modellenmesi ve yapısal elemanlara bağlantı detayları Bölüm 3.2.5'te verilmektedir. Yapısal sönümün ve yer hareketinin tanımlanması sırasıyla Bölüm 3.2.6 ve Bölüm 3.2.7'de açıklanmaktadır.

Bu çerçevede oluşturulan 3B sayısal model üzerinde aynı anda uygulanmak üzere iki doğrultuda deprem yer hareketleri uygulanarak zaman tanım alanında analizler gerçekleştirilmiştir. Her sette 11 adet olmak üzere toplamda 6 farklı model için 198 adet

analiz yapılmıştır. Analizler sonucunda elde edilen kolondaki beton ve donatıda oluşan birim şekil değiştirmeler, guse–çatı makası bağlantısındaki moment–dönme ve kesme kuvvet-deplasman ilişkileri, aşık–çatı makası bağlantısındaki kesme kuvveti-deplasman ilişkileri kolonun üst ucundaki göreli kat ötelemesi ile dolgu duvardaki kuvvet-deplasman ilişkisi, sistemdeki enerji bileşenleri parametreleri üzerinden yapının performansı ve enerji tüketen mekanizmaların sönüm kabiliyetleri değerlendirilmektedir. Bunlara ek olarak guse-çatı makası ve aşık-çatı makasındaki deprem davranışı irdelenmektedir. Bu değerlendirmeler, TBDY (2018) yönetmeliğinde verilen göçmenin önlenmesi sınır değerleri dikkate alınarak talep/kapasite (T/K) oranları üzerinden yapılmaktadır.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu bölümde, çalışmanın kuramsal altyapısını oluşturan yapısal ve yapısal olmayan elemanlara ilişkin temel bilgiler, bağlantı elemanları ve detayları, sönümleyici sistemlerin genel özellikleri, prefabrik yapılarda performans hedefleri ile ilgili açıklamalar sunulmaktadır. Ayrıca, bu kapsamda gerçekleştirilen kapsamlı literatür araştırmasına da yer verilmiştir. Her bir alt başlık, konunun anlaşılmasını destekleyecek şekilde detaylandırılarak aşağıda sunulmaktadır.

2.1. Prefabrik Yapılar

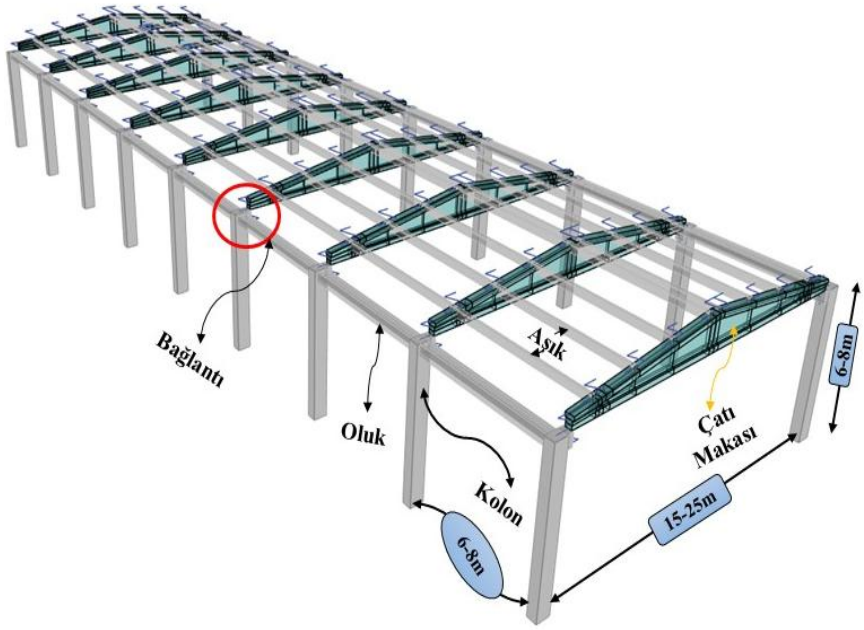
2.1.1. Yapısal Elemanlar

Prefabrik yapıların en temel özelliği, önceden üretilen yapı elemanlarının sahada birleştirilmesi yoluyla inşa edilmeleridir. Bu tür yapıların taşıyıcı sistemini oluşturan yapısal elemanlar; kolon, aşık kirişi, oluk kirişi, çatı makası, kreyn kirişi ve döşeme gibi temel bileşenlerden oluşur. Bu elemanlar, öncelikle yapısal stabiliteyi sağlamak, dış etkenlere (rüzgar, deprem, kar yükü vb.) karşı dayanım göstermek ve yük taşıma kapasitesini optimize etmek üzere mühendislik hesaplamalarıyla tasarlanır. Türkiye'de yaygın olarak kullanılan tek katlı tek açıklıklı prefabrik bir sanayi yapısına ait taşıyıcı sistem elemanları görseli Şekil 2.1'de sunulmaktadır. Türkiye'de bulunan sanayi yapılarında makas açıklığı 15-25m ve yükseklikleri ise 6-8m arasında değişmektedir.

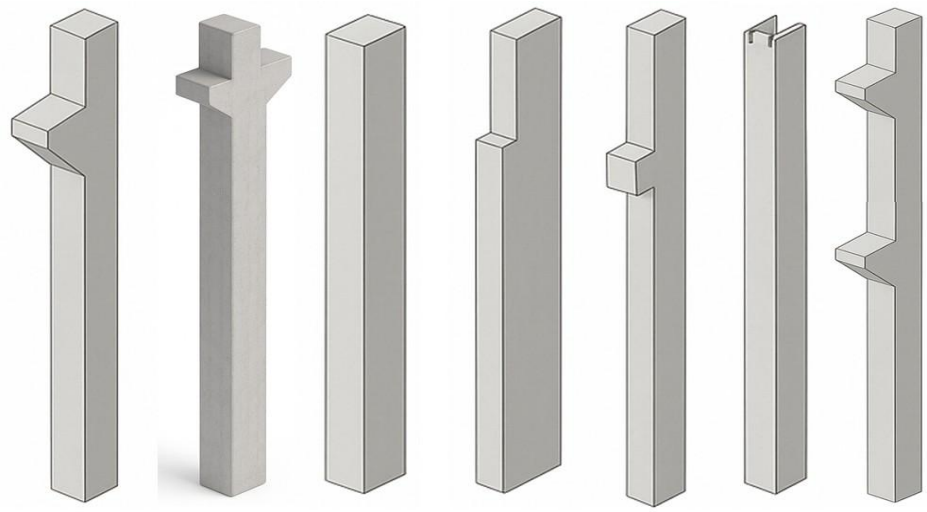
Kolon:

Prefabrike çerçeveli sistemlerde döşeme ve kirişlerden gelen düşey ve yatay yükleri temele aktaran elemanlardır. Prefabrike kolonlar kare, dikdörtgen, T, L veya H kesitli olarak imal edilebilir, kirişlerin veya çatı elemanlarının oturmasını kolaylaştırmak veya birleşim noktalarını gizlemek amacı ile düz, dişli, oyuk, çatallı, tek veya çift guseli olarak üretilebilirler (Şekil 2.2). Önceden üretilen kolonlar, inşaat sahasında uygun konumlarına yerleştirilir ve diğer yapısal elemanlarla birleştirilir. Kolonların boyutları ve kesitleri, yapı üzerinde oluşacak yükler ve bina yüksekliği gibi faktörlere bağlı olarak tasarlanır ve optimize edilir. Kolonların boyutlandırılması ve kesitlerinin saptanmasında, seçilmiş olan statik sistem, yapının yüksekliği, projedeki kolon açıklık ve aralıkları gibi etkenler rol oynamaktadır. Kolonlar daha çok basınca çalıştığı için öngermeli yapılmaz. Ancak

çerçeve ayağı şeklinde çalışan kolonlara büyük eğilme momentleri geldiği takdirde, bu ayaklara öngerme uygulanması zorunlu olur (Bekiroğlu, 2006). Diğer taraftan prefabrike kolonlarda en küçük boyuna donatı yönetmelik uyarınca B420C için en az 14mm olacak şekilde sınırlandırılmaktadır. Genel olarak kolon gibi değerlendirilebilmesi için tüm yapılar için, tasarımda iyi bilinen $N_d > 0.1 f_{ck} A_c$ şartı burada da dikkate alınmaktadır.



Şekil 2.1. Tipik tek katlı-tek açıklıklı prefabrik yapı



Şekil 2.2. Prefabrik sanayi yapılarında kullanılan kolon çeşitleri

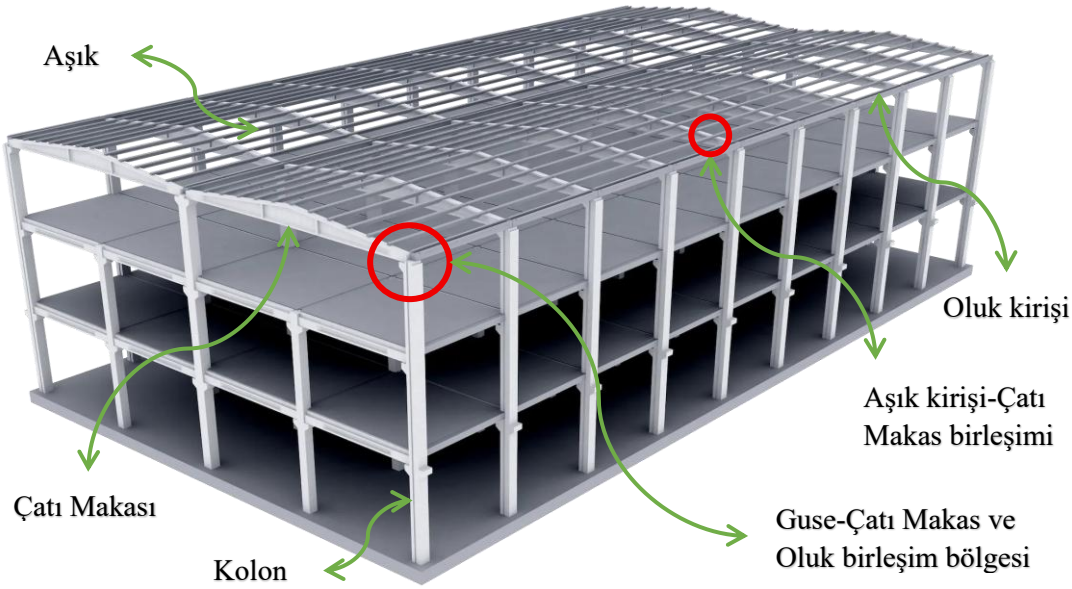
Guse, kirişlerin kolonlarla birleştiği noktalarda farklı şekillere sahip kısa konsollardır (Şekil 2.2). Kolonların yüzeylerinden çıkıntı yapan guseler, prefabrike yapıların makas kirişlerini desteklemesi ve bağlantıda kolaylık getirmesi dolayısıyla yaygın olarak kullanılırlar. Ayrıca, guseler genellikle sadece düşey yükler için tasarlanmıştır. Ancak guseler tarafından desteklenen kirişlerde meydana gelen sünme, büzülme ve sıcaklık deformasyonları nedeniyle oluşan yatay kuvvetler de oldukça önemli düzeyde olabilir. Bu tür yatay kuvvetlerin oluşması guselerin düşey yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde azaltabileceğini göstermiştir. Hafif düşey yükler taşıyan bazı guselerin yatay kuvvetler nedeniyle hasar gördüğü sahada da gözlemlenmiştir. (Kriz & Raths, 1965)

Kirişler:

Prefabrike çerçeveli sistemlerde kolonları birleştirip sürekliliği sağlayan yapısal elemanlardır (Şekil 2.3). Kirişler genellikle 12-15m açıklığa kadar normal donatılı olarak yapılmaktadır. Ancak daha büyük açıklıklar için öngerme metodu kullanılmaktadır. Öngerme metodu kirişin ince kesitli olmasını ve donatıdan büyük ölçüde tasarruf etmeyi sağlayan etkili bir yöntemdir. Prefabrik yapılarda farklı farklı işlevleri olan kiriş çeşitleri mevcuttur (Şekil 2.4).

Çatı makası ya da makas kirişi olarak isimlendirilen ve çatı sisteminin en önemli parçası olarak kabul edilen yapısal elemanlar (Şekil 2.4), çatı yüklerini taşımanın yanı sıra, geniş açıklıkları geçmek için önemli avantaj sağlamaktadır. Ayrıca, trapez kesitli olmasından dolayı çatı örtüsüne kendiliğinden eğim sağlar.

Aşık kirişleri, çatı ve kar yüklerini makas kirişlerine düzenli bir şekilde aktarılmasını sağlayan elemanlardır (Şekil 2.4). Bu elemanlar makas kirişlerini birbirine bağlayarak deprem yüklerini karşılarlar. Aşıkların geçtiği açıklık, taşıyıcı sistemin kolon aralığına bağlıdır. Bu aralık, normal olarak 6-8m, bazı hallerde ise, 10-12 metre olabilmektedir. Aşıklar arası mesafe ise, üzerlerine hafif beton plaklar uygulanacaksa 2.5-4m, profilli plaklar kullanılacaksa 1.15 veya 1.45m tutulur. Aşıklar genellikle normal donatılı özel durumlarda öngerilmeli yapılır. En çok uygulanan kesitler dikdörtgen, trapez ve «T» kesitleridir. (Yükselen, 1986).



Şekil 2.3. Kolon, panel, makas ve aşık elemanlarından oluşan çok katlı ve çok açıklıklı prefabrik sanayi yapısı ve yapı elemanları (Yapı, 2025)

Oluk kirişleri, çeşitli boyut ve biçimlerde üretilen yapı elemanlarıdır (Şekil 2.4). Oluklar, genellikle betondan yapılmış uzun kanallar veya borular olarak tasarlanır ve çatının kenarlarına monte edilir. Bu kirişlerin temel işlevi, çatılardan akan yağmur suyunun doğrudan çatıdan bina duvarlarına akmasını önleyerek, suyun zemine veya drenaj sistemine güvenli bir şekilde yönlendirmektir. Şekil 2.4 betonarme prefabrike yapılarda kullanılan farklı kiriş tiplerini göstermektedir.



Şekil 2.4. Prefabrik kirişlere ait çeşitli örnekler, (Gökhan, 2012)

2.1.2. Yapısal olmayan elemanlar

Duvar:

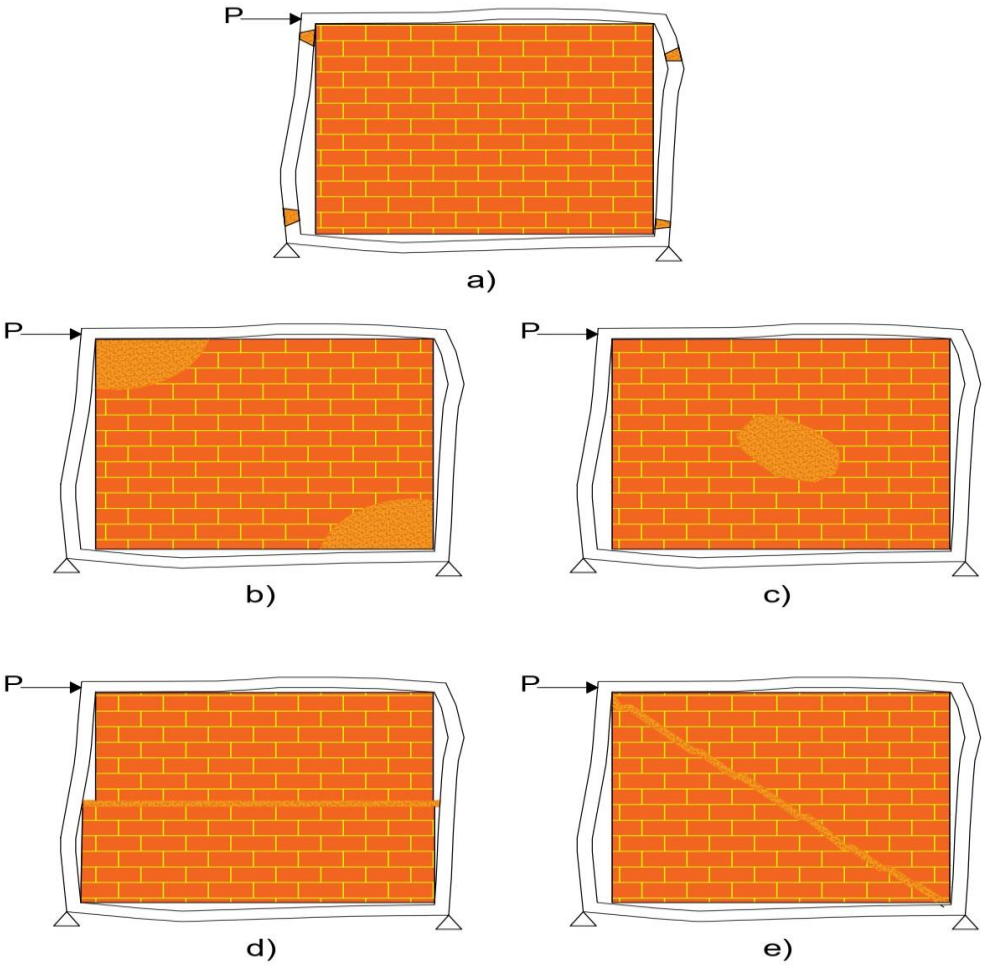
Geleneksel yapı tasarımında, dolgu duvarlar taşıyıcı eleman olarak kabul edilmemekte, hesaplarda sadece yük ve kütle olarak dikkate alınmaktadır. Oysa dolgu duvarlar, deprem sırasında yapıya ek rijitlik kazandırmakla beraber, titreşim periyodlarını kısaltarak iç kuvvet dağılımında etkili olmaktadır. Ayrıca dolgu duvarlar, uygun tasarlanmaları ve devrilmeye karşı önlemler alınması durumunda, üzerlerinde oluşan kalıcı şekil değiştirmeler ile deprem enerjisini sönümlemede çerçeveye katkı sağlamaları da muhtemeldir. Dolgu duvarın betonarme çerçeveyle yükleme süresince beraber

çalışmasının sağlanması önemli dayanım, rijitlik ve enerji tüketme kapasitesi artışı sağlayacağı açıktır.

Genel manada uygulamada geleneksel yöntemler ile imal edilmiş dolgu duvarlar, taşıma kapasitesine eriştiğinde çatlayarak yapının rijitlik ve dayanımına olan katkıları önemli oranda azalır. Duvarda oluşan çatlak ara yüzeylerinde yapının salınımı ile büyüyen sürtünme, yapının sönümünü artırır (Grubišić vd., 2023; Ozkaynak vd., 2014). Yapısal sönüm artışı yapının deprem talebinin azalmasına neden olur. Bu azalma yapıya gelen yatay deprem yüklerinin belirli oranda azalması anlamına gelmektedir. Doğrusal davranışın söz konusu olduğu bölgede de dolgu duvarların etrafındaki kolon ve kirişlerle olan ara yüzeylerinde var olan sürtünme hareketi ve dolgu duvar bünyesinde bulunan derzler boyunca oluşan relatif hareketler, yapıya ilave sönüm sağlamaktadır.

Dolgu duvarlı çerçeve sistemlerde farklı göçme biçimleri gözlenebilmektedir. Çerçeve göçme biçimi kolonlarda veya kiriş-kolon birleşimlerinde plastik mafsalların oluşması şeklinde meydana gelir (Şekil 2.5 a). Bu göçme biçimi, genellikle zayıf çerçevelerle ya da birleşim bölgeleri zayıf, elemanları ise güçlü olan ve görece olarak güçlü bir dolgu duvara sahip çerçevelerle ilişkilidir. Köşe ezilmesi, yükleme doğrultusunda dolgu duvarın bir veya her iki köşesinde yüksek gerilme yığılması sebebiyle meydana gelir (Şekil 2.5 b). Rijit kolonlar ve kirişler için köşe ezilmesi kısmen küçük bir bölgede olurken; daha zayıf betonarme çerçevelerde, daha geniş bir alanda olabilir ve hasar betonarme çerçeveye erişebilir. Göreli kat ötelemesi artarken, köşedeki duvar parçaları tamamen düşebilir. Diyagonal basınç ezilmesi dolgu duvarın orta bölgesinde meydana gelen ezilmeyi temsil eder (Şekil 2.5 c). Bu göçme biçimi, nispeten narin dolgu duvarlarda görülür ve göçme, dolgunun düzlem dışı burkulma kararsızlığı sonucu oluşur. Kayma göçmesi modu, Şekil 2.5 (d)'de gösterildiği gibi, bir yığma dolgu duvarın yatay derzleri boyunca meydana gelen yatay kayma göçmesini temsil etmektedir. Bu göçme modu, taşıyıcı çerçevesi güçlü ve zayıf derz dayanımına sahip dolgu duvarlar ile ilişkilidir. Diyagonal çekme kırılması dolgu duvarın basınca maruz kalan köşegen boyunca oluşan çatlamalar olarak ifade edilmektedir ve genelde kayma kırılması ile aynı anda oluşmaktadır (Şekil 2.5 e). Yukarıda açıklanan göçme türleri boşluksuz dolgu duvarlı betonarme çerçeveler için de geçerlidir. Dolgu duvarda boşluğun bulunması yaygın

olarak görülen diyagonal çekme kırılması ve diyagonal basınç ezilmesi göçme türlerinin oluşmasına engel olmaktadır (Asteris vd., 2011).Taşıyıcı çerçevenin çelik olması durumunda ise çerçeve göçmesi nadiren meydana gelmektedir (El-Dakhakhni vd., 2003a).

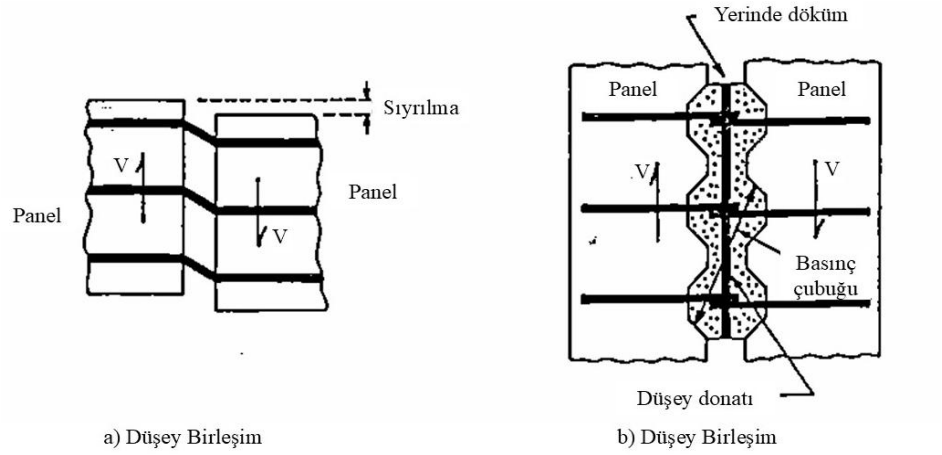


Şekil 2.5. Dolgu duvarlı çerçevelerin farklı göçme türleri: a) Çerçeve göçmesi, b) Köşe ezilmesi, c) Diyagonal basınç ezilmesi, d) Yatay derz kayması biçimli göçme, e) Diyagonal çatlama kırılması (El-Dakhakhni et al., 2003)

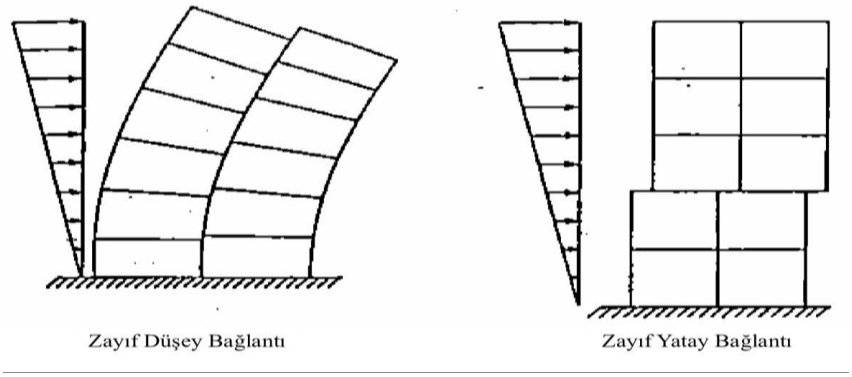
Paneller:

Panel sistemler, düşey ve yatay yönde birleştirilen prefabrik elemanlardır. Bu sistemlerde düşey paneller taşıyıcı duvarlar, yatay paneller ise döşemeleri oluşturur. Yatay paneller uygun bağlantı detaylarının sağlanması durumunda yükleri düşey taşıyıcı elemanlara aktarır. Panellerin birbirine birleştirilmesi, cıvata veya plaka kaynatılarak (kuru birleşim)

veya çerçevelere benzer bir biçimde yerinde dökme beton yardımıyla sağlanabilir. Tipik bir yerinde döküm birleşimi Şekil 2.6'da gösterilmiştir. Düşey birleşimin yeterli olmadığı durumlarda, Şekil 2.6 (a)'da gösterildiği gibi eleman tek bir parça olarak değil, iki ayrı eleman gibi davranacaktır. Düşey birleşimlerde en önemli sorun, Şekil 2.6 (a)'da gösterildiği gibi, kesme kuvvetinin aktarılmasıdır. Yatay birleşimler düşey ve yatay yükleri aktarabilecek özelliklere sahip olmalıdır. Panellerin belirli noktalarına gömülen plakalar, diğer paneldeki plakalara kaynatılmaktadır. Bu gibi birleşimlerde kuvvetler belirli noktalarda aktarıldığından, gerilme yığılmaları sorun olabilmektedir. Ayrıca, kaynak işçiliği de davranış açısından büyük önem taşımaktadır. Yatay birleşimin yeterli olmadığı durumlarda, yapının üst bölümünün alttakine oranla kayması önlenemeyecektir (Şekil 2.7). Panel türü yapıların ek yerinde oluşacak sıyrılmalar (Şekil 2.7) yanal yer değiştirmeyi önemli oranda artırabilir. Bu nedenle sıyrılmanın mertebesi, yapılacak deneylerle saptanmalı ve böylece hesaplarda daha gerçekçi modeller kullanılmalıdır (Ersoy & Tankut, 1988).



Şekil 2.6. Panellerin düşey birleşimi (Ersoy & Tankut, 1988)



Şekil 2.7. Zayıf düşey ve yatay bağlantı (Ersoy & Tankut, 1988)

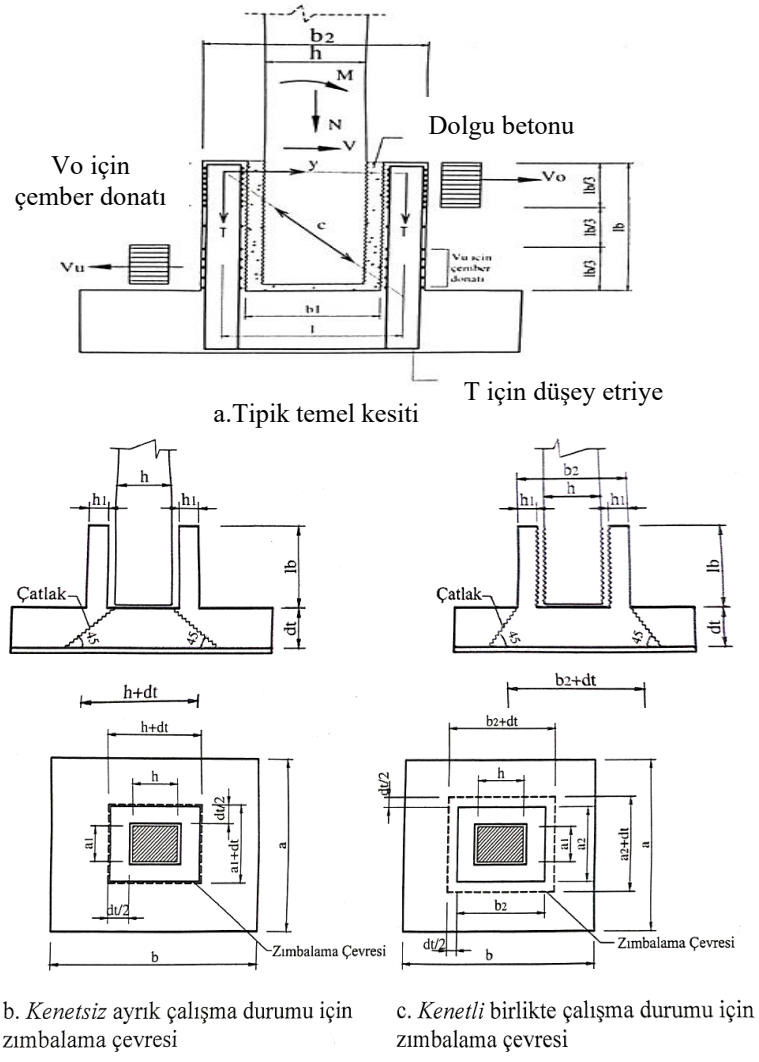
Paneller taşıyıcı paneller, taşıyıcı olmayan paneller ve özel işlevli paneller olarak üç grupta incelenebilir. Taşıyıcı paneller, yüklerin yüzeyleri boyunca yayılarak diğer taşıyıcı sistem elamanlarına ve zemine aktarılması esasına bağlı olarak tasarlanan panellerdir. Taşıyıcı paneller; taşıyıcı duvar panelleri ve döşeme panelleri olmak üzere iki grupta toplanmaktadırlar. Taşıyıcı olmayan paneller, yalnızca bölme alan oluşturma işlevini üstlenirler ve dış cephede veya iç kısımda kullanılabilmektedirler. Bunlar taşıyıcı paneller gibi dolu veya boşluklu yüzeyli olabilirler. Özel işlevli paneller, panel yüzeylerinde boruların gömülmesini önlemek amacıyla geliştirilen temiz su, pis su, ısıtma, havalandırma ve elektrik tesisatını içeren panellerdir (Bekiroğlu, 2006).

2.1.3. Bağlantı elemanları ve şekilleri

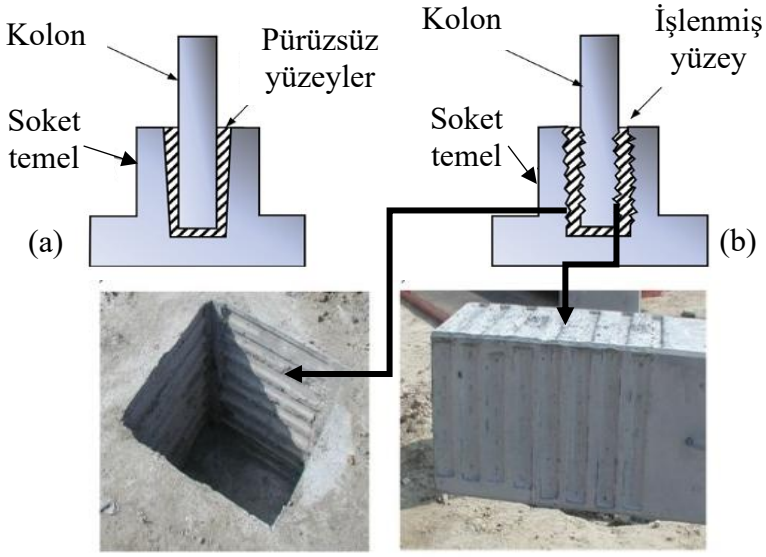
Temel-Kolon bağlantısı:

Prefabrik yapıların kolonlarının soket şeklinde hazırlanmış temel ayaklarına oturduğu bağlantılarda, yatay kuvvetlerin bir kısmı sürtünme, bir kısmı ise kolonun yerleştiği soketin çevresinin kesme dayanımı ile karşılanmaktadır (Şekil 2.8). Kolondaki eğilme momenti, kolonun oturduğu temel yuvasının çevresindeki betonda gerilmeler meydana getirir (Şekil 2.8). Yuva iç yüzünde meydana gelen basınç gerilmelerinin yayılı olarak etkidiği kabul edilmektedir. Kolonda meydana gelen eğilme momentinin yönüne bağlı olmakla beraber kolonun bir tarafındaki cidarın üst ucunda diğer tarafındaki alt ucunda bileşke kuvvetler meydana gelmektedir (Şekil 2.8 a). Temellerde zımbalama çevresi kenetsiz ayrı çalışma (Şekil 2.8 b) ve kenetli birlikte çalışma durumu (Şekil 2.8 c) olmak üzere iki farklı yükleme dikkate alınarak zımbalama hesapları yapılmaktadır.

Şekil 2.9'da bir kolonun soket temel bağlantısı için iki olası çözüm sunulmaktadır. Her iki çözümde de kolon soket temel içine yerleştirilir. Kolonun hizalanmasının ardından, uygun geçici desteklerle sabitlenmesiyle birlikte kolonun alt boşluğu ile temelle duvarlar arasındaki çevresel boşluk rötresiz harçla doldurulur. Soket, kolonun altını ve çevresini iyi sıkıştırılmış dolgu ile doldurmaya olanak sağlayacak kadar büyük olmalıdır. Sol taraftaki çözümde (Şekil 2.9 a), birleşim noktasındaki kolon ve temel yüzeyleri pürüzsüzdür. Sağ taraftaki çözümde ise, harcın aderansını artırmak amacıyla yüzeyler girinti veya çıkıntılarla işlenmiştir. İşlenmiş yüzeylere sahip soket Şekil 2.9 (b)'de gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Kenetsiz ve kenetli yuvalı tekil temel (Ercan et al., 2018)

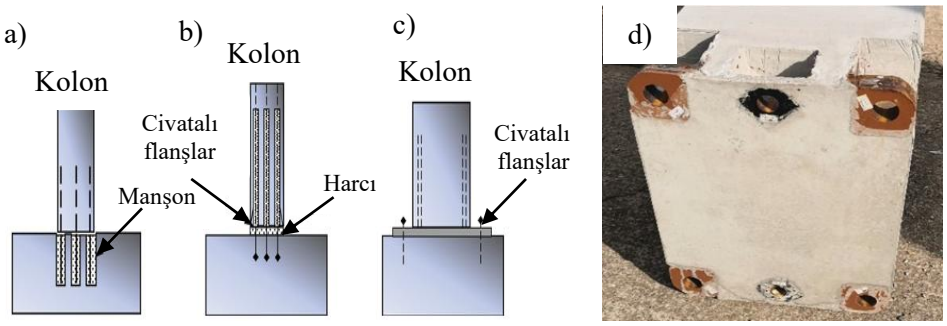


Şekil 2.9. Kolon-soketli temel bağlantısı (Negro & Toniolo, 2012)

Kolon-temel bağlantıları için diğer olası çözümler şunlardır:

Kolonun, temel içine yerleştirilen oluklu manşonlar içerisine yerleştirilmiş ve büzülmez harçla doldurulmuş kolon tabanından çıkıntı yapan boyuna donatı çubuklarının ankrajı ile elde edilen kolon-temel bağlantısı Şekil 2.10 (a)' gösterilmektedir. Boyutları (80 ila 100 mm çapında) nedeniyle, manşonlar, kolonun profilinden daha geniş bir temel elemanının boyutunun seçilmesine sebep olur, böylece boyuna çubuklar, kolonun düz çevresel konumundan sapmadan girebilir. Kolon tabanına yerleştirilen çelik soketler (levhalar) aracılığıyla ve temele cıvatalayarak elde edilen kolon-temel bağlantısı Şekil 2.10 (b)'dse verilmektedir. Soketler, kendilerine kaynaklanmış çubuk çiftleriyle kolona ankrajlanır ve mevcut boyuna donatıya bindirme yaparak eklenir. Soketlere, yana kaymalarını önlemek için diğer enine bağlantılar kaynaklanabilir. Kolon tabanına monte edilen ve temele cıvatalanan çelik plaka (flanş) aracılığıyla elde edilen kolon-temel bağlantısı Şekil 2.10 (c)'de sunulmaktadır. Flanş, kolonun boyuna donatı çubuklarına doğrudan veya dolaylı olarak kaynakla bağlanabilir. Kolon-temel bağlantısı, prefabrike çelik ankraj pabuçları kullanılarak sağlanabilmektedir (Şekil 2.10 d) Bu yöntem, özellikle kolon boyutlarının büyük olması ve dolayısıyla çıkıntılı taban plakalarının boyutlarının (örneğin, 600 × 600

mm veya daha fazla) artması durumunda yaygın bir tercih olmaktadır (Şekil 2.10) (Holly & Abrahoim, 2020; Hollý & Harvan, 2016).



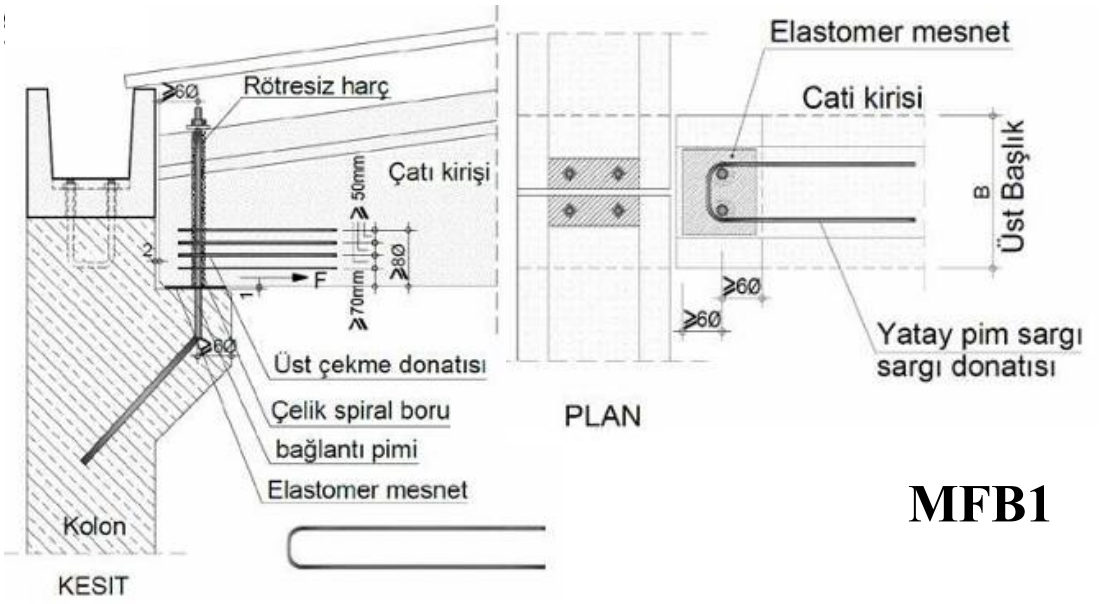
Şekil 2.10. Kolon-soketli temel bağlantısı (Negro & Toniolo, 2012)

2.1.4. Kiriş-kolon bağlantıları

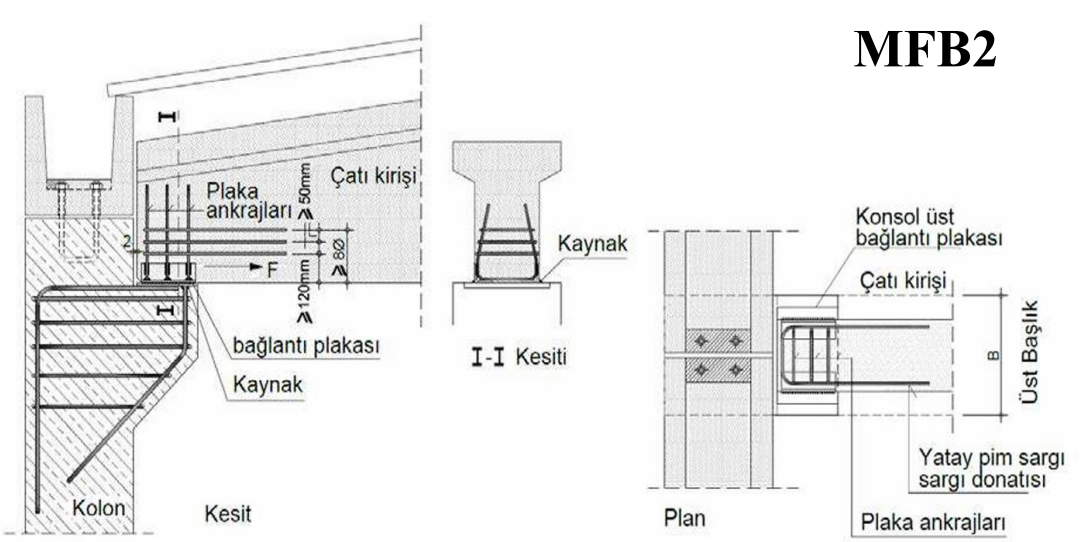
TBDY (2018)'in 8. Bölümü, ön üretimli betonarme bina taşıyıcı sistemlerinin tasarımına yönelik özel kurallar getirmiştir. Bu kapsamda, kolon-çatı kirişi birleşimleri için mafsallı bağlantılar (MFB) başlığı altında üç farklı bağlantı türü tanımlanmıştır. Mafsallı bağlantılar, esas çerçeve düzleminde moment aktarımı yapmayan ancak kesme kuvveti ve eksenel kuvvet aktarımı sağlayabilen birleşimlerdir. TBDY (2018)'de bu bağlantılar; pimli bağlantılar (MFB1), kaynaklı bağlantılar (MFB2) ve yuvalı bağlantılar (MFB3) olarak sınıflandırılmaktadır. Her bir bağlantı türü Şekil 2.11-13'te gösterilerek mafsallı bağlantılarla ilgili TBDY (2018)'de geçen bazı önemli hususlar aşağıda açıklanmaktadır.

Seçilen statik sisteme bağlı olarak, kirişin kolona serbestçe veya onunla bir çerçeve kuracak şekilde oturması istendiğinde, bu bağlantının mafsallı veya moment aktaran bağlantı olarak çözümlenmesi gerekecektir. Mafsallı bağlantılar, ön üretim karakterine çok daha uygun olup, yapımı da kolay ve süratlidir. En basit ve uygulanması en kolay kiriş-kolon birleşimi, kiriş elemanının bir elastomer mesnet (örneğin neopren yastık) aracılığıyla doğrudan kolon elemanı üzerine oturtulmasıyla gerçekleştirilir. TBDY (2018)'e göre mesnetlerinde sac plaka kullanılmayan pimli, yuvalı veya bunların farklı biçimleri ile oluşturulan birleşimlerde, en az 10 mm kalınlığında çelik takviyeli elastomer yastık kullanılması gerekmektedir. Ayrıca, TBDY (2018)'e göre mafsallı bağlantılarının

tümünde bağlantı kuvvetlerinin hesabında Dayanım Fazlalığı Katsayısı (D) dikkate alınmalıdır.



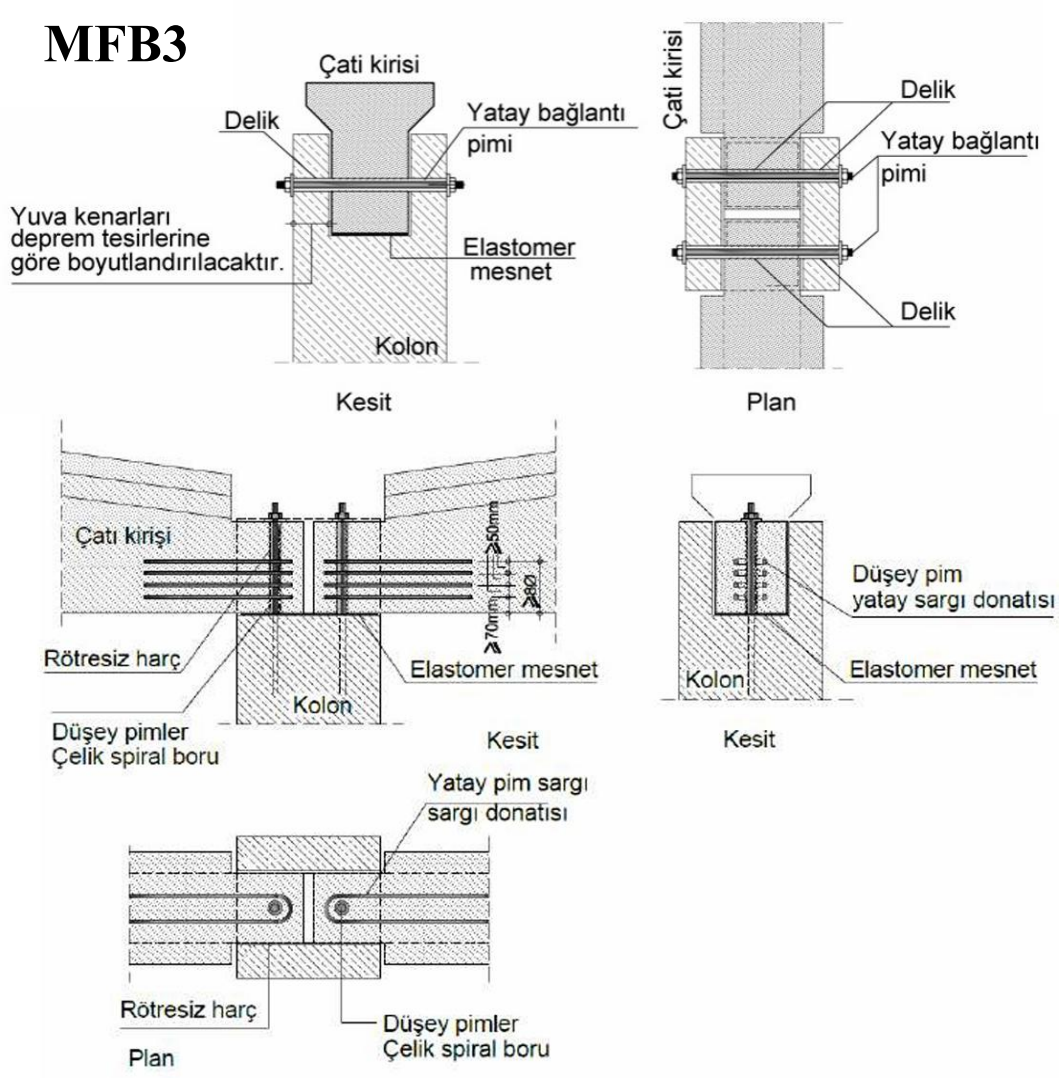
Şekil 2.11. Mafsallı kolon-çatı kiriş pimli bağlantı türü (MFB1) (TBDY, 2018)



Şekil 2.12. Mafsallı kolon-çatı kiriş kaynaklı bağlantı türü (MFB2) (TBDY, 2018)

Kiriş ucunda bırakılan pim yuvalarından kolonun üst ucunda bırakılmış olan donatı filizlerinin geçirilmesi ve birleşim noktasının sonradan betonlanarak doldurulması, yatay kuvvetlere karşı bir çözüm getirir. Böylesi bir işlem ile yapılan çözümde montaj süresi oldukça kısadır. Ancak, TBDY (2018)'de aşık-makas bağlantıları dışındaki tüm pimli

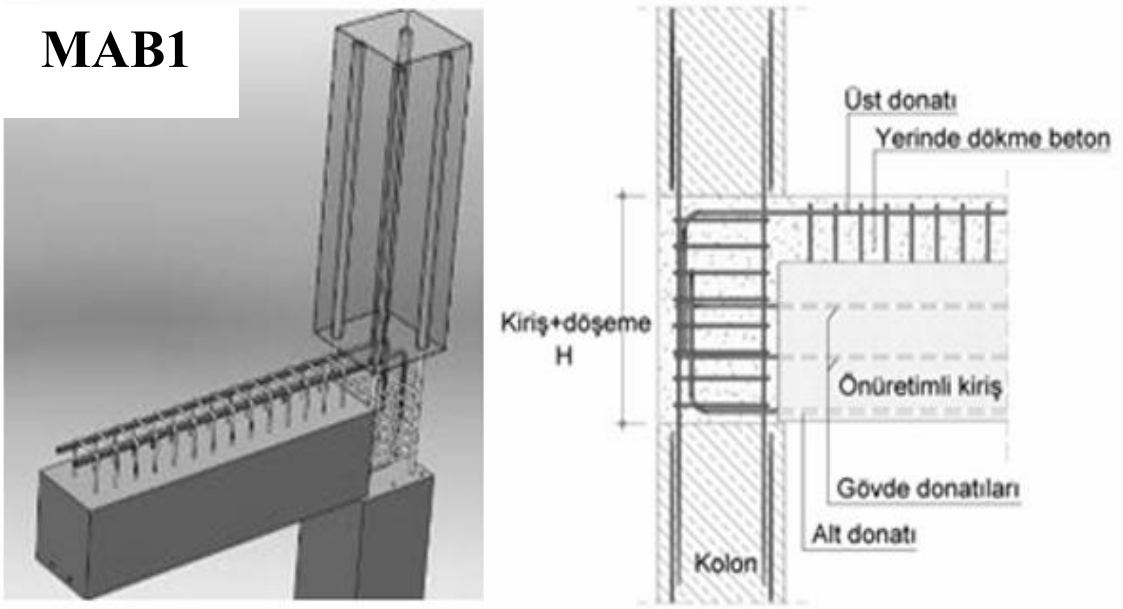
bağlantıların çimento harcı ile doldurulması ve serbest uçlarının pul ve somun ile bitirilmesi zorunluluğu getirilmiştir. Bu zorunluluk bağlantı bölgesinin yatay yük kapasitesinde önemli bir dayanım artışına sebep olmaktadır.



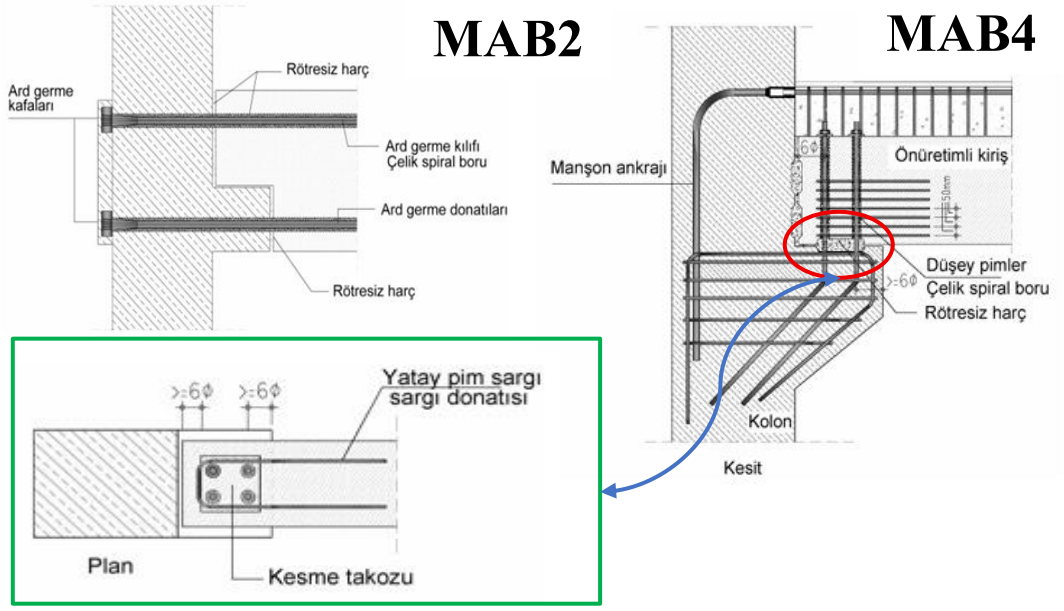
Şekil 2.13. Mafsallı kolon-çatı kiriş yuvalı bağlantı türü (MFB3) (TBDY, 2018)

TBDY (2018)'de moment aktaran bağlantılar (MAB), ön üretimli betonarme binalar için dört farklı birleşim tipi şeklinde tanımlanmıştır. Bunlar sırasıyla: ıslak kolon-kiriş bağlantısı (MAB1), tam ardgermeli kolon-kiriş bağlantısı (MAB2), üstte ıslak–altta kaynaklı kolon-kiriş bağlantısı (MAB3) ve manşonlu–pimli kolon-kiriş bağlantısı (MAB4) şeklindedir. Bu bağlantı türleriyle ilgili detaylar aşağıda Şekil 2.14-2.17'de verilmektedir. TBDY (2018)'e göre ön üretimli betonarme binaların moment aktaran

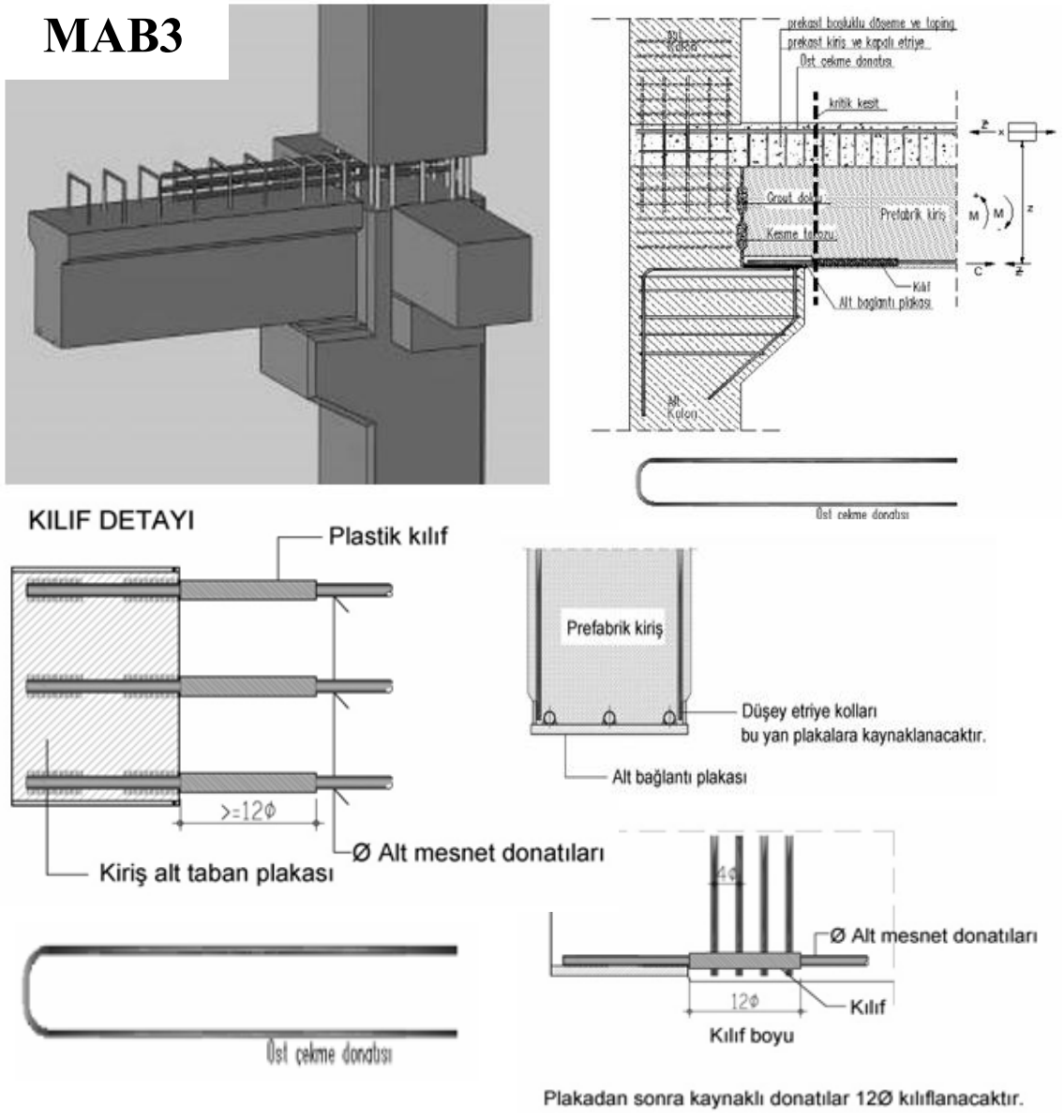
bağlantıları, tersinir tekrarlı deprem yükleri etkisinde sünek davranış gösterecek şekilde tasarlanmalıdır. Ayrıca, moment aktaran kolon-kolon, kiriş-kiriş ve kolon-temel birleşim detaylarına da yer verilmiştir.



Şekil 2.14. Moment aktaran kolon-kiriş ıslak bağlantı türü (MAB1) (TBDY, 2018)



Şekil 2.15. Moment aktaran kolon-kiriş tam ard-germeli (MAB2) ve manşonlu-pimli (MAB4) bağlantı türleri (TBDY, 2018)

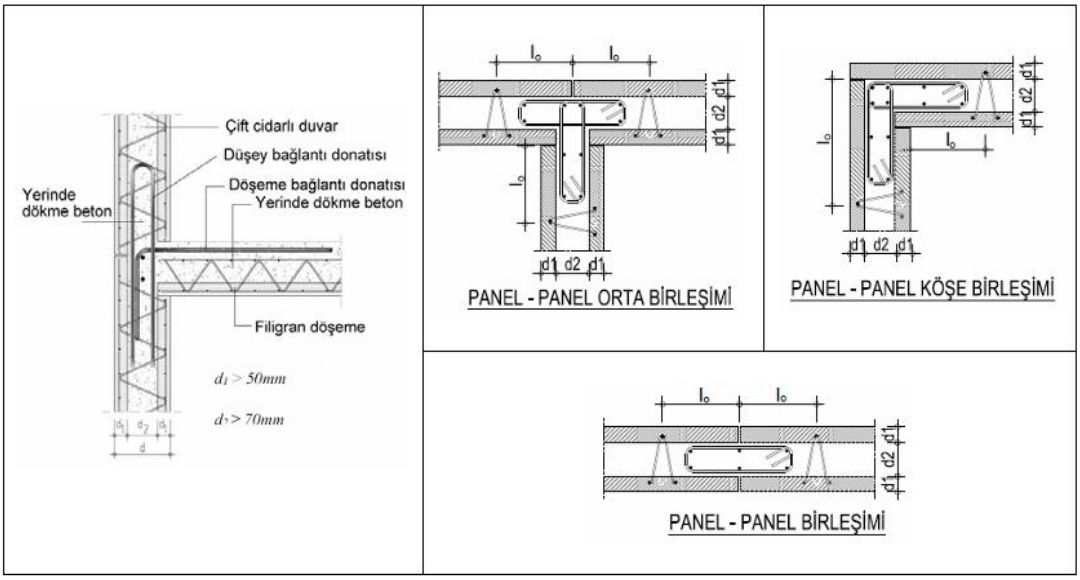


Şekil 2.16. Moment aktaran kolon-kiriş üstte ıslak altta kaynaklı bağlantı türü (MAB3) (TBDY, 2018)

2.1.5. Panel-panel bağlantıları

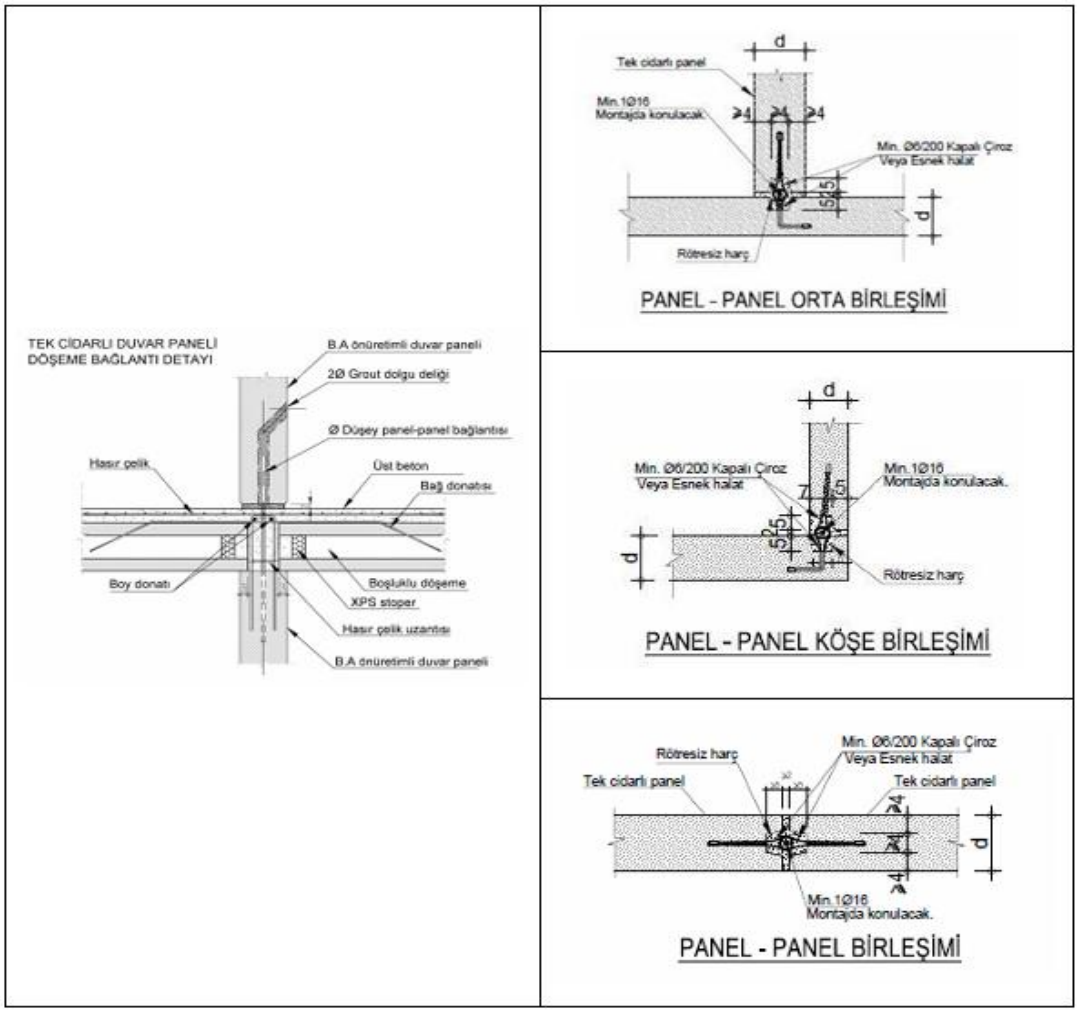
Ön üretimli duvar panelleri genellikle tek kat yüksekliğinde panellerdir ve birbirlerine ve döşeme plaklarına bağlanırlar. Bağlantılar, ölü ve hareketli yüklerden oluşan düşey yükler için ve ayrıca döşeme diyaframı etkisinden kaynaklanan yatay düzlem içi kuvvetlerin transferi için yapısal taşıyıcı sistemin ayrılmaz bir parçasıdır. Ön üretimli duvar

panellerinde yatay ve düşey bağlantılar olmak üzere iki ana bağlantı tipi bulunmaktadır (Holly & Abrahoim, 2020; Hollý & Harvan, 2016; TBDY, 2018). Düşey birleşimler, düşey kesme kuvvetlerini bir duvar elemanından diğerine nispeten minimum hareketle aktarmak amacıyla kullanılır. Yatay duvar-döşeme ve duvar-temel birleşimleri, basınç, çekme ve kesme kuvvetlerinin bir yapı elemanından diğerine aktarılması amacıyla kullanılır. TBDY (2018)'de çift cidarlı ve tek cidarlı panellerin bağlantı detayları sırasıyla Şekil 2.17 ve Şekil 2.18'de verilmektedir.



Şekil 2.17. TBDY 2018'e göre farklı panel birleşimleri için tipik detaylar (TBDY, 2018)

TBDY (2018)'e göre panel-panel birleşimleri, prefabrik yapı elemanlarının rijitlik ve dayanımını sağlamak amacıyla özel detaylarla tasarlanmalıdır. Bu birleşimlerde düşey ve yatay yüklerin güvenli bir şekilde aktarımı sağlanmalı ve bu aktarım açık biçimde gösterilmelidir. Ayrıca, önüretimli tek ya da çok katlı binalarda, döşeme veya çatı düzlemlerinde TBDY (2018)'in 8.6.1 ve 8.6.2 maddelerinde tanımlanan koşullar uygulanarak diyafram oluşturulmalı ve ilgili diyafram davranışı dikkate alınarak gerekli hesaplar yapılmalıdır.



Şekil 2.18. TBDY 2018'e göre panel-panel birleşimi (TBDY, 2018)

2.2. Sönümleyiciler

Bu bölümde farklı sönümleyici tipleri ile ilgili genel bilgiler verilmektedir. Bu sönümleyiciler hız esaslı olan sıvı viskoz sönümleyiciler ve viskoelastik sönümleyiciler ile yer değiştirme esaslı sürtünme tipi sönümleyiciler, burkulması önlenmiş çaprazlar ve metalik sönümleyicilerdir. Ancak sönümleyiciler konusu oldukça geniş kapsamlıdır; bu çalışmada yalnızca sınırlı sayıdaki temel sistemlere yer verilmiş olup, daha detaylı bilgiye literatürden ulaşılması mümkündür.

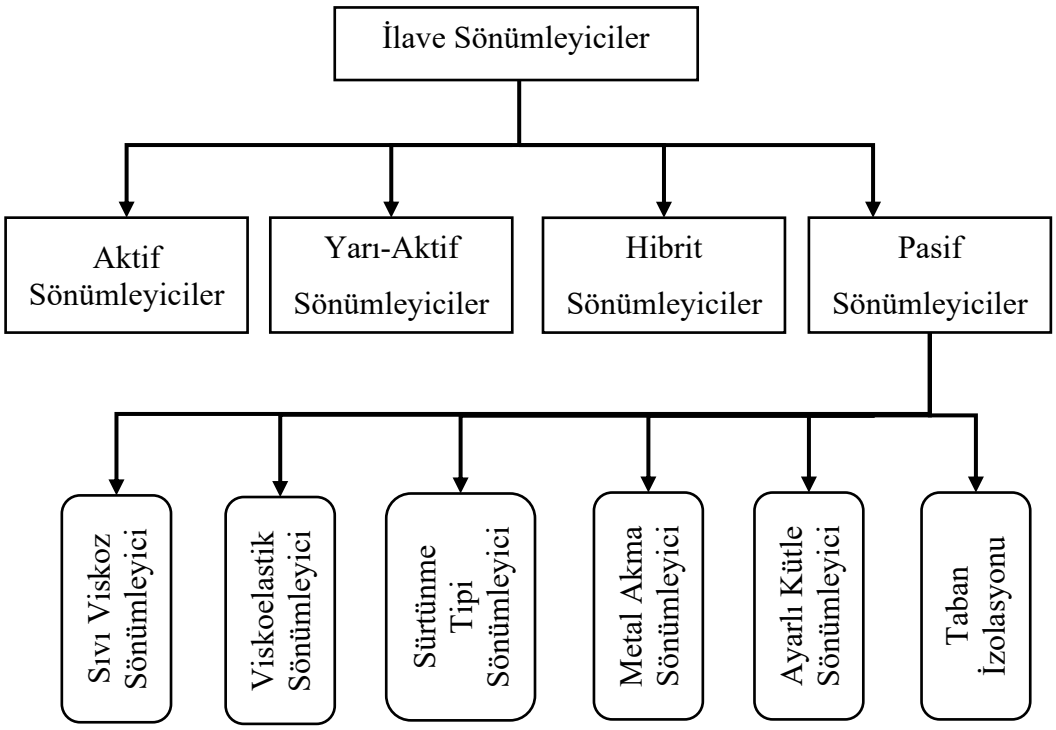
İlave sönümleme sistemleri genel olarak üç temel kategori altında sınıflandırılmaktadır: aktif, yarı-aktif ve pasif sistemler (Şekil 2.19). Aktif sistemler, yapının mevcut durumunu

sürekli izleyerek bu bilgiyi işleyen ve çok kısa sürede yapıya, durumu daha uygun hale getirmek için belirli iç kuvvetler uygulayan sistemlerdir. Aktif enerji sönümleyiciler ise dışarıdan bir enerji kaynağıyla çalışan, sensörler ve kontrol sistemleri aracılığıyla yapının titreşim karakteristiklerini algılayarak gerçek zamanlı müdahalede bulunan sistemlerdir Şekil (2.20). Bu tür sistemler genellikle gelişmiş elektronik donanım ve kontrol algoritmaları gerektirir. Genellikle bir aktif kontrol sistemi üç ana bileşenden oluşur:

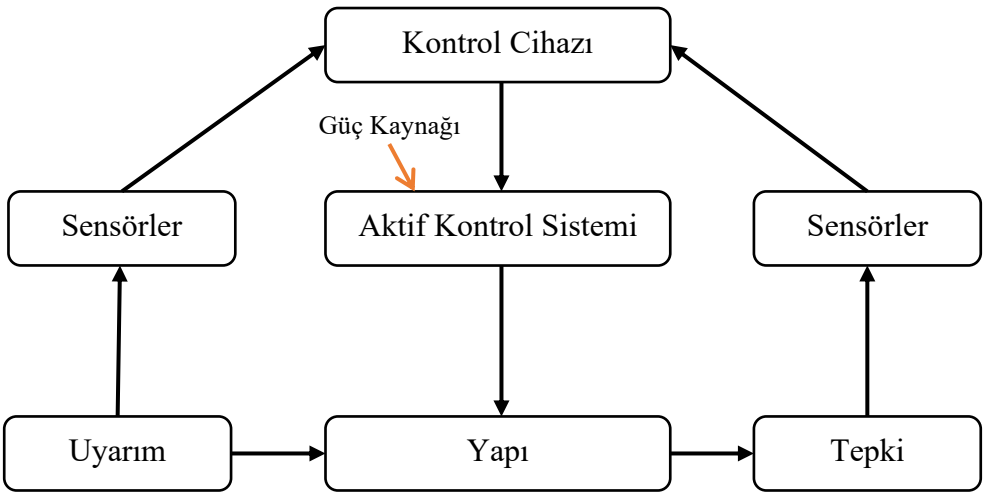
- Yapının durumunu algılayabilen ve ilişkili verileri elektronik bir veri toplama sistemi aracılığıyla kaydedebilen bir izleme sistemi (monitoring system);
- İzleme sisteminden gelen verileri işleyip uygulanacak önlemleri belirleyen kontrol sistemi (control system) ;
- Bu karşı önlemleri fiziksel olarak yapıya uygulayan bir uygulama sistemi (actuating system).

Bu nedenle aktif sistemlerin düzgün çalışması için sürekli bir dış enerji kaynağı gereklidir. Dış enerji kaynağına olan bu bağımlılık, aktif sistemlerin deprem uygulamalarındaki önemli bir kısıtlamasıdır (Christopoulos & Filiatrault, 2006).

Yarı aktif sistemler, aktif sistemlere benzer ancak genel bir izleme sistemine ihtiyaç duymadan nispeten az miktarda dış enerji kullanırlar. Kontrol, sıvı sönümleyicilerdeki orifis geometrisi gibi sönümleyicinin yerel özelliklerinin değiştirilmesiyle sınırlıdır; bu da kararsızlık riskini ortadan kaldırır. Dış enerjiye olan düşük bağımlılık ve kararsızlık endişelerinin azalması sebebiyle, son yıllarda yarı aktif sistemler üzerine araştırmalar yoğunlaşmıştır (Christopoulos & Filiatrault, 2006).



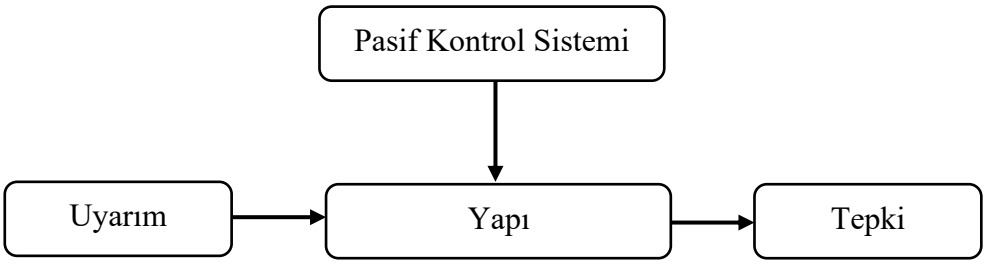
Şekil 2.19. İlave sönümleme sistemleri (Katsimpini vd., 2025)



Şekil 2.20. Aktif kontrol sisteminin temel unsurları (M. Symans & Constantinou, 1995)

Pasif sistemler ise dış enerji, aktüatör veya bilgisayar olmadan çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Tanım gereği, pasif sistemler yapıların sismik tepkisi sırasında değiştirilemeyen özelliklere sahiptir. Deprem enerjisinin nispeten dar bir frekans

bandında yoğunlaşması nedeniyle pasif sistemlerin etkin, sağlam ve ekonomik çözümler olduğu kanıtlanmıştır Şekil (2.21).

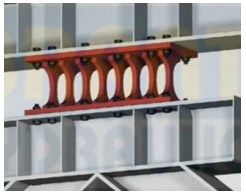
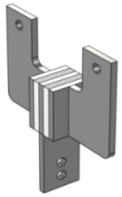
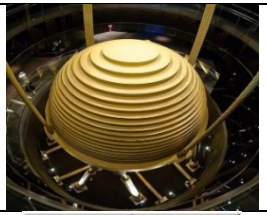
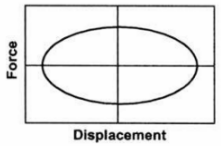
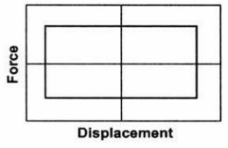
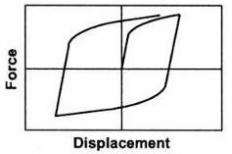
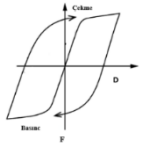
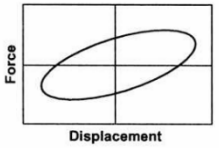
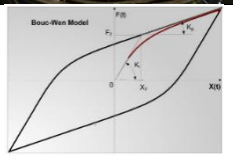
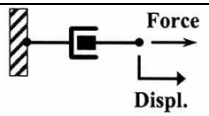
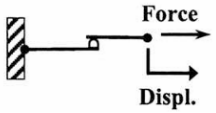
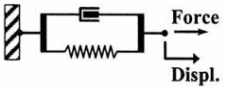
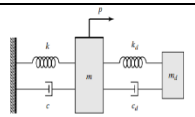


Şekil 2.21. Pasif kontrol sisteminin temel unsurları (M. Symans & Constantinou, 1995)

Bu tez kapsamında, yaygın olarak kullanılan pasif enerji sönümleyici türlerinden viskoz sönümleyiciler, sürtünmeli sönümleyiciler ve metalik sönümleyiciler ele alınmakta ve açıklanmaktadır. Sönümleyici türleri hıza, yer değiştirmeye ve hem hıza hem yer değiştirmeye bağlı sönümleyiciler olarak kategorize edilmektedir. Sönümleyici türlerinin idealize modelleri, avantajları ve dezavantajları Çizelge 2.2'de ayrıntılı bir biçimde verilmektedir.

Bu tez çalışmasında, deprem etkilerine karşı yapı performansını iyileştirmek amacıyla sıvı viskoz sönümleyiciler kullanılmıştır. Çalışma, bu sönümleyicilerin farklı konfigürasyonlarının, tek katlı prefabrik bir sanayi yapısına entegre edilmesi durumunda, yapının sismik davranışı üzerindeki etkilerini araştırmayı amaçlamaktadır.

Çizelge 2.1. Sönümleyici türlerinin karşılaştırılması

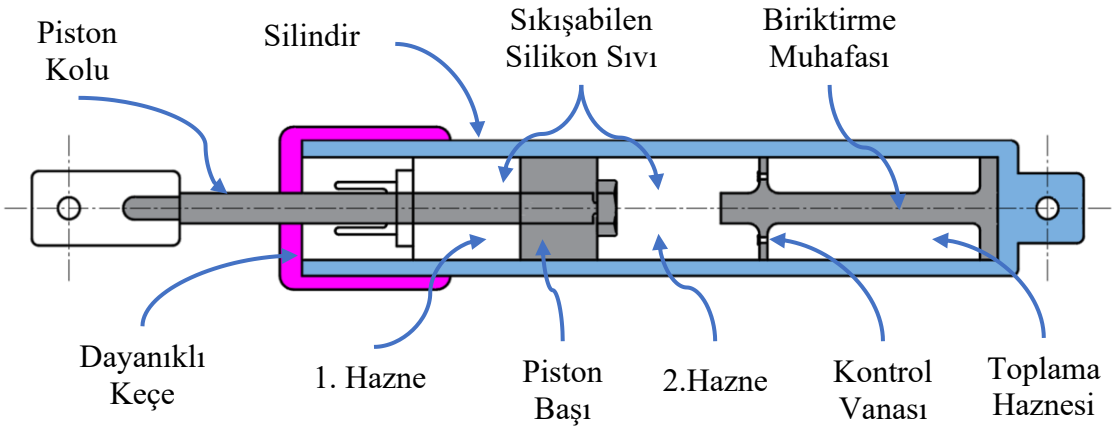
	Hıza bağlı sönümleyiciler	Yerdeğiştirmeye bağlı sönümleyiciler			Yerdeğiştirmeye ve hıza bağlı sönümleyiciler	
	Sıvı Viskoz Sönümleyici	Sürtünme Sönümleyici	Metal-Akma Sönümleyici	Burkulması Önlenmiş Çapraz	Viskoelastik Sönümleyici	Ayarlı Kütle Sönümleyici
ÖRNEK						
İdeal Histeretik Model						
İdealize Fiziksel Model			İdealize model mevcut değil			
Avantajlar	Düşük yer değiştirmelerde çalışır; Minimum geri getirme kuvveti; Sıcaklık/frekans bağımsız; Hem deprem hem rüzgar için uygun;	Yüksek enerji sönümleme kapasitesi; Sıcaklıktan etkilenmez; Basit ve düşük bakım gerektirir	Kararlı ve tekrarlanabilir enerji sönümleme; Uzun ömürlü güvenilirlik; Mühendisler için tanıdık malzeme ve davranış	Hem basınçta hem çekmede çalışır, enerji yutma kapasitesi yüksek, burkulma olmaz	Rijitlik ve sönüm sağlar; Doğrusal davranışı sayesinde kolay modellenir; Orijinal şekle dönebilir	Rüzgar/deprem kontrolü sağlar, Rüzgar ve düşük frekanslı titreşimlere karşı etkilidir; Pasif sistem; Çatı veya kulelere kolay kurulum
Dez-avantajlar	Sıvı sızıntısı riski aşırı; Aşırı sıcaklıklarda performans düşer;	Güçlü doğrusal olmayan; aşınmaya duyarlı; geri dönüş kuvveti yoksa kalıcı kayma oluşabilir	Deprem sonrası hasar alabilir; Değiştirilmeli; Doğrusal olmayan analiz gerekebilir	Ağır elemanlar, özel tasarım ve detay gerektirir, ilk maliyet yüksek olabilir	Sınırlı şekil değiştirme kapasitesi; Sıcaklık ve frekansa bağlı; Zamanla ayrılma/sorun yaşanabilir	Büyük kütle gerekir; Sadece belirli mod/frekanslara etkilidir; Yüksek frekanslara etkisiz
Yapı ve Davranış	Silikon/yağ bazlı sıvı ile dolu silindir içinde piston, Eliptik (hıza bağlı)	Yüksek sürtünmeli yüzeylerle çelik plakalar Coulomb sürtünme; dikdörtgen histerezis	X, U veya kelebek şekilli akma çelik plakalar: bilinear döngü; plastik enerji sönümü	Çelik çekirdek + dış gömlek	Çelik plakalar arasında ve malzeme; kuvvet–yer değiştirme eliptik döngüsü	Kütle-yay-sönümleyici sistem; rezonans kontrolü

2.2.1. Sıvı viskoz sönümleyiciler

Sıvı viskoz sönümleyiciler (SVS), enerjiyi sönümlemek için viskoz akışkanların hareketine dayanan cihazlardır. SVS'lerin temel çalışma prensibi, yapıların deprem, rüzgar gibi dinamik yükler altında maruz kaldığı titreşimlerin etkisiyle bir pistonun, bir silindir içerisinde bulunan akış direnci yüksek sıvıyı özel deliklerden (orifice) geçirerek ileri geri hareket etmesine dayanır (Symans et al., 2008). Bu sıvı genellikle silikon yağı gibi özel olarak seçilen, yüksek sıcaklıklarda bile akışkanlığını koruyan özelliktedir (Constantinou & Symans, 1993). Şekil 2.22'da pistonun soldan sağa doğru hareket ettiği durumu göz önünde bulundurduğumuzda (cihazın basınç kuvvetine maruz kaldığı durum), akışkanın 2 numaralı hazneden 1 numaralı hazneye doğru hareket ettiği görülür. Bu bağlamda, sönümleme kuvveti, bu iki hazne arasındaki basınç farkına orantılı olarak ortaya çıkar. Ancak, akışkan hacmi piston hareketi ve piston kolunun kesit alanının çarpımı sonucu azalır. Akışkan sıkıştırılabilir bir yapıya sahip olduğundan, hacimdeki bu azalma yineleyici (yay benzeri) bir kuvvetin oluşmasına neden olur. Bu olumsuz durum ise akümülatör kullanılarak engellenir. Test edilen cihaz, yaklaşık 4 Hz'den daha düşük frekansta gerçekleşen piston hareketleri için ölçülebilir bir rijitlik sergilememektedir (Christopoulos & Filiatrault, 2006). SVS'ler, sismik enerjiyi sönümlemek için binalarda kullanılan hıza bağlı cihazlardır. Kısaca çalışma prensibi aşağıdaki eşitlik yardımıyla özetlenebilir:

$$F(t) = C_d|V(\dot{t})|^{\alpha_{vd}} * sgn(V(\dot{t})) \tag{2.1}$$

F sönümleme kuvvetini, C_d sönümleme sabitini, V piston hareket hızını, α_{vd} ise eğri uydurma yoluyla belirlenen ve genellikle 0.1 ile 2 arasında değişen hız üssünü ifade eder (Christopoulos & Filiatrault, 2006; Constantinou & Symans, 1992).



Şekil 2.22. Sıvı viskoz sönümleyici bileşenleri (Lee & Taylor, 2001)

Hareketin Başlaması: Yapıya etki eden dinamik yükler (örneğin deprem ya da rüzgar) sonucunda yapı elemanları hareket etmeye başlar. Bu hareket, sönümleyicinin bağlı olduğu kısımlarda bir yer değiştirmeye sebep olur. Bu yer değiştirme, silindir içerisindeki pistonun hareketine neden olur.

Akış Direnci: Piston hareket ettikçe, silindir içindeki viskoz sıvı pistonun hareketine direnç gösterir. Bu direnç, akışkanın iç sürtünmesinden veya viskoz direncinden kaynaklanır. Sıvı, piston hareket ederken dar deliklerden (orifice) geçmeye zorlanır ve bu süreçte akışın viskozitesi nedeniyle enerji kaybı meydana gelir.

Enerji Dönüşümü: Pistonun hareketi sırasında ortaya çıkan kinetik enerji, viskoz sıvının bu direnci sayesinde ısıya dönüşür. Sıvı, hareket eden pistonun hızına ve sönümleyicinin tasarımına bağlı olarak bu enerjiyi sönümler.

Hız Bağımlı Sönümleme: SVS'lerin sönümleme kuvveti, pistonun hızına bağlıdır. Hız ne kadar yüksekse, viskoz sıvının direnci o kadar büyük olur. Bu kuvvet, genellikle hızın üssüne bağlı olarak (0.2 ile 2 arasında) hesaplanır. Bu da SVS'lere doğrusal veya doğrusal olmayan sönümleme karakteri kazandırır.

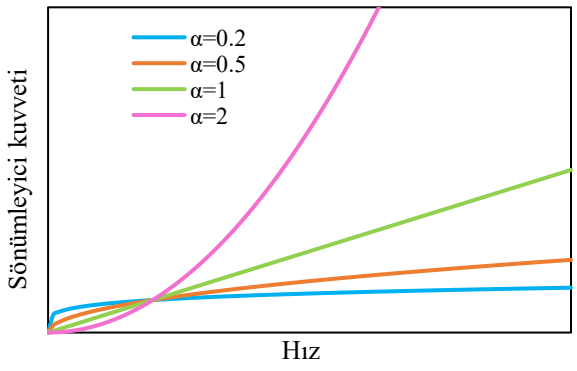
Isı Dağılımı: Sönümlenen kinetik enerji, sıvı içinde ısı olarak birikir. Ancak sönümleyici, bu ısıyı çevreye yayıp dağıtarak çalışmaya devam eder, böylece aşırı ısınma engellenir.

Doğrusal olmayan viskoz sönümleyicilerin ana avantajı, bir hız artışı durumunda sönümleyicinin veya bağlı olduğu sistemin aşırı yüklenmesini önlemek amacıyla viskoz sönümleyicinin içindeki kuvvetin kontrol edilmesidir. Doğrusal olmayan bir viskoz sönümleyici tarafından geliştirilen eksenel kuvvet F(t), aşağıdaki denklemler yardımıyla ifade edilir:

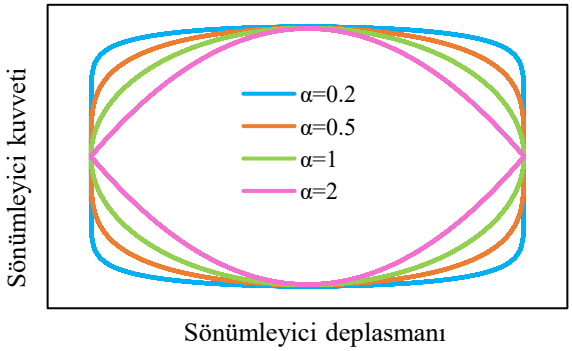
$$F(t) = C_d|V(\dot{t})|^{\alpha_{vd}} * sgn(V(\dot{t})) \tag{2.2}$$

$$F(t) = C_{NL}\,\dot{x}(t) \tag{2.3}$$

burada C_{NL} doğrusal olmayan viskoz sönümleme sabitidir ve α_{vd} 0.2 ile 2 arasında önceden belirlenmiş bir hız katsayıdır. $\alpha_{vd} = 1$ olduğunda, cihaz doğrusal viskoz sönümleyici gibi davranır ve (2.2) numaralı denklem, (2.3) numaralı denkleme eşdeğerdir. Öte yandan $\alpha_{vd} > 1$ olduğunda, cihaz yüksek hızlarda büyük kuvvetler üreterek yük iletimi veya kilitlenme birimi olarak işlev görür. Kilitleme cihazları (Lock-up units), geçici rüzgar veya sismik titreşimler sırasında bir köprüdeki bitişik açıklıklar gibi bir yapının birden fazla yanal yüke dayanıklı elemanını birbirine bağlamak için kullanılabilir. Şekil 2.23'de gösterildiği gibi, $\alpha_{vd} < 1$ olan doğrusal olmayan viskoz sönümleyicilerin kullanılmasının avantajı yüksek hızlarda sönümleyici kuvvetlerinin azaltılmasıdır. Benzer şekilde, $\alpha_{vd} < 1$ olan durumlarda daha büyük sönümlerin elde edildiğini gösteren kuvvet-deplasman ilişkileri Şekil 2.24'de verilmektedir.



Şekil 2.23. Viskoz sönümleyicilerin kuvvet-hız ilişkisi

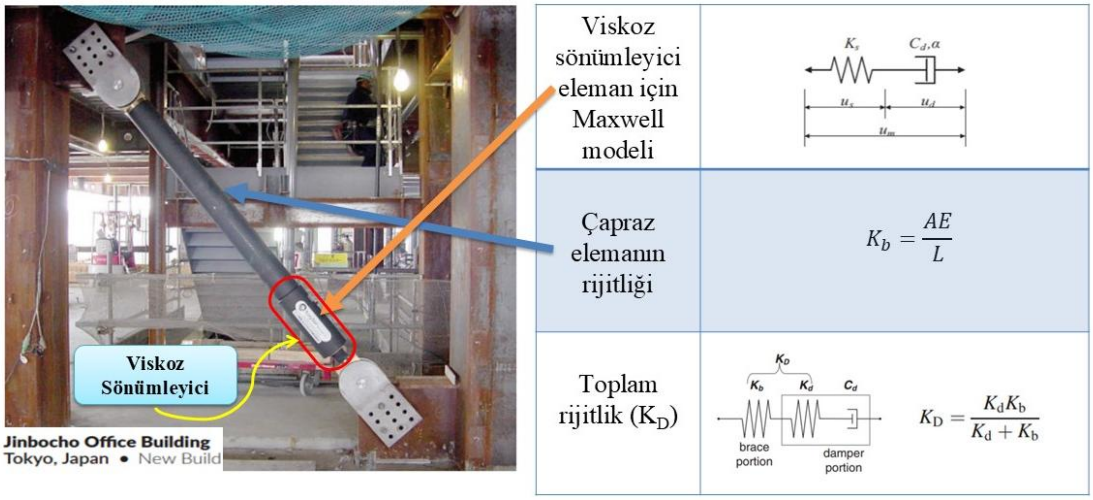


Şekil 2.24. Viskoz sönümleyicilerin kuvvet-deplasman ilişkisi

Viskoelastik akışkan davranışı sergileyen SVS'lerin bu davranışını dikkate alabilecek en basit model Maxwell modelidir (Constantinou & Symans, 1992). Maxwell matematik modeli Şekil 2.25'de gösterilmektedir. Bu model, doğrusal bir yay sistemi ile seri olarak bağlanmış doğrusal olmayan bir sönüm elemanından oluşmaktadır ve yay sabiti aşağıdaki eşitlikler yardımıyla hesaplanmaktadır. K_d sönümleyicinin rijitliğini ifade eder. Toplam etkin rijitlik K_D, denklem (2.4) ile hesaplanmaktadır. Çapraz elemanının rijitliği (K_b), çapraz elemanın boyutları kullanılarak formül (2.5) ile hesaplanmıştır. Burada E elastisite modülünü, A çapraz elemanın alanını ve L çapraz elemanın uzunluğunu temsil etmektedir.

$$\frac{1}{K_D} = \frac{1}{K_d} + \frac{1}{K_b} \tag{2.4}$$

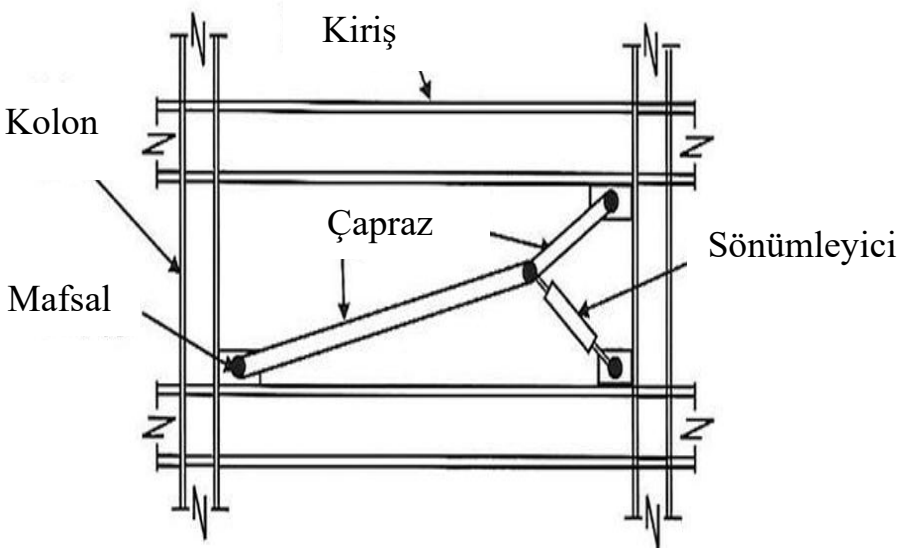
$$K_b = \frac{EA}{L} \tag{2.5}$$



Şekil 2.25. SVS için Maxwell modeli (Taylor Devices, 2024; Yu vd., 2013)

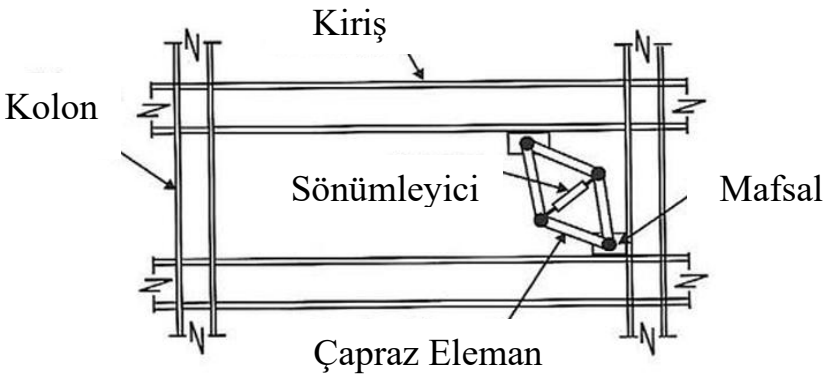
2000 yılı öncesinde yapılan araştırmalar, tüm ek sönümleme sistemlerinin geometrik konfigürasyonlarının ya diyagonal elemanlarla ya da çaprazlama sisteminin tepe noktasında yatay olarak konumlandırıldığını (yatay tipi) göstermektedir. Ancak, bu iki konfigürasyon dışında sismik performans açısından optimum konfigürasyonlar araştırılmıştır. Bu doğrultuda, ek sönümleme sistemlerinin etkinliği, belirli katlar arası ötelenme sırasında sönümleyici üzerindeki yer değiştirmeyi artıracak şekilde tasarlanan geometrik konfigürasyonlarla iyileştirilmiştir. Bu amaçla literatürde iki temel geometrik konfigürasyon önerilmiştir: toggle-konfigürasyonu (Constantinou et al., 2001) ve makas kriko konfigürasyonu (Şigaher & Constantinou, 2003). Her iki konfigürasyon da çeşitli ek sönümleme sistemleri ile uyumlu şekilde kullanılabilmesine rağmen, mevcut uygulamaların tamamı akışkan viskoz sönümleyiciler üzerine yoğunlaşmıştır.

Toggle sisteminin genel geometrik düzenlemesi, tipik bir bina bölmesinde ek bir sönümleyici içeren haliyle Şekil 2.26'te gösterilmiştir. Tek bir çapraz eleman kullanmak yerine, toggle sistemi, bir montaj pimi ile birbirine bağlanan iki ayrı çapraz elemana sahip düzenekten oluşur. Sönümleyici, montaj pimi ile bölmenin karşı alt köşesine bağlanır. Bölmenin ve toggle sisteminin geometrisine bağlı olarak, sönümleyicinin uçları arasındaki yer değiştirme, yatay katlar arası ötelenmeden daha büyük olabilir (Christopoulos & Filiatrault, 2006; Constantinou et al., 2001).



Şekil 2.26. Toggle-Brace (bağlantılı) sisteminin geometrik düzenlemesi (Constantinou et al., 2001)

Öte yandan, makas kriko sisteminde, ek sönümleyici, otomotiv endüstrisinde kullanılan krikonun geometrik düzenlemesine benzer şekilde, çapraz elemanların arasına yerleştirilir (Şekil 2.27). Katlar arası belirli bir ötelenme değeri için sönümleyici yer değiştirmesini artırmak amacıyla, makas kriko düzeneği bölmenin alt köşesi ile üst kirişe bağlı montaj pimi arasına yerleştirilir.



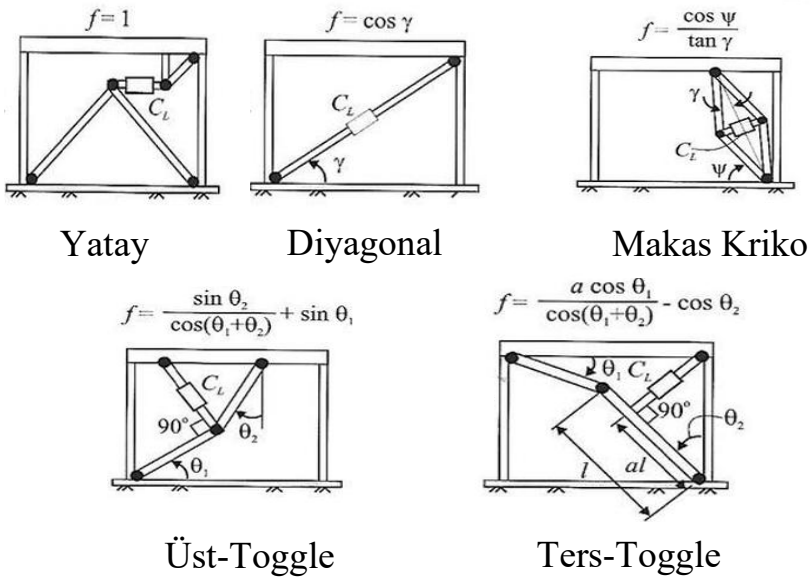
Şekil 2.27. Makas kriko sisteminin geometrik düzenlemesi (Şigaher & Constantinou, 2003).

Şekil 2.28'de aynı çerçeve sistemine farklı konfigürasyonlara sahip SVS'ler yerleştirilmiştir. Çizelge 2.2'de ise yapıda sönümleyiciler tarafından üretilen sönüm

değerleri (ξ) ve büyütme katsayıları (*f*) verilmiştir. Tüm konfigürasyonlarda kullanılan doğrusal viskoz sönümleyicinin, yatay sisteminde yatay olarak monte edildiğinde kritik sönümlemenin %5'ine eşdeğer bir sönüm oranı sağladığı varsayılmaktadır. Sonuçlar değerlendirildiğinde, toggle ve makas kriko konfigürasyonlarına ait sönümleyicinin sağladığı eşdeğer sönümleme oranlarının, diyagonal ve yatay konfigürasyonlarına kıyasla çok daha yüksek olduğunu açıkça göstermektedir. Yarı ölçekli bir çelik model üzerinde yapılan sarsma masası testlerinin bu sonuçları doğruladığı belirtilmiştir (Şigaher & Constantinou, 2003).

Çizelge 2.2. Farklı konfigürasyonlarda sağlanan sönümlemenin sayısal örnekleri (Christopoulos & Filiatrault, 2006)

Konfigürasyon	Geometrik Parametreler	*f*	ξ
Yatay	-	1.00	0.05
Diyagonal	γ=37°	0.80	0.03
Üst Toggle	θ_1=31.9°, θ_2=43.2°	3.19	0.51
Ters Toggle	θ_1=30°, θ_2=49° a=0.7	2.52	0.32
Makas Kriko	γ=9°, ψ=70°	2.16	0.23



Şekil 2.28. Tek katlı yapılarda doğrusal viskoz sönümleme sistemleri için geometrik büyütme faktörleri ve sönüm oranları (Şigaher & Constantinou, 2003).

Yeni veya mevcut binalara sönümleyiciler eklemek, göreli kat ötelemeleri ve kat ivmelerini azaltmaya yardımcı olur; yapısal elemanlarda elastik olmayan davranış yerine hareketin ısıya dönüştürülmesi yoluyla enerjiyi sönümler; bina yük direncini artırır ve deprem kaynaklı hasarları azaltır (Taylor Devices, 2024). Aşağıda, Taylor Device şirketi tarafından üretilen SVS'lerin yeni ve mevcut binalarda uygulamaları ile geometrik konfigürasyonları gösterilmektedir (Şekil 2.29). Bu konfigürasyonlarda, sönümleyiciler iki çalışma noktası arasında aynı eksende konumlanmakta olup, sönümleyiciyi bağlamak için bir uzatıcı/ek destek kullanılmaktadır; bu ek destek, ayrı bir HSS (Hollow Structural Section) bölümü veya entegre bir eleman şeklinde tasarlanabilir. Bu konfigürasyonlardaki sönümleyiciler, kat ötelemesinin açısal bileşenlerinden faydalanarak enerji dağılımında bir miktar verimlilik kaybına neden olmaktadır ($1/\cos^2\theta$). Dolayısıyla, sönümleyicilerin yatay düzlemden 45 derece açıdan daha dik bir konumda olmaması, iyi bir genel kural olarak kabul edilmektedir. Ancak, sönümleme fonksiyonu, belirli koşullara göre ayarlanarak herhangi bir makul açıya uyum sağlanabilir.



Şekil 2.29. Yeni ve mevcut yapılarda kullanılan viskoz sönümleyici konfigürasyonları a) Jinbocho ofis binası (Tokyo, Japonya) Yeni yapı b) Portland eyalet üniversitesi öğrenci birliği (Portland, OR) Güçlendirme (Mevcut) c) Olimpiyat binası (Kıbrıs) Yeni yapı d) Yerba buena kulesi (San Francisco, CA) Yeni yapı (Taylor Devices, 2024)

Sönümleyiciler, taban izolatörlerin yer değiştirmesini azaltmak amacıyla izolasyon düzlemi boyunca uzanan temel izolasyon sistemlerine de eklenebilir. Bu durumda, sönümleyiciler yatay veya hafif eğimli olarak yerleştirilir ve küresel mesnetlerdeki pimler, izole edilen bina hareket ettikçe yatay düzlemde serbest hareket sağlaması için dikey olarak monte edilir. Şekil 2.30, temel izolasyon sistemlerine sönümleyicilerin eklendiği farklı uygulamaları göstermektedir (Taylor Devices, 2024).



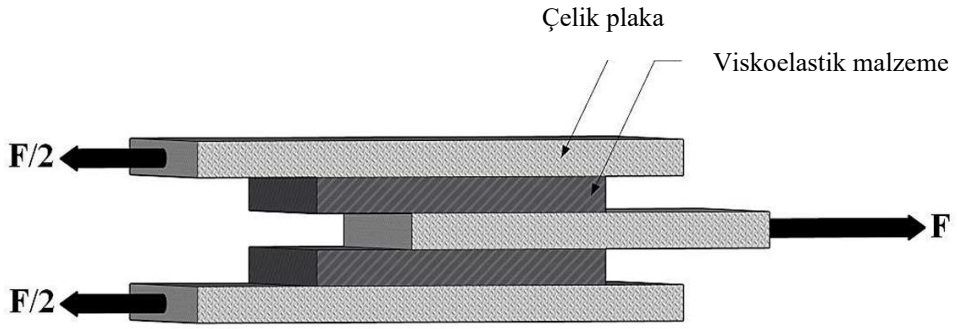
Şekil 2.30. Sismik izolatörlerle birlikte ve köprülerde kullanılan viskoz sönümleyici uygulamaları a) Loma Linda üniversitesi tıp merkezi (Loma Linda, CA) Yeni İnşaat b) Boğaziçi 1. Köprüsü (İstanbul, Türkiye) Güçlendirme (Mevcut), (Taylor Devices, 2024; Teknik, 2025)

2.2.2. Viskoelastik sönümleyiciler

Viskoz ve/veya viskoelastik malzemelerle titreşim kontrolü, uzun yıllardır uçak ve havacılık yapılarında uygulanmaktadır. İnşaat Mühendisliği yapılarında ise viskoelastik sönümleyicilerin (VE) ilk kullanımı, New York'taki Dünya Ticaret Merkezi'nin ikiz kulelerinin her birine 10.000'den fazla viskoelastik sönümleyicinin yerleştirildiği 1969 yılına dayanmaktadır. Bu sönümleyiciler rüzgarın neden olduğu titreşimleri azaltmak amacıyla tasarlanmıştır (Christopoulos & Filiatrault, 2006).

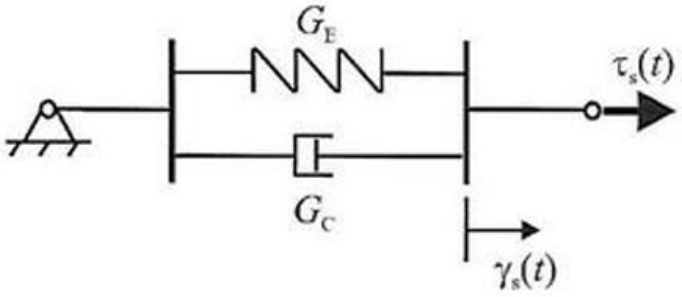
Viskoz sönümleyiciler yalnızca hıza bağlı bir kuvvet sağlar ve bu nedenle sisteme dengeleyici kuvvet sağlayan bir yapı ile birlikte kullanılmalıdır. Viskoelastik sönümleyiciler ise, sisteme ek viskoz sönümleme sağlayan hıza bağlı bir kuvvetin yanı sıra, yer değiştirmeye bağlı elastik bir dengeleyici kuvvet de sağlar. Yapısal uygulamalarda kullanılan viskoelastik sönümleyiciler kopolimerlerden (eşpolimer) veya

camsı maddelerden yapılır. Şekil 2.31'de gösterilen tipik bir VE sönümleyici, çelik plakalarla yapıştırılmış viskoelastik katmanlarından oluşur. Bir yapıya monte edildiğinde, yapısal titreşim dış çelik flanşlar ve merkez plakalar arasında göreli hareket oluşturduğunda sismik enerjiyi viskoelastik malzemenin kayma deformasyonları yardımıyla sönümler (Soong & Spencer, 2002).



Şekil 2.31. Tipik ve sönümleyici şematik diyagramı (Vatanshenas et al., 2018)

İsimlerinden de anlaşılacağı üzere, VE malzemeler sadece viskoz olmayıp aynı zamanda elastik bir tepki de sergilerler. Bu davranışı temsil etmek için kullanılabilecek en basit model Şekil 2.32'da gösterilen Kelvin katı modelidir. Elastik kayma modülü G_E sembolü ile gösterilirken, kayma viskoz sönümleme sabiti G_c sembolü ile gösterilir. Kelvin katısı için kayma gerilmesi-şekil değiştirme (τ_s (t)- γ_s (t)) bünye ilişkisini türetmek için, Şekil 2.32'daki elemanın birim yükseklik ve birim alana sahip olduğu varsayılır. Başka bir deyişle, yer değiştirmeler kayma gerilmesi ile, kuvvetler de normal gerilme ile ifade edilebilir.



Şekil 2.32. Kelvin katı modeli (Christopoulos & Filiatrault, 2006)

Şekil 2.33'da gösterildiği gibi, yer ivmesine maruz kalan ve yatay ile γ açısıyla eğimli bir diyagonal destek elemanına yerleştirilmiş bir viskoelastik sönümleyici ile donatılmış tek katlı bir çerçeve dikkate alındığında, ilk yaklaşım olarak, destek elemanının sonsuz rijit olduğunu varsayılabilir. Bu durumda hareket denklemi şu şekilde yazılabilir:

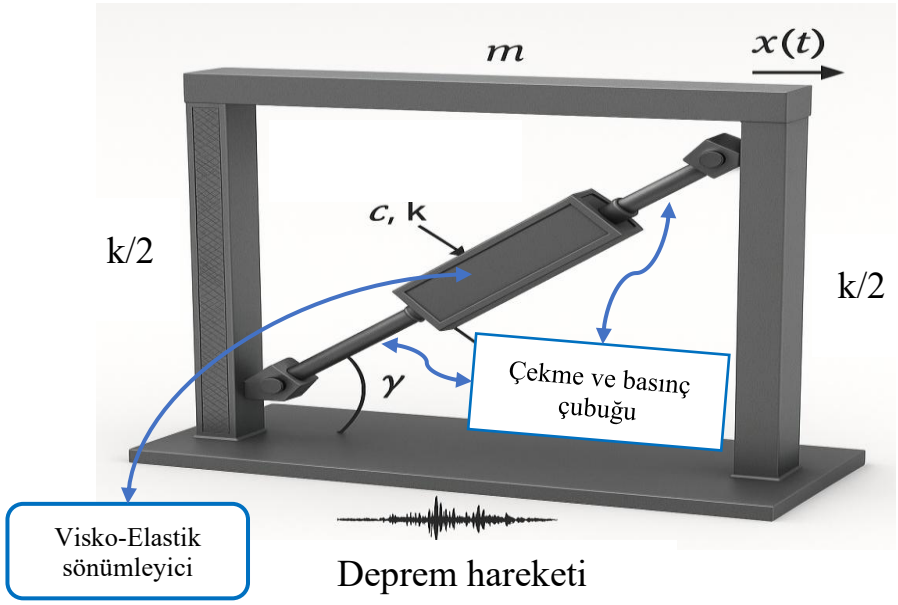
$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) + F_{Ved}(t) = -m\ddot{x}_g(t) \tag{2.6}$$

burada $F_{Ved}=F(t)\cos(\gamma)$ viskoelastik sönümleyici tarafından sağlanan yanal kuvvettir ve c ise desteklenmemiş yapının eşdeğer viskoz sönümleme sabitidir. Sönümleme malzemesi boyunca kesme kuvvetine karşılık gelen destek elemanı F(t)'deki eksenel kuvvet-deplasman ilişkisi denklem (2.7) ile verilir:

$$F(t) = \bar{k}x(t) + \bar{c}\dot{x}(t) \tag{2.7}$$

$$x(t) = X_0 \sin(wt) \tag{2.8}$$

Burada $\bar{k} = \frac{G_E A_S}{h}$, $\bar{c} = \frac{G_C A_S}{h}$, h kayma kalınlığını, A_s ise kayma alanını ifade etmektedir.



Şekil 2.33. Viskoelastik sönümleyici yerleştirilmiş tek katlı yapı, (Christopoulos & Filiatrault, 2006)

2.2.3. Sürtünme sönümleyiciler

Hareket eden bir cisimden kinetik enerji elde etmek için mevcut olan yöntemler arasında en yaygın olarak benimsenen şüphesiz sürtünme yöntemidir. Sürtünme mekanizmasında örneğin bir araçta sürtünme freni uygulandığında, iki yüzey temas eder ve sürtünme oluşur. Bu sürtünme kuvveti, nesnenin hareketine karşı koyar ve kinetik enerjiyi sürtünme yoluyla ısı enerjisine (ısıya) dönüştürür. Bunun nedeni, enerjiyi dağıtmanın en etkili, güvenilir ve ekonomik yolu olmasıdır. Bu kavram, binaların deprem kaynaklı yatay yükler nedeniyle meydana gelen titreşim hareketlerini kontrol etmek için inşaat sektörüne de aktarılmıştır. Sürtünme sönümleyicilerin (SS) kullanımı, yapıların büyük depremlere karşı dayanıklı olacak şekilde tasarlanması için pratik, ekonomik ve etkili yeni bir yaklaşım sağladığını göstermiştir. İlk inşaat maliyetindeki tasarrufun yanı sıra, bina ve içerisindeki hasar en aza indirildiği için yaşam döngüsü maliyetindeki tasarruf da önemli olabilir (Pall et al., 1993).

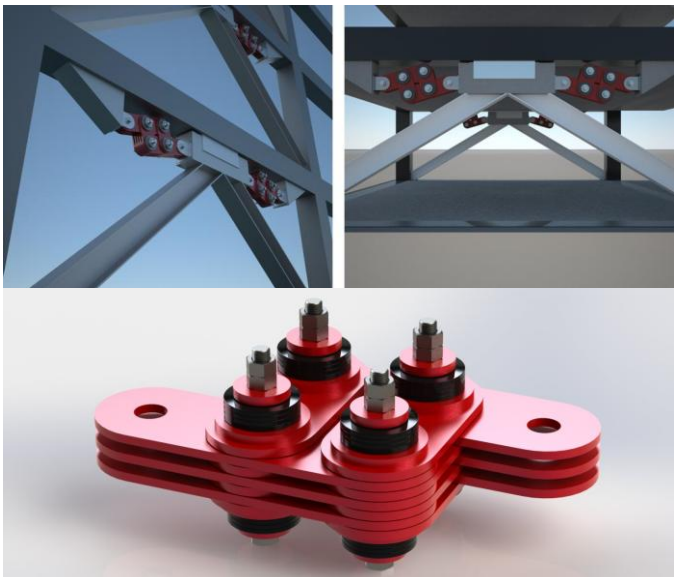
SS'ler, inşaat mühendisliğinde deprem ve rüzgar gibi dinamik yüklerden gelen enerjiyi sürtünme yoluyla azaltmak için kullanılan bir tür pasif enerji dağıtma cihazlarıdır (Şekil 2.34). Sönümleyicinin parçaları birbirlerine göre kayarken dirençli kuvvetler oluşturarak çalışırlar ve deprem kaynaklı enerjiyi sürtünme yoluyla ısı enerjisine dönüştürürler. SS'ler harekete direnmek için kuru sürtünme prensiplerini kullanır. Cıvatalar, yaylar veya diğer mekanizmalar kullanılarak birbirine kenetlenmiş çelik plakalardan veya diğer sürtünme arayüzlerinden oluşurlar. Deneysel testler sürtünme sönümleyicilerin davranışını tanımlamak için makul bir modelin idealize edilmiş Coulomb sürtünme modeli tarafından verildiğini göstermiştir;

$$F = \mu N \times sgn(\dot{u}) \tag{2.9}$$

burada μ dinamik sürtünme katsayısı ve N kayma arayüzündeki normal kuvveti göstermektedir. İdealize edilmiş Coulomb modeli normal kuvvetin ve sürtünme katsayısının uzun süreli etkileşimler boyunca sabit kaldığı varsayımına dayanmaktadır.

Yapısal çerçevedeki deformasyonlar, büyük ölçüde sürtünme kuvveti bitene kadar sınırlı kalır; bu nedenle, sönümleyiciler yapısal sisteme başlangıç rijitliği kazandırır. Ancak, SS

sisteminde bir geri yükleme kuvveti mekanizması sağlanmadığı takdirde, deprem sonrası yapıda kalıcı deformasyonlar oluşabileceği unutulmamalıdır (Symans et al., 2008).

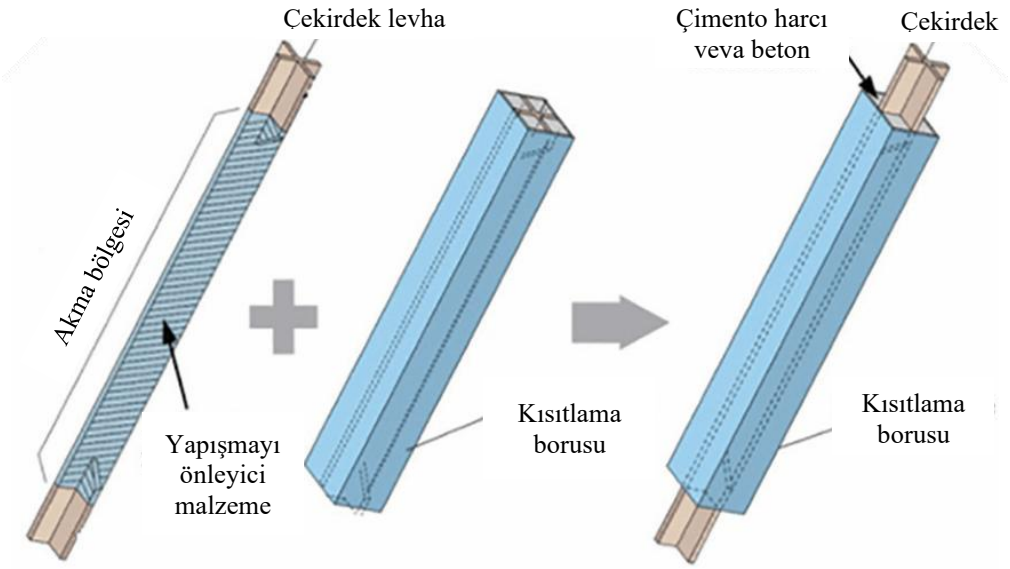


Şekil 2.34. Sürtünme tipi sönümleyici (Damptech, 2025)

2.2.4. Burkulması önlenmiş çaprazlar

Yapıya rijitlik ve enerji sönümleme sağlayan, aynı zamanda akma davranışı sergileyen yapısal çelik eleman, burkulması önlenmiş çapraz (BÖÇ) olarak adlandırılmaktadır. BÖÇ, sismik hareketler sırasında enerji sönümlemek ve dayanımı artırmak için tasarlanmış yenilikçi yapısal elemanlardır. Japonya'da Nippon Steel Corporation tarafından üretilen bu tür bir burkulmaya karşı bağlantısız çapraz (unbonded brace) olarak bilinir. Şekil 2.35'de gösterildiği gibi, bağlantısız çapraz eleman; çekirdek levha olarak adlandırılan bir çelik çekirdek elemanının, betonla doldurulmuş bir çelik tüp içerisine yerleştirilmesinden oluşur. Çelik çekirdek, eksenel yükleri taşırken, dıştaki tüp, beton aracılığıyla çekirdeğe yanal destek sağlayarak çekirdeğin burkulmasını önler. Beton-çelik çekirdek arayüzü boyunca bulunan ince bir kayganlaştırıcı malzeme, uzama sırasında kayma transferini ve lokal şekil değiştirme yığılmalarını ortadan kaldırır. Aynı zamanda çelik çekirdeğin çekme ve basınçta akma durumunda boyuna kısalma ve uzamasını da sağlar. BÖÇ'lerin geleneksel çaprazlara göre avantajı hem çekme hem de basınç ile yüklendiklerinde yük taşıma, akma ve dolayısıyla enerji tüketme kabiliyetleridir. Bunun

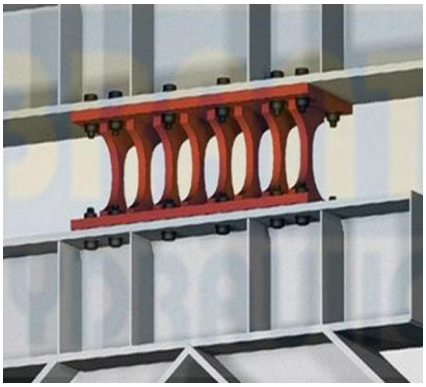
aksine, geleneksel çaprazlar çekmeyle yüklendiklerinde elastik olmayan akma yoluyla tam kapasitelerine ulaşırken, basınçla yüklendiklerinde önemli miktarda enerji tüketmeden burkulurlar. Bu tasarım, burkulmayı etkili bir şekilde önlerken, yanal yükler altında kontrollü akmaya izin verir. Akma mekanizması, enerji sönümlemesini histeretik davranış yoluyla sağlar ve yapıya iletilen kuvvetleri ve potansiyel hasarı önemli ölçüde azaltır. Geleneksel merkezi çaprazlara kıyasla, BÖÇ'ler aşırı yükler altında stabilitelerini ve dayanıklılıklarını korur, bu da onları yüksek katlı binalar ve köprüler için uygun hale getirir (Christopoulos & Filiatrault, 2006; Fujimoto et al., 1990; Soong & Spencer, 2002).



Şekil 2.35. Burkulması önlenmiş çapraz (BÖÇ) (Yue et al., 2019)

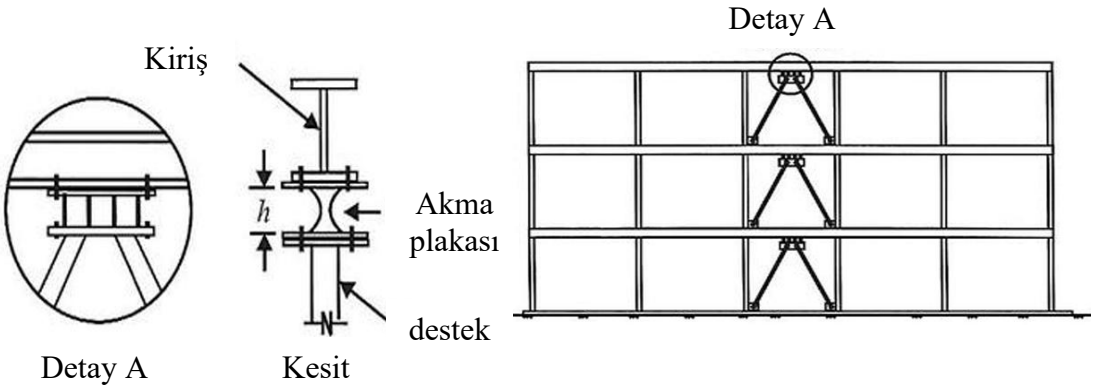
2.2.5. Metalik sönümleyiciler

Metalik sönümleyiciler deprem, rüzgar veya mekanik titreşimler gibi dinamik yüklerden gelen enerjiyi sönümlemek için kullanılan pasif enerji sönümleme cihazlarıdır. Enerji sönümleme, metalik bileşenlerin kontrollü plastik deformasyonuna izin vererek gerçekleştirilir ve bu sayede yapı üzerindeki dinamik kuvvetlerin etkisi azaltılır. Bu cihazların uygulanmasında birçoğu üçgen veya çapraz (X) şekilli yumuşak çelik plakalar kullanılır, böylece akma malzeme boyunca neredeyse eşit bir şekilde yayılır. Tipik bir X şekilli plaka sönümleyici cihazı Şekil 2.36'de gösterilmektedir (Soong & Spencer, 2002).



Şekil 2.36. Metalik (Akma) sönümleyici (MS) (Brant Hydraulics, 2025)

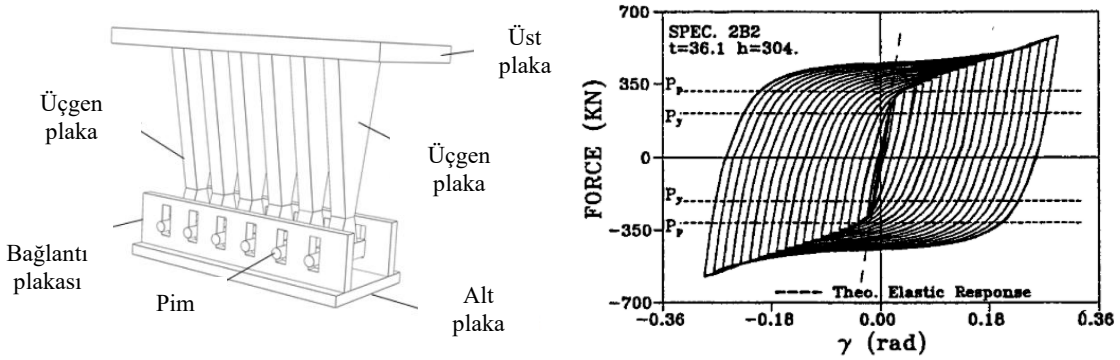
Metalik sönümleyiciler Şekil 2.37'te gösterildiği gibi yatay destek sistemlerinin bir bileşeni olarak kullanılabilir. Bu konfigürasyonda, akma cihazları sistemin tepe noktası ile üst kat seviyesi arasındaki göreli yatay yer değiştirme yoluyla enerjiyi sönümler. Metalik plakalar kullanılırsa, Şekil 2.37'te gösterildiği gibi sabit kirişler olarak işlev görürler. Cihazın enerji tüketimini en üst düzeye çıkarmak için herhangi bir kesitteki plastik momente aynı anda ulaşılması hedeflenir. Bu koşulu elde etmek için metalik sönümleyicinin geometrisi optimize edilmelidir.



Şekil 2.37. Akma cihazlarının yatay destekleme sistemlerinin bir parçası olarak kullanımı (Christopoulos & Filiatrault, 2006)

Yapılan araştırmalar, yatay destekleri ve ilave sönümleme - ilave rijitlik sistemi elemanlarının eklediği rijitliğin, yapı sisteminin temel doğal periyodunda önemli ölçüde bir azalmaya neden olduğunu göstermiştir. Bu cihazlar, çelik plakalar serisinden oluşup bir yatay destekleme sistemine bağlanır. Yapı deformasyona uğradıkça plakalar, kesme

kuvvetlerine maruz kalır ve bu durum eğilme momentlerine ve akmaya yol açar. İlave sönümleme - ilave rijitlik sönümleyicileri, plakalar boyunca gerilmeleri homojen bir şekilde dağıtacak şekilde tasarlanmıştır; tipik geometrileri üçgen ya da kum saati şekilli olabilir. İlave sönümleme - ilave rijitlik cihazları, elastik olmayan malzeme davranışı sergilediğinden, deprem sonrası hasar görme ve yenilenme gereksinimi ortaya çıkabilir. Bu cihazların enerji sönümleme mekanizması, histeretik davranış modelleri ile tanımlanır (Şekil 2.36).



Şekil 2.38. Üçgen İlave Sönümleme - İlave Rijitlik (ÜİSİRS) Sistemler (TADAS (Mohammadi vd., 2017; Tsai vd., 1993)

Tsai ve arkadaşları (1993) üçgen metalik plaka damperler kullanarak Üçgen ilave sönümleme - ilave rijitlik sisteminin bir varyasyonunu geliştirmiştir. Üçgen ilave sönümleme - ilave rijitlik cihazının üçgen plakaları bir üst plakaya rijit bir şekilde kaynaklanır ancak basitçe oluklu bir taban plakasına bağlanır (Şekil 2.38). Bunun ana avantajı, taban plakasındaki oluklu delikler nedeniyle yerçekimi yüklerinden etkilenmemesidir. Ayrıca, destek bağlantı tertibatının üst kısmında herhangi bir dönme kısıtlaması gerekmemektedir (Christopoulos & Filiatrault, 2006; Tsai et al., 1993).

2.3. Prefabrik yapıların performans hedefleri

Bu bölümde TBDY (2018), ASCE 41-17 ve Eurocode 8 yönetmeliklerinin performans seviyeleri karşılaştırılmaktadır. TBDY (2018) Bölüm 5'te, deprem etkisi altında binaların şekil değiştirmeye göre değerlendirilmesi ve tasarımı için hesap esaslarına dair kurallar belirtilmiştir. TBDY (2018)'e göre performans hedefleri Kesintisiz Kullanım (KK), Sınırlı Hasar (SH), Kontrollü Hasar (KH) ve Göçmenin Önlenmesi (GÖ) olarak tanımlanmıştır. ASCE/SEI 41-17 (2017) yönetmeliğinde ise Bölüm 10, üç hasar sınırı tanımı sunmaktadır: Hemen Kullanım (Immediate Occupancy - IO), Can Güvenliği (Life Safety - LS) ve Göçmenin Önlenmesi (Collapse Prevention - CP). Eurocode 8'in "Depreme Dayanıklı Yapıların Tasarımı" başlıklı Bölüm 3'e (CEN 2005), yapıların değerlendirilmesi ve güçlendirilmesi ele alınmaktadır. Bu bölümde kesit hasar sınırları üç farklı hasar durumu olarak tanımlanmaktadır: Hasar Sınırlama (Damage Limitation - DL), Önemli Hasar (Significant Damage - SD) ve Göçme Durumu (Near Collapse - NC).

2.3.1. TBDY (2018)'e göre performans hedefleri

TBDY (2018) yönetmeliğinin 15. Bölümünde mevcut binaların deprem performanslarının değerlendirilmesine yönelik kurallar bulunmaktadır. Bu bölümde, mevcut binaların deprem performanslarının belirlenmesinde kullanılacak şekil değiştirme sınırları için 5.Bölüm'de sunulan tanımlamalar esas alınmaktadır.

Kesit Hasar Durumları

TBDY 2018'e göre, sünek elemanlar için kesit düzeyinde üç farklı hasar sınır değeri belirlenmiştir: Sınırlı Hasar (SH), Kontrollü Hasar (KH) ve Göçme Öncesi Hasar (GÖ). Sınırlı hasar ilgili kesitte sınırlı oranda elastik ötesi davranışı, kontrollü hasar kesit dayanımının güvenli olarak sağlanabileceği elastik ötesi davranışı, göçme öncesi hasar durumu ise kesitte ileri düzeyde elastik ötesi davranışı tanımlamaktadır. Gevrek hasar davranışı sergileyen elemanlarda bu sınıflandırma geçerli değildir. TBDY (2018)'de kesit hasar sınırları için beton ve donatıda izin verilen birim şekil değiştirme ve plastik dönme• sınır değerleri Çizelge 2.3'de verilmiştir.

Çizelge 2.3. Kesit hasar sınırları için izin verilen birim şekil değiştirme değerleri

Kesit Hasar Sınırı	Beton ŞD Sınırı	Donatı ŞD Sınırı	Plastik Dönme
Sınırlı Hasar (SH)	$(\varepsilon_c)_{SH} = 0.0025$	$(\varepsilon_s)_{SH} = 0.0075$	$\theta_p^{SH} = 0$
Kontrollü Hasar (KH)	$(\varepsilon_c)_{KH} = 0.75\varepsilon_c^{(G\ddot{O})}$	$(\varepsilon_s)_{KH} = 0.75\varepsilon_s^{(G\ddot{O})}$	$\theta_p^{KH} = 0.75 \times \theta_p^{G\ddot{O}}$
Göçmenin Önlenmesi (GÖ)	$(\varepsilon_c)_{G\ddot{O}} = 0.0035 + 0.04\sqrt{(w_{we})} \le 0.0018$ * $(\varepsilon_c)_{G\ddot{O}} = 0.0035 + 0.07\sqrt{(w_{we})} \le 0.0018$ **	$(\varepsilon_s)_{G\ddot{O}} = 0.4\varepsilon_{su}$	$\theta_p^{G\ddot{O}} = \frac{2}{3}\left[(\emptyset_u - \emptyset_y)L_p\left(1 - 0.5\frac{L_p}{L_s}\right) + 4.5\emptyset_u d_b\right]$

*Dikdörtgen kesitlerde ** Dairesel kesitlerde

Göçmenin Önlenmesi kesit hasar sınırına ait plastik dönme denkleminde yer alan $\emptyset_u$ değeri göçme öncesi toplam eğriliği [m^{-1}], $\emptyset_y$ akma eğriliğini [m^{-1}], d_b boyuna donatı çapını, L_p plastik mafsal boyunu ve L_s de kesme açıklığını temsil etmektedir. Etkin sargı donatısının mekanik donatı oranı (w_{we})

$$w_{we} = \alpha_{se}\rho_{sh,min}\left(\frac{f_{ywe}}{f_{ce}}\right) \tag{2.8}$$

Denk. (2.8)'de yer alan α_{se} sargı donatısı etkinlik katsayısı'nı, $\rho_{sh,min}$ dikdörtgen kesitte iki yatay doğrultuda hacimsel enine donatı oranının küçük olanını, f_{ywe} enine donatının ortalama (beklenen) akma dayanımını göstermektedir. Dikdörtgen ve dairesel kesitlerde sargı donatısı etkinlik katsayısı (α_{se}) sırasıyla Denklem (2.9a) ve (2.9b) ile belirlenmektedir.

$$\alpha_{se} = \left(1 - \frac{\sum \alpha_i^2}{6b_0h_0}\right)\left(1 - \frac{s}{2b_0}\right)\left(1 - \frac{s}{2h_0}\right) \tag{2.9a}$$

$$\alpha_{se} = \left(1 - \frac{s}{2D}\right)^n \tag{2.9b}$$

Göz önüne alınan doğrultuda enine donatının hacimsel oranı dikdörtgen ve dairesel kesitler için Denklem (2.10a) ve Denklem (2.10b) ile hesaplanmaktadır.

$$\rho_{sh} = \frac{A_{sh}}{b_k s} \tag{2.10a}$$

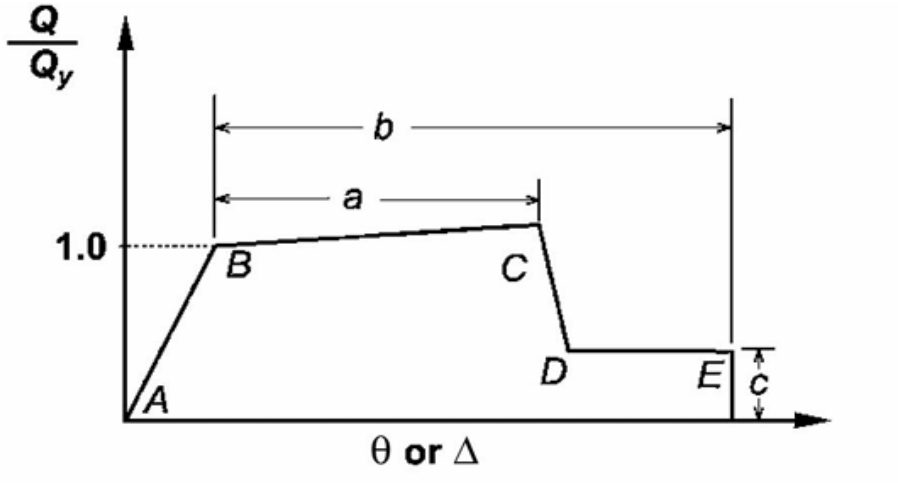
$$\rho_{sh} = \frac{2A_{OS}}{Ds} \qquad (2.10b)$$

Denk.(2.9a, b ve 2.10a, b)'de A_{sh} ve ρ_{sh} göz önüne alınan doğrultuda enine donatının alanını ve hacimsel oranını, b_k dik doğrultudaki çekirdek boyutunu (en dıştaki enine donatı eksenleri arasındaki uzaklık), s enine donatı aralığını, b_0 ve h_0 sargı donatısı eksenlerinden ölçülen sargılı beton boyutlarını, α_i bir etriye kolu veya çiroz tarafından mesnetlenen boyuna donatıların eksenleri arasındaki uzaklığı göstermektedir. Burada A_{os} spiral/sargı donatısının alanı, s enine donatı aralığı veya spiralin adımı, D ise spiral/sargı donatısı eksenleri arasındaki uzaklıktır. Dairesel etriye için n=2, spiral donatı için n=1 alınacaktır.

2.3.2. ASCE 41-17'ye göre performans hedefleri

Performansa dayalı tasarım ilkelerinin açıklandığı ATC 40 (1996) ve FEMA (2000)'nın düzenlenmesiyle FEMA (2005) raporu oluşturulmuştur. FEMA (2005) raporunun revize edilmesiyle ASCE/SEI 41-17 (2017) dokümanı ortaya çıkmıştır. Tüm bu çalışmalar 1994 Northrigde ve 1989 Loma Prieta depremlerinde oluşan hasardan kaynaklı olarak performansa dayalı tasarıma önem kazanmasından kaynaklanmaktadır (Güvensoy, 2023).

ASCE/SEI 41-17 (2017) yönetmeliği Bölüm 10'da Hemen Kullanım-Immediate Occupancy (IO), Can Güvenliği-Life Safety (LS) ve Göçmenin Önlenmesi-Collapse Prevention (CP) olmak üzere 3 hasar sınır bulunmaktadır (Şekil 2.39). Doğrusal olmayan analizler için her bir performans seviyesi için önerilen plastik dönme limit değerleri kolon ve kirişlerde sırasıyla Çizelge 2.4 ve 2.5'te verilmektedir.



Şekil 2.39. ASCE 41-17 yönetmeliğinde tanımlanan kesit hasar sınırları (ASCE/SEI 41-17, 2017)

Çizelge 2.4. Doğrusal olmayan analizler için modelleme ve kabul kriterleri- betonarme kolonlar (ASCE/SEI 41-17, 2017)

Modelleme değişkenleri	**Kabul edilmiş kriterler**		
Plastik Dönme Açıları, a ve b (Rad) **Artık dayanım oranı, c**	**Plastik dönme açısı (Rad)** **Performans seviyesi**		
	IQ	**LS**	**CP**
Net yükseklik boyunca yeterli donatı veya bindirmeye sahip olmayan kolonlar[a]			
$\boldsymbol{a = \left(0.042 - 0.043\frac{N_{UD}}{A_g f'_{cE}} + 0.63\rho_t - 0.023\frac{V_{yE}}{V_{ColOE}}\right) \geq 0.0}$ **için** $\boldsymbol{\frac{N_{UD}}{A_g f'_{cE}} \leq 0.5}$ $\boldsymbol{\left\{ b = \frac{0.5}{5 + \frac{N_{UD}}{0.8 A_g f'_{cE}} \frac{1}{\rho_t} \frac{f'_{cE}}{f_{ytE}}} - 0.01 \geq a^a \right.}$ $\boldsymbol{c = 0.24 - 0.4\frac{N_{UD}}{A_g f'_{cE}} \geq 0.0}$	0.15 a $\leq$ 0.005	0.5 b[b]	0.7 b[b]
Net yükseklik boyunca yetersi donatı veya bindirmeye sahip olan kolonlar[c]			
$\boldsymbol{a = \left(\frac{1}{8}\frac{\rho_t f_{ytE}}{\rho_I f_{yIE}}\right) \geq 0.0 \leq 0.025^d}$ $\boldsymbol{b = \left(0.012 - 0.085\frac{N_{UD}}{A_g f'_{cE}} + 12\rho_t^e\right) \geq 0.0 \geq a \leq 0.06}$ $\boldsymbol{c = 0.15 + 36\rho_t \leq 0.4}$	0.0	0.5 b	0.7 b

Not: ρ_t (enine donatı oranını), hiçbir durumda 0.0175'ten büyük alınmamalıdır. Ayrıca, etriye kancaları çekirdeğe yeterli şekilde ankrajlanmamışsa, bu oran 0.0075'i geçmemelidir. Tablodaki denklemler ρ_t değeri 0.0005'ten küçük olan kolonlar için geçerli değildir.

V_{yE} / V_{ColOE}, 0.2'den az alınmamalıdır.

Eksenel yükü (N_{UD}), değeri ASCE/SEI 41-17 (2017) standardının 7. bölümünde tanımlanan Denklem (7-34) ile hesaplanmaktadır (ASCE/SEI 41-17, 2017, s. 78). Açıklandığı gibi düşey eksendeki en büyük basınç yükü olarak ve yanal yüklerin etkisi dikkate alınarak belirlenmelidir. Alternatif olarak, N_{UD}'un sınır durum analizine dayanarak değerlendirilmesine izin verilecektir.

[a]) b, $\frac{N_{UD}}{A_g f'_{cE}} > 0.5$ için $\frac{N_{UD}}{A_g f'_{cE}} = 0.5$ değerinden $\frac{N_{UD}}{A_g f'_{cE}} = 0.7$ değerinde lineer olarak azaltılacaktır, ancak a'dan küçük olmamalıdır

[b]) $\frac{N_{UD}}{A_g f'_{cE}} = 0.1$'den küçük alınmamalıdır.

[c]) Kolonlardaki donatı bindirme bölgesinde (splice) hesaplanan donatı gerilmesi, ASCE/SEI 41-17 (2017) standardında yer alan Denklem (10-1a) veya (10-1b) tarafından belirtilen donatı gerilmesi aştığında bu kolon, yetersiz aderans (geliştirme) veya bindirme ile kontrol edilen (governed) bir kolon olarak kabul edilir (ASCE/SEI 41-17, 2017, s. 149). Yetersiz ankraj veya birleştirme ile kontrol edilen kolonlar için modelleme parametresi, yetersiz ankraj veya birleştirme ile kontrol edilmeyen kolonların parametrelerini asla aşmayacaktır.

[d]) a Yeterli ankraj veya birleştirme ile kontrol edilen kolonlar için, birleşme bölgesinde sıfır alınacak, uzunluğu boyunca en az iki bağ grubu tarafından geçilmeyecektir.

[e]) ρ_t, 0.0075'ten daha fazla alınamaz.

Yukarıda yer alan V_{col0E} ifadesinin hesabı için Denklem (2.11) ve (2.12)'de yer alan ifadeler önerilmektedir.

$$V_{col} = k_{nl} * V_{col0} \tag{2.11}$$

$$V_{col} = k_{nl}\left[\alpha_{Col}\left(\frac{A_v f_{\frac{ytl}{E}} d}{s}\right) + \lambda\left(\frac{6\sqrt{f'_{\frac{cL}{E}}}}{M_{UD}/V_{UD}d}\sqrt{1+\frac{N_{UG}}{6A_g\sqrt{f'_{\frac{cL}{E}}}}}\right)\right] \text{ (MPa)} \tag{2.12}$$

V_{col}: Kolon kesme dayanımı, f_{ytl}: Enine donatının akma gerilmesi, A_v: Enine donatının alanı, d: Faydalı yükseklik, s: Etriye sıklığı, f_c': Mevcut betonun basınç dayanımı, Nu:

Normal kuvvetin en büyük değeri, M: Kesitte maksimum tesiri oluşturacak moment, V_d: Kesitteki en büyük kesme kuvveti, M/V_d değeri 2 ile 6 arasında olacaktır. Eğer bu değer 2 den küçükse k_{nl}=1.0; 6 dan büyük ise 0.7 alınabilmektedir. Bu değerler arasındaki M/V_d için de enterpolasyon yapılmalıdır.

Çizelge 2.5. Doğrusal olmayan analizler için modelleme ve kabul kriterleri- betonarme kirişler (ASCE/SEI 41-17, 2017)

Durum			**Modelleme değişkenleri**			**Kabul edilmiş kriterler**		
			Plastik Dönme Açıları (Rad)		Artık dayanım oranı	Plastik dönme açısı (Rad)		
						Performans seviyesi		
Durum 1. Eğilme davranışı kontrolündeki kirişler[b]								
$\frac{(\rho-\rho')}{\rho}$	Enine donatı	$\frac{V}{b_w d\sqrt{f'_{cE}}}$	a	b	c	IO	LS	CP
$\leq \mathbf{0.0}$	C	$\leq 3(0.25)$	0.025	0.050	0.2	0.0100	0.025	0.050
$\leq \mathbf{0.0}$	C	$\geq 6(0.5)$	0.020	0.040	0.2	0.0050	0.020	0.040
$\geq \mathbf{0.5}$	C	$\leq 3(0.25)$	0.020	0.030	0.2	0.0050	0.020	0.030
$\geq \mathbf{0.5}$	C	$\geq 6(0.5)$	0.015	0.020	0.2	0.0050	0.015	0.020
$\leq \mathbf{0.0}$	NC	$\leq 3(0.25)$	0.020	0.030	0.2	0.0050	0.020	0.030
$\leq \mathbf{0.0}$	NC	$\geq 6(0.5)$	0.010	0.015	0.2	0.0015	0.010	0.015
$\geq \mathbf{0.5}$	NC	$\leq 3(0.25)$	0.010	0.015	0.2	0.0050	0.010	0.015
$\geq \mathbf{0.5}$	NC	$\geq 6(0.5)$	0.005	0.010	0.2	0.0015	0.005	0.010
Durum 2: kesme davranışı kontrolündeki kirişler[b]								
Etriye Aralığı $\leq \boldsymbol{d/2}$			0.003	0.020	0.2	0.0015	0.010	0.020
Etriye Aralığı $\geq \boldsymbol{d/2}$			0.003	0.010	0.2	0.0015	0.005	0.010
Durum 3: Açıklık boyunca yetersiz donatı ve bindirme boyu kontrolündeki kirişler[b]								
Etriye Aralığı $\leq \boldsymbol{d/2}$			0.003	0.020	0.0	0.0015	0.010	0.020
Etriye Aralığı $\geq \boldsymbol{d/2}$			0.003	0.010	0.0	0.0015	0.005	0.010
Durum 4: Kolon kiriş birleşim bölgesine yeterli derecede saplanmamış kirişler[b],								
			0.015	0.03	0.2	0.010	0.020	0.030

Not: f'_{cE} lb/in^2 ve (MPa) olarak verilmiştir.

[a] Tabloda listelenenler arasındaki değerler doğrusal enterpolasyon ile belirlenir.

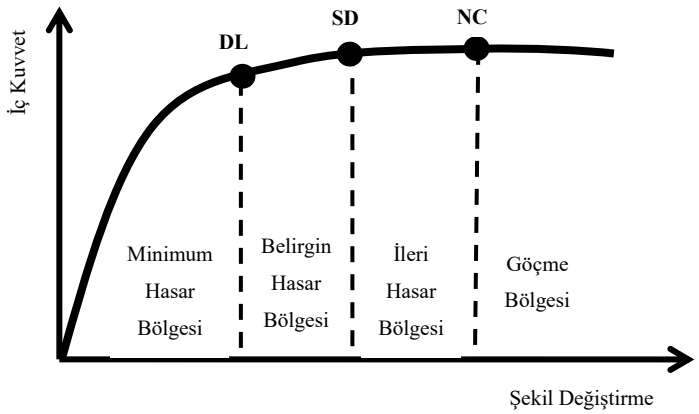
[b] Durum 1,2,3,3'te birden fazla halin sağlanması durumunda, minimum şartı sağlayacak değerler kullanılır.

[c] Sırasıyla "C" ve "NC", uygun ve uygun olmayan enine donatıların kısaltmalarıdır. Enine donatının uygun olması için plastik mafsal bölgesinde, etriye aralığı d/3'ten küçük olmalı, orta ve yüksek süneklik talebine sahip elemanlar için, kesme donatıları tasarım kesme kuvvetlerinin ¾'ünü taşımalıdır. Aksi halde enine donatıların uygun olmadığı kabul edilir.

[d] V, NSP (nonlinear static procedure) veya NDP (nonlinear dynamic procedure)'nin tasarım kesme kuvvetidir.

2.3.3. Eurocode'a göre performans hedefleri

Eurocode 8 Bölüm 3'te (CEN 2005), yapıların değerlendirilmesi ve güçlendirilmesi, belirli hasar sınırlarını dönme kapasitesi üzerinden tanımlamaktadır. Bu bölümde, kesit hasar sınırları Şekil 2.40'de görüldüğü üzere Damage Limitation (DL), Significant Damage (SD) ve Near Collapse (NC) olarak üç farklı hasar durumu açıklanmaktadır (EN 1998-3, 2005).



Şekil 2.40. EC8/3 yönetmeliğinde tanımlanan kesit hasar sınırları ve bölgeleri

Sınırlı Hasar (DL)

(1) Bu hasar sınırı için doğrulamalarda sınır durum için kullanılan kapasite, eksenel yükün tasarım değeri altındaki akma eğilme momentidir.

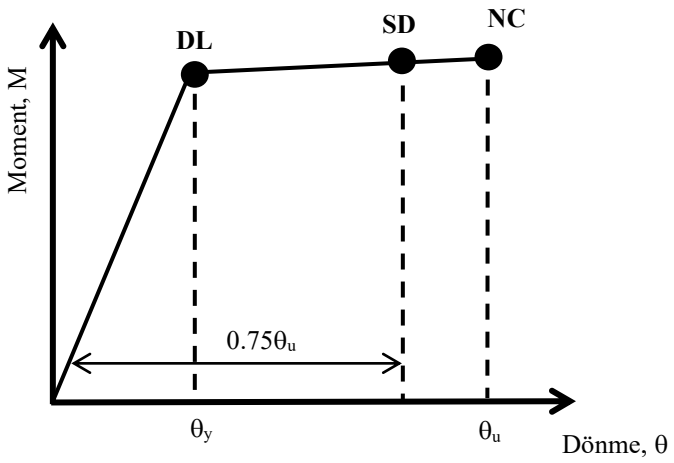
(2) Eğer doğrulama deformasyonlar açısından gerçekleştiriliyorsa, buna karşılık gelen kapasite, akma anındaki kiriş dönmesi (θy) cinsinden ifade edilir.

Kolonlar ve kirişler için akma sınırına karşılık gelen dönme kapasiteleri:

$$\theta_y = \emptyset_y \frac{L_v + \alpha_v z}{3} + 0.00135\left(1 + 1.5\frac{h}{L_v}\right) + \frac{\varepsilon_y}{d - d'}\frac{d_{bl} f_y}{6\sqrt{f_c}} \qquad (2.13)$$

Denklemde yer alan α_v moment ve kesmeye bağlı olarak belirlenmektedir. Elemana ait akma momenti, hesap kesme dayanımı ($V_{R,c}$)'den (Kesme donatısı bulunmayan elemanın

tasarım kesme dayanımı, EN 1992-1-1 standardının 6.2.2(1) maddesine göre değerlendirilir) elde edilen moment değerini karşılayamıyorsa ($M_y > L_v.V_{R,c}$) $\alpha_V=1$ alınır, diğer durumlarda ise ($M_y < L_v.V_{R,c}$) $\alpha_V=0$ olarak alınır. h kesit boyutunu, L_v moment/kesme oranını, d_b ortalama boyuna donatı çapını tarif etmektedir.



Şekil 2.41. EC8/3 yönetmeliğinde tanımlanan dönme sınırları

Şekil 2.41'da verilen grafiğe göre Belirgin Hasar (SD) sınırına karşılık gelen dönme değeri, nihai göçme dönmesinin %75'ine karşılık gelmektedir. Belirgin hasara karşılık gelen kiriş dönme kapasitesi θ_{SD}, nihai kiriş dönmesi θ_u'nun 3/4'ü olarak kabul edilebilir.

$$\theta_{SD} = \frac{3}{4}\frac{1}{\gamma_{el}} 0.016 * (0.3^{\nu}) \left[\frac{\max(0.01; w')}{\max(0.01; w)} f_c\right]^{0.225} \left(\frac{L_V}{h}\right)^{0.35} 25^{\left(\alpha\rho_{sx}\frac{f_{yw}}{f_c}\right)} (1.25^{100\rho_d}) \quad (2.13)$$

Betonarme elemanların çevrimsel yükleme altındaki toplam kiriş dönme kapasitesi (elastik ve elastik olmayan kısmın toplamı) olan nihai dönme kapasitesi θ_u, aşağıdaki ifadeden hesaplanabilir.

$$\theta_{um} = \frac{1}{\gamma_{el}} 0.016 * (0.3^{\nu}) \left[\frac{\max(0.01; w'}{\max(0.01; w)} f_c\right]^{0.225} \left(\frac{L_V}{h}\right)^{0.35} 25^{\left(\alpha\rho_{sx}\frac{f_{yw}}{f_c}\right)} (1.25^{100\rho_d}) \quad (2.14)$$

Burada γ_{el} birincil sismik elemanlar için 1,5 ve ikincil sismik elemanlar için 1,0 olarak alınır, h kesitin derinliğidir, L_V = M/V uç kesitteki moment/kesme kuvveti oranını ifade eder, ν = N/bhf$_c$, b basınç bölgesinin genişliğidir, N, eksenel kuvvet olup, basınç

durumunda pozitif kabul edilir. w, w' ifadeleri sırasıyla çekme ve basınç için mekanik donatı oranını, f_c ve f_{yw} sırasıyla betonun basınç dayanımı (MPa) ve etriye donatısının akma dayanımını (MPa) ifade etmektedir. Bu değerler, yerinde yapılan testlerden doğrudan elde edilen ortalama değerler ile ek bilgi kaynaklarından elde edilen veriler kullanılarak belirlenir ve bilgi düzeyi dikkate alınarak, Eurocode 8 Bölüm 3'te (CEN, 2005) belirtilen 3.5(1)P maddesi ve Tablo 3.1'de tanımlanan güvenlik katsayılarıyla uygun şekilde bölünerek değerlendirilir (bkz. s. 19). , $\rho_{sx} = A_{sx}/b_w s_h$ yükleme doğrultusu x ile paralel olan alansal donatı oranını (s_h = etriye aralığı), ρ_d her bir çapraz doğrultudaki (varsa) çapraz donatı oranını ve α sargı etkinlik katsayısını belirtmekte ve Denklem (2.9) ile ifade edilmektedir.

2.3.4. Performans hedeflerinin karşılaştırılması

Yukarıda detayları açıklanan TBDY (2018), EN 1998-3, (2005) ve ASCE/SEI 41-17, (2017) yönetmeliklerine göre belirlenen kesit hasar sınırları ayrı ayrı ele alınmıştır. Bu bağlamda, Çizelge 2.6'te performans hedeflerinin karşılaştırılması özet bir şekilde sunulmuştur.

Çizelge 2.6. Performans hedeflerinin karşılaştırılması

Yönetmelik	Performans Seviyeleri	Kesit hasar sınırlarının belirlenmesi
TBDY 2018	Sınırlı Hasar (SH), Kontrollü Hasar (KH), Göçme Öncesi Hasar (GÖ)	Plastik Dönme, Birim Şekil Değiştirme
Eurocode 8	Damage Limitation (DL), Significant Damage (SD), Near Collapse (NC)	Plastik Dönme
ASCE 41-17	Immediate Occupancy (IO), Life Safety (LS), Collapse Prevention (CP)	Plastik Dönme

2.4. Kaynak Araştırması

Bu bölümde, prefabrik yapılar alanında yapılan çalışmalar, sıvı viskoz sönümleyiciler (SVS) ve dolgu duvarlarla ilgili literatürde yer alan araştırmalar özetlenmiştir. Literatürde özellikle SVS'ler üzerine yapılan çalışmalar detaylı bir şekilde ele alınmıştır.

2.4.1. Prefabrik yapılar ile ilgili yapılan çalışmalar

Ersoy & Tankut (1988), tarafından gerçekleştirilen çalışmada, deprem etkisi altındaki prefabrik yapı sistemlerine ilişkin temel ilkeler kapsamlı biçimde incelenmiştir. Çalışmada, özellikle çerçeve türü, panel türü ve kutu veya hücre türü yapıların birleşim detaylarının prefabrik elemanların yapısal performansı ve genel sistem davranışı üzerindeki belirleyici rolü ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Ayrıca, rijit birleşim varsayımının gerçek yapı davranışını yansıtmadığı belirtilmiş; birleşim bölgelerinde kullanılacak malzeme türü, donatı yerleşimi ve detaylandırmanın, sistemin sismik performansını doğrudan etkilediği ifade edilmiştir. Bu bağlamda çalışma, prefabrik yapı sistemlerinin deprem güvenliğinin sağlanmasında birleşim detaylarının dikkatli ve mühendislik esaslarına uygun şekilde tasarlanmasının kritik önem taşıdığını ortaya koymaktadır.

Psycharis & Mouzakis (2012) tarafından yapılan deneysel araştırmada, monolitik ve tersinir yükleme altında, prefabrik yapılardaki bağlantıların kesme dayanımına etkisi araştırılmıştır. Avrupa FP7 SAFECAST projesi kapsamında gerçekleştirilen bu çalışma, bağlantıların kesme kapasitesini etkileyen çeşitli faktörleri incelemiştir; özellikle pim çapı, kenarlara olan mesafe ve harç dayanımı gibi parametreler üzerinde durulmuştur. Pim'lerin yükleme yönündeki beton paspayının kalınlığı, yapının tepkisi üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Kenarlara yakın yerleştirilen pim'ler (d/D oranının küçük değerleri için) çekme yükü altında kabuk betonunun dökülmesine neden olmakta, bu durumun ise birleşim dayanımının azalmasına ve asimetrik bir davranışın oluşmasına yol açacağı tespit edilmiştir. Kuru pimlenmiş bağlantılarda, pim'lerin beton paspayı yeterince kalın olduğu sürece (yaklaşık d/D = 4–6 arasında) önemli süneklik değerleri elde edilebileceğinden bahsedilmiştir.

Senel & Palanci (2013), tarafından gerçekleştirilen çalışma, Türkiye'nin yüksek sismik tehlikeye sahip batı bölgelerinde yer alan 98 adet tek katlı prefabrik sanayi yapısının saha verilerine dayalı olarak yapısal özelliklerini incelemiş ve kapsamlı bir sismik performans değerlendirmesi sunmuştur. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen istatistiksel analizler, mevcut yapı stokunun rijitlik ve süneklik kapasitelerinin büyük ölçüde yetersiz olduğunu

ve bu durumun deprem hasarları üzerinde belirleyici etkiler yarattığını göstermiştir. Ayrıca, farklı yerel zemin koşullarını temsil eden iki adet elastik talep spektrumu ile, kapasite spektrumu yöntemi ve eşdeğer deplasman yaklaşımı kullanılarak yapıların performansı değerlendirilmiştir.

Yildirim vd. (2015), Türkiye'deki tek katlı on iki endüstriyel prefabrik betonarme yapının güçlendirilmesi için sürtünme sönümleyiciler kullanmışlardır. Bu çalışma, Türkiye'de bir endüstriyel prefabrik betonarme yapıda ilave enerji sönümleme cihazlarının ilk uygulamasıdır. Proje kapsamında, sürtünme sönümleyiciler seçilmiş ve bu elemanların tasarım ve performans değerlendirmesi ASCE/SEI-41-06 (2007) standartlarına uygun olarak yapılmıştır. Doğrusal ve doğrusal olmayan zaman tanım alanında gerçekleştirilen analizler yardımıyla binanın sismik performansı değerlendirilmiştir. Çelik elemanların ve sönümleyicilerin montajı, binanın boşaltılmasına gerek kalmadan yaklaşık bir ay içinde tamamlanmıştır. Hesaplanan toplam sönüm oranları, X ve Y yönleri için sırasıyla doğrusal hesaplamalar için %11 ve %16 iken, doğrusal olmayan analizler için sırasıyla %17 ve %34 olarak hesaplanmıştır. Bu oranlar, doğrusal analizlerden elde edilen sönüm oranlarının bu proje için %45-%50 oranında doğrusal olmayan analizlerden daha düşük olduğunu göstermiştir.

Guan vd. (2018) çalışmalarında, moment aktaran prefabrik betonarme kiriş-kolon bağlantılarının sismik performansını incelemek amacıyla geliştirilmiş yeni bir bağlantı detayını deneysel olarak değerlendirmiştir. Üç tam ölçekli numune (iki prefabrik, bir monolitik) tersinir tekrarlı yükleme altında test edilmiştir. Sonuçlar, önerilen prefabrik bağlantıların rijitlik, süneklik, enerji sönümleme ve plastik mafsal davranışı bakımından monolitik sistemlerle karşılaştırılabilir performans sergilediğini göstermiştir. Ayrıca plastik mafsal boyunun, monolitik sistemler için önerilen modellerle tahmin edilebileceği ve donatı oranının bu tahminlerde dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır.

Ercan vd. (2018), “Beton Prefabrikasyon El Kitabı” prefabrik betonarme yapıların tasarım, üretim ve montaj süreçlerini sistematik biçimde ele alan kapsamlı bir teknik kaynaktır. Yayında, kiriş, kolon ve döşeme gibi temel yapı elemanlarının boyutlandırma esasları, birleşim detaylarının tasarımı ve montaj sürecine ilişkin uygulama ilkeleri

detaylı şekilde açıklanmıştır. Güncel yönetmeliklerle uyumlu olarak hazırlanmış olan kitap, mühendislik uygulamalarında karşılaşılan sorunlara yönelik çözümler sunmakta ve çeşitli sayısal örneklerle konular pekiştirilmektedir.

Soydan vd. (2020), tarafından gerçekleştirilen çalışmada, kullanımda olan tek katlı prefabrik betonarme sanayi yapılarının sismik performansının artırılmasına yönelik yenilikçi bir yaklaşım sunulmuştur. Çalışmada, mevcut yapıların işlevlerini aksatmadan entegre edilebilecek kurşun ekstrüzyon sönümleyici (LED- Lead Extrusion Damper) sistemi ile yapı davranışı detaylı olarak değerlendirilmiştir. Gerçek yapı modelleri üzerinden yapılan doğrusal olmayan analizlerde, taşıyıcı elemanlardaki plastik zorlanmaların azaldığı ve kat ötelenmelerinin %40 ila %90 arasında düştüğü görülmüştür.

Kırtel vd. (2024) yaptıkları çalışmada 2023 Kahramanmaraş depremleri sırasında endüstriyel binalarda ortaya çıkan yapısal zayıflıkları detaylı bir şekilde incelemişlerdir. Prefabrik betonarme yapı elemanlarında kullanılan betonun yeterli basınç dayanımına sahip olmadığı, kullanılan donatı çeliğinin istenilen süneklik özelliklerini taşımadığı; ayrıca, kiriş-kolon montajı ve ankrajında eksiklikler bulunduğu, kolonlarda kullanılan etriyenin yeterince bükülmediği ve etriye sıklaştırmasının yapılmadığı belirtilmiştir. Birçok inşaat halindeki yapıda, prefabrik bileşenler arasındaki bağlantıların zayıflığı büyük hasarlara yol açtığı ifade edilmiştir.

Arslan vd. (2024) yaptıkları çalışmada, mevcut prefabrik endüstriyel binalarda Şubat 2023 Kahramanmaraş depremlerinden sonra meydana gelen hasarları değerlendirmiştir. Çalışmada hem saha verileri hem de doğrusal olmayan itme analizleri kullanılarak bu yapıların performansı değerlendirilmiştir. Analizlerde, mafsal tipi kolon-kiriş bağlantılarının deprem bölgelerinde ciddi zayıflık gösterdiği tespit edilmiştir. Özellikle bağlantı bölgelerindeki eksikliklerin, yapıların hasar görmesine önemli katkıda bulunduğu vurgulanmıştır. Endüstriyel prefabrik yapıların, deprem kuvvetlerinden ziyade yer değiştirme talepleri nedeniyle hasar gördüğü belirtilmiştir. Ayrıca, yapısal performansı artırmak amacıyla, özellikle çatılardaki yatay rijitliğin artırılması ve mafsallı bağlantıların kullanımının sınırlanması gerektiği önerilmiştir. Sonlu eleman analizi sonucunda, harç uygulaması yapılan bağlantıların, yatay dış yüklemelere karşı taşıma

kapasitesinin %62 oranında arttığı belirlenmiştir. TBDY (2018)'in prefabrik binaların güçlendirilmesi açısından yetersiz olduğu belirtilmiş; bu nedenle, yakın gelecekte prefabrik yapılar için kapsamlı bir güçlendirme el kitabı geliştirilmesi gerektiği önerilmiştir.

2.4.2. Dolgu duvar ile ilgili yapılan çalışmalar

El-Dakhakhni vd. (2003b) tarafından gerçekleştirilen çalışma, beton dolgu duvarlı çelik çerçevelerin rijitliğini ve yanal yük kapasitesini tahmin etmek amacıyla analitik bir yöntem önermektedir. Bu yöntem, dolgu duvarın davranışını dikkate almak için her bir duvar panelini temsil eden üç eşdeğer çubuğun kullanıldığı bir model sunarak, yanal yükler altında çelik çerçeve ile dolgu duvar arasındaki etkileşimi daha doğru bir şekilde tasvir etmektedir. Önerilen teknik, özellikle çok katlı ve büyük açıklıklı binalar için pratik ve verimli bir çözüm sunmakta, bu da onu yapısal analizde kullanılabilir kılmaktadır. Yöntem, kolaylıkla bilgisayar ortamına aktarılabilir ve sonlu elemanlar yazılımına entegre edilebilir.

Cavaleri & Di Trapani (2014), betonarme çerçevelere entegre edilen üç farklı tür dolgu duvarın yatay yükler altındaki sismik davranışını deneysel yöntemlerle incelemiş ve elde edilen bulgular, Pivot tipi histeretik model esaslı basitleştirilmiş bir makro model ile karşılaştırmıştır. Deneyler, dolgu duvarlarının rijitlik, dayanım, süneklik ve enerji sönümleme özelliklerine önemli katkılar sağladığını göstermiştir. Geliştirilen makro model, hem elastik hem de plastik davranışı temsil ederek deneysel sonuçlarla yüksek uyum sağlamıştır. Elde edilen bulgular doğrultusunda, dolgu etkilerinin analitik modellerde temsilinde kullanılabilecek basit bir histeretik yaklaşım olarak Pivot model önerilmiştir.

Asteris vd. (2015) tarafından yapılan bu çalışmada, dolgu duvarlı betonarme çerçeve yapıların doğal titreşim periyodunu etkileyen parametreler detaylı bir şekilde incelenmiştir. Literatürde yer alan çoğu yaklaşımın dolgu duvarların kütle ve rijitlik üzerindeki etkisini göz ardı ettiğini vurgulayan çalışmada, doğal periyodun tahmini için yönetmeliklerde verilen ampirik denklemlerle yapılan modal analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Çalışma, kat sayısı, açıklık sayısı, dolgu duvar rijitliği, yumuşak kat

konumu ve zemin sınıfı gibi parametrelerin doğal periyot üzerinde belirleyici olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle dolgu duvar rijitliğinin artması doğal periyodu önemli ölçüde azaltırken, açıklıktaki artış doğal periyodu artırmaktadır. Ayrıca, dolgu duvarlardaki açıklık oranı %80'in üzerine çıktığında, yapı neredeyse boş çerçeve gibi davranmakta ve duvar etkisi ihmal edilebilir hale gelmektedir. Sonuçlar, zemin-yapı etkileşiminin yumuşak zeminlerde doğal periyodu ciddi oranda artırdığını ve bu etkinin dolgu rijitliği arttıkça daha da belirginleştiğini göstermektedir. Çalışma, dolgu duvarların dikkate alınmadığı tahminlerin yapıların sismik davranışını yeterince temsil edemediğini ve bu bağlamda daha güvenilir modeller geliştirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

Pantò vd. (2017), yığma dolgu duvarlı betonarme çerçeve sistemlerin sismik davranışını değerlendirmek amacıyla, makro modellemeye dayalı alternatif bir analiz yöntemi geliştirmiştir. Çalışmada, dolgu duvar katkısının genellikle ihmal edilmesinin, yapı sisteminin sismik kapasitesinin öngörülmesinde ciddi sapmalara yol açabileceği vurgulanmaktadır. Bu kapsamda önerilen geometrik olarak tutarlı düzlemsel makro eleman modeli, geleneksel tek diyagonal çubuk modeline kıyasla daha gerçekçi sonuçlar üretmekte ve özellikle boşluk içeren dolgu duvarların temsilinde belirgin avantajlar sunmaktadır. Geliştirilen model hem deneysel veriler hem de sonlu eleman analizleri ile doğrulanmış; farklı boşluk konfigürasyonlarının yapısal performansa etkisi detaylı biçimde analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, dolgu duvarların rijitlik ve taşıyıcı sistem dayanımı üzerindeki etkisinin kayda değer olduğunu ve bu katkının ihmal edilmesi durumunda kapasite ile süneklik öngörülerinde ciddi sapmalar oluşabileceğini göstermektedir. Eurocode 8 kapsamında yapılan karşılaştırmalı değerlendirmeler ise, önerilen makro eleman modelinin sismik performans analizlerinde daha tutarlı ve güvenilir sonuçlar sunduğunu ortaya koymaktadır. Çalışma, dolgu duvarlı çerçeve sistemlerin deprem etkileri altında doğru şekilde değerlendirilebilmesi için, dolgu elemanlarının detaylı ve fiziksel gerçekliğe uygun biçimde modellenmesinin gerekliliğini vurgulamaktadır.

2.4.3. Sıvı viskoz sönümleyici ile ilgili yapılan çalışmalar

Constantinou & Symans (1992), Constantinou & Symans (1993), Reinhorn, A. M., Li & Constantinou (1995) ve Seleemah & Constantinou (1997) SVS'ler üzerine önemli

araştırmalar gerçekleştirmiş ve bu konuda önemli bulgular ortaya koymuşlardır. Çalışmalarında, SVS'lerin dinamik davranışlarını analiz edebilmek amacıyla kapsamlı matematiksel modeller geliştirmişlerdir. Ayrıca hem analitik hem de deneysel yöntemler kullanarak bu sönümleyicilerin yapıdaki performansını değerlendirmişlerdir. Araştırmalarında ayrıca SVS'lerin sönüm katsayısının hesaplanmasına yönelik bir formülasyon oluşturmuşlardır. Ayrıca, SVS'lerin çalışma prensiplerini hem analitik hem de deneysel çalışmalarla kanıtlamışlardır. 1995 yılında, Constantinou ve meslektaşları, SVS'lerin mevcut yapıların sismik performansını iyileştirmek amacıyla nasıl kullanılabileceğini araştırmışlardır. 1997 yılında yapılan bir diğer çalışmada ise, doğrusal ve doğrusal olmayan SVS'ler karşılaştırılmış ve her iki tip sönümleyicinin de sismik performansı önemli ölçüde iyileştirdiği sonucuna varılmıştır. Doğrusal olmayan SVS'lerin özellikle büyük deformasyonlar altında daha fazla enerji sönümleyerek daha yüksek performans sağladığı belirlenmiştir. Bu araştırmaların sonucunda, SVS'lerin sismik enerjiyi etkin bir şekilde dağıttığı ve yapısal sistemlerin deprem sırasında maruz kaldığı yer değiştirme ve ivmeleri önemli ölçüde azalttığı kanıtlanmıştır. Bu bulgular, SVS'lerin hem yeni yapılarda hem de mevcut yapıların güçlendirilmesinde kritik bir mühendislik çözümü olduğunu göstermiştir.

Constantinou vd. (2001) tarafından yapılan çalışma, deprem etkisi altındaki yapılarda etkili bir sismik enerji sönümleme mekanizması olarak toggle-bağlantılı sönümleyici sistemlerinin farklı konfigürasyonlarını değerlendirmiştir. Toggle-bağlantılı konfigürasyon, sönümleme kapasitesinde önemli artışlar sağlarken, aynı zamanda sistemin kat ötelenmelerini ve yapısal ivmelenmeleri belirgin ölçüde azalttığını ortaya koymuştur. Çalışmada yazarlar, sistemin performansını hem analitik modeller hem de deneysel testlerle doğrulayarak, yapısal titreşimleri kontrol altına alma ve sismik performansı artırma konusundaki etkinliğini vurgulamışlardır. Toggle-bağlantılı sönümleyicinin faydalarını göstermek amacıyla büyük ölçekli bir çelik model yapı üzerinde sarsma masası testleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma ayrıca toggle-bağlantılı sönümleyici sistemin üç yeni tasarım konfigürasyonunu incelemekte ve bu sistemin geleneksel yapısal çerçevelere entegrasyonu konusunda önemli bulgular sunmaktadır. Sonuçlar, bu sistemlerin deprem enerjisini diğer konfigürasyonlara nazaran daha etkin bir şekilde dağıtarak sismik performansı önemli ölçüde artırabileceğini göstermektedir.

Lee & Taylor (2001)'ın gerçekleştirdiği literatür araştırması, viskoz sönümleyicilerin sismik mühendislikteki önemini ve gelecekteki gelişim potansiyelini incelemiştir. Çalışmada, doğrusal ve doğrusal olmayan SVS'ler ile bunların farklı konfigürasyonlarda ve analizlerde kullanılabilecek yöntemleri ele alınmıştır. Literatürde özellikle hibrit sistemler üzerindeki araştırmalar öne çıkmaktadır. Bu sistemler, viskoz sönümleyicilerin taban izolasyonu gibi diğer pasif sismik koruma sistemleriyle birleştirilerek genel sismik dayanıklılığı artırmayı amaçlamaktadır. Gelecekteki eğilimler, viskoz sönümleyicilerin performansını optimize etmek için akıllı malzemelerin kullanımı ve gerçek zamanlı izleme teknolojilerinin entegrasyonuna işaret etmektedir. Ayrıca, sürdürülebilirliğe odaklanılarak daha dayanıklı, az bakım gerektiren ve uzun ömürlü viskoz sönümleyicilerin geliştirilmesi üzerinde durulmuştur.

Miyamoto & Hanson (2003), Kaliforniya'da bulunan iki katlı bir polis merkezi'ne SVS yerleştirerek sismik performansını incelemişlerdir. Yüksek sismisite bölgesinde yer alan yapı, sismik performansın artırılması amacıyla 2000 NEHRP yönetmeliklerine uygun olarak tasarlanmıştır. Çalışmada, SVS'lerin özellikle çelik moment çerçevelerinde yapısal deplasmanları kontrol etmekte son derece etkili olduğu kanıtlanmıştır. ETABS 7 yazılımı ile gerçekleştirilen zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler, SVS kullanılarak güçlendirilen yapının, çatı deplasmanının %55, taban kesme kuvvetinin %65, ve kat öteleme oranının %38 oranında azaldığını göstermiştir.

Christopoulos & Filiatrault (2006) tarafından yazılan Pasif Ek Sönümleme ve Sismik İzolasyonun İlkeleri adlı kitap, yapıların deprem performansını pasif sönümleme ve izolasyon teknikleri ile iyileştirmeye yönelik analitik çalışmalar, deneysel testler ve gerçek yapısal uygulamalar aracılığıyla tanıtmıştır. Kitap, binalara depremler ve rüzgar gibi dinamik etkilerin neden olduğu enerjiyi azaltma yöntemlerine, özellikle ek sönümleyici cihazlar ve taban izolasyon sistemlerinin uygulanmasına odaklanmıştır. Yazarlar, viskoz sönümleyiciler, akma sönümleyiciler ve sürtünme sönümleyicileri gibi çeşitli pasif enerji sönümleme sistemlerin mekaniklerini, matematiksel modellerini, tasarım ilkelerini ve yapısal titreşimleri kontrol etmedeki etkinliklerini açıklamıştır.

Genel olarak, bu kitap, pasif kontrol teknikleriyle sismik performansı artırmayı amaçlayan mühendisler ve araştırmacılar için önemli bir referans kaynağı olmuştur.

M. D. Symans vd. (2008) yaptıkları çalışmada, sismik uygulamalarda kullanılan enerji sönümleme sistemlerindeki son gelişmeleri gözden geçirmektedir. Yazarlar, viskoz, metal (akma) ve sürtünme sönümleyicileri gibi çeşitli pasif enerji sönümleme cihazlarını inceleyerek, yapılara gelen sismik kuvvetlerin azaltılmasındaki rollerini vurgulamaktadır. Sönümleyicilerin tasarım felsefesine ve bu sistemlerin değerlendirilmesinde kullanılan doğrusal ve doğrusal olmayan analiz yöntemlerinden bahsetmiştir. Çalışmada ayrıca, bu sistemlerin verimliliğini, güvenilirliğini ve uyarlanabilirliğini artıran en son teknolojik gelişmeler ve tasarım iyileştirmeleri tartışılmaktadır.

Hwang vd. (2013) viskoz sönüm katsayılarının dağıtılmasına yönelik çeşitli yöntemleri karşılaştırmış ve dört ana yöntem tanımlamıştır: Düzgün Yayılı Dağılım, Kat Kesme Kuvvetine Orantılı Dağılım, Kat Kesme Gerilme Enerjisine Dayalı Dağılım ve Etkili Katlara Kat Birim Şekildeğiştirme Enerjisine Dayalı Dağıtılması. Çalışmada, özellikle maksimum sönümleyici kuvveti ve kat ötelemesi kontrolü hesaplama açısından birim şekil değiştirmeye bağlı yöntemin en etkili yöntem olduğu belirtilmiştir.

Wang (2017), farklı enerji sönümleme cihazları kullanarak 35 katlı mevcut çelik binanın sismik performansının iyileştirilmesini araştırmıştır. Çalışma, SVS, Viskoz Duvar Sönümleyiciler (VDS) ve Burkulması Önlenmiş Çapraz (BÖÇ) sistemlerinin sismik tepkileri azaltmadaki etkinliğini karşılaştırmaya odaklanmıştır. Ayrıca, mevcut binanın sismik tepkilerini incelemek amacıyla OpenSees yazılımı kullanılarak zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, SVS'lerin yapısal göreli kat ötelemelerini azaltmada ve titreşim kontrolünde, mevcut yapısal tasarıma minimum müdahaleyle en etkili çözüm olduğunu göstermiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu çalışmada tek katlı tek açıklıklı betonarme prefabrik sanayi (BPS) yapısının sismik performansına sıvı viskoz sönümleyici (SVS) ile güçlendirilmesi ve bu davranışta dolgu duvarın etkisinin araştırılması konu edilmektedir. ETABS (2024) yazılımı kullanılarak zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda deprem yer hareketinin seçilmesi ve ölçeklenmesi Bölüm 3.1'de, yapısal, yapısal olmayan ve sıvı viskoz sönümleyicilerin (SVS) modellenmesi ile ilgili detaylar Bölüm 3.2'de verilmektedir. TBDY (2018)'de belirtildiği gibi en az 11 deprem kayıt çifti seçilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada 3 farklı konum ve zeminde olmak üzere 3 deprem seti dikkate alınmaktadır. Her set için TBDY (2018)'e göre deprem yer hareketinin seçilmesi ve ölçeklenmesi kapsamında 11 adet farklı yer hareketi kullanılmaktadır.

3.1. Deprem Yer Hareketlerinin Seçilmesi ve Ölçeklendirilmesi

3.1.1. Yer hareketi kayıtlarının seçimi

Zaman tanım alanında doğrusal olmayan deprem hesabında kullanılacak deprem kayıtlarının seçimi yönetmelikte açıkça ifade edildiği üzere tasarıma esas deprem büyüklükleri, faya olan mesafe, kaynak mekanizmaları ve yerel zemin özellikleri dikkate alınarak belirlenmektedir. Bu çalışmada 3 farklı projede uygulanan ve farklı zemin koşulları ve lokasyon için yapılan sahaya özel deprem tehlike analizlerinden elde edilen kayıtlar kullanılmıştır. Ayrıca, ticari projeler için üretilmiş bu sahaya özel deprem tehlikesinin hazırlanmasında en fazla katkıda bulunan depremlere ait büyüklük ve fay uzaklığı bilgilerinin belirlenmesi için deprem tehlikesi ayrıştırma işleminden faydalanıldığının belirtilmesi uygun olacaktır. (TBDY 2018 Madde 2.5.1).

Yönetmeliğe göre kayıtlar ayrıştırma işlemi sonucunda elde edilen deprem tehlikesine katkı sağlayan büyüklük ve mesafe bilgileri dikkate alınarak ve tasarıma esas deprem yer hareketi düzeyleri ile uyumlu olarak seçilmeli, yerel zemin koşulları vb. özellikler dikkate alınmalıdır. Deprem kayıt sayısının en az 11 olması ve aynı depremde kaydedilmiş kayıt takım sayısının üçü geçmemesi gerekmektedir.

Bu tez kapsamında seçilen deprem yer hareketi kayıtları 3 farklı lokasyon için ayrı ayrı ticari projelerde kullanılmış raporlardan elde edilmiştir. Böylelikle her bir set için 11 adet (toplamda 33 adet) deprem yer hareketi kayıt takımları belirlenmiştir. Seçilen deprem yer hareketi kayıtlarının özellikleri Çizelge 3.1'de sunulmaktadır. Çizelge 3.1'de seçilen kayıtlar ve bunlara ait büyüklük (M_w), Joyner-Boore mesafesi (R_{JB}), kayma dalgası hızı (V_{S30}), fay mekanizması (FM) ve ölçeklendirme katsayısı (ÖK) değerleri listelenmiştir. Fay mekanizması kolonunda DA doğrultu atımlı Normal Oblik Fay, N normal fay, TF ise ters fay türünü temsil etmektedir.

Çizelge 3.1. Yapısal analizlerde kullanılan deprem yer hareketi kayıtları ve özellikleri

Set	Zemin Sınıfı	RSN	Deprem İsmi	Yıl	İstasyon Adı	Büyüklük (M_w)	R_{JB} (km)	Vs30 (m/s)	FM	ÖK
SET-1	ZD	1182	Chi-Chi, Taiwan	1999	CHY006	7.62	9.76	438	TF	2.06
		1208	Chi-Chi, Taiwan	1999	CHY046	7.62	24.1	442	TF	4.17
		1504	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU067	7.62	0.62	434	TF	1.53
		169	Imperial Valley-06	1979	Delta	6.53	22.03	242	DA	2.53
		3748	Cape Mendocino	1992	Ferndale Fire Station	7.01	16.64	388	TF	2.09
		4847	Chuetsu-oki	2007	Joetsu Kakizakiku Kakizaki	6.8	9.43	383	TF	1.97
		4855	Chuetsu-oki	2007	Sanjo	6.8	21.4	245	TF	4.79
		6890	Darfield, New Zealand	2010	Christchurch Cashmere High School	7	17.64	204	DA	2.93
		728	Superstition Hills-02	1987	Westmorland Fire Sta	6.54	13.03	194	DA	3.15
		778	Loma Prieta	1989	Hollister Differential Array	6.93	24.52	216	TF	2.71
		802	Loma Prieta	1989	Saratoga - Aloha Ave	6.93	7.58	381	TF	2.39
SET-2	ZC	TR3115	Hatay	2023	Belen	7.8	19.1	424	DA	2.2
		TR4611	K.maraş- Pazarcık	2023	Çağlayancerit	7.8	18.5	731	DA	2.5
		164	Imperial Valley-06	1979	Cerro Prieto	6.5	15.2	472	DA	3.6
		1166	Kocaeli_Turkey	1999	Iznik	7.5	30.7	477	DA	3.7
		1208	Chi-Chi_ Taiwan	1999	CHY046	7.6	24.1	442	RV	3.7
		1633	Manjil_Iran	1990	Abbar	7.4	12.6	724	DA	1.5
		1762	Hector Mine	1999	Amboy	7.1	43.1	383	DA	3.5
		3746	Cape Mendocino	1992	Centerville Beach, NavalFac	7	18.3	459	TF	1.7
		3756	Landers	1992	Morongo Valley Hall	7.3	40.7	368	DA	3.2
		6928	Darfield_New Zealand	2010	LPCC	7	25.7	650	DA	3.3
		6971	Darfield_New Zealand	2010	SPFS	7	29.9	390	DA	3.2
SET-3	ZD	1614	Duzce_Turkey	1999	Lamont 1061	7.1	11.5	481	DA	3.9
		230	Mammoth Lakes-01	1980	Convict Creek	6.1	6.6	382	NO	1.9
		231	Mammoth Lakes-01	1980	Long Valley Dam	6.1	15.5	537	NO	2.6
		232	Mammoth Lakes-01	1980	Mammoth Lakes H. S.	6.1	4.7	347	NO	2.7
		300	Irpinia_Italy-02	1980	Calitri	6.2	8.8	456	N	2
		313	Corinth_Greece	1981	Corinth	6.6	10.3	361	NO	2.3
		564	Kalamata_Greece-01	1986	Kalamata (bsmt)	6.2	6.5	382	N	2.2
		5678	Iwate_Japan	2008	MYGH02	6.9	11.1	399	TF	3.1
		6886	Darfield_New Zealand	2010	Canterbury Aero Club	7	14.5	280	DA	3
		6893	Darfield_New Zealand	2010	DFHS	7	11.9	344	DA	1.6
		881	Landers	1992	Morongo Valley Fire Station	7.3	17.4	396	DA	2.3

3.1.2. Yer hareketi kayıtlarının ölçeklendirilmesi

TBDY (2018)'de zaman tanım alanında deprem hesabında yapılacak analizlerde kullanılmak üzere seçilen deprem yer hareketi kayıtları "basit ölçeklendirme yöntemi" ile ölçeklendirilebilir (Madde 2.5.2) veya kayıtlar "spektral uyuşum" sağlanacak şekilde dönüştürülebilir (Madde 2.5.3).

TBDY (2018)'e göre seçilen kayıtların üç boyutlu tasarım için ölçeklendirilmesi aşamasının ilk etabında her bir deprem kayıt takımının iki yatay bileşenine ait spektral ordinatların kareleri toplamının karekökü alınarak bileşke yatay spektrum elde edilmelidir. Daha sonra seçilen tüm kayıtlara ait bileşke spektrumların ortalamasının $0.2T_P$ ile $1.5T_P$ arasındaki genliklerinin, tasarıma esas hedef spektrumun aynı periyot aralığındaki genliklerine oranının 1.3'ten daha küçük olmaması kuralına göre ölçeklendirilmesi gerekmektedir (TBDY 2018, Madde 2.5.2.1). Öte yandan, her iki yatay bileşen için aynı ölçeklendirme katsayısı kullanılması gerekmektedir.

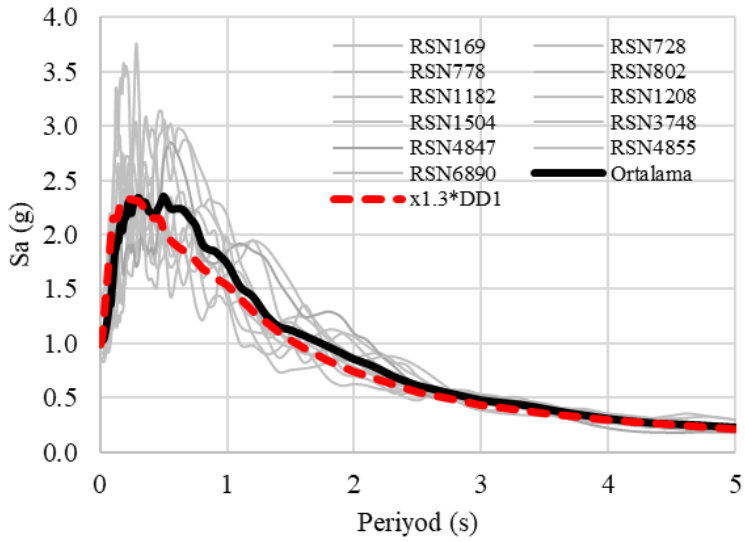
Kayıtlar ölçeklendirilirken kullanılan bileşke spektrum, $Sa_{kayıt}(T_i)$, Denklem (3.1) kullanılarak elde edilmektedir. Denklemde Sa_{H1} ve Sa_{H2}, her bir deprem kaydının iki yatay bileşenine ait spektral genlikleri ifade etmektedir.

$$Sa_{kayıt}(T_i) = \sqrt{[Sa_{H1}(T_i)]^2 + [Sa_{H2}(T_i)]^2} \tag{3.1}$$

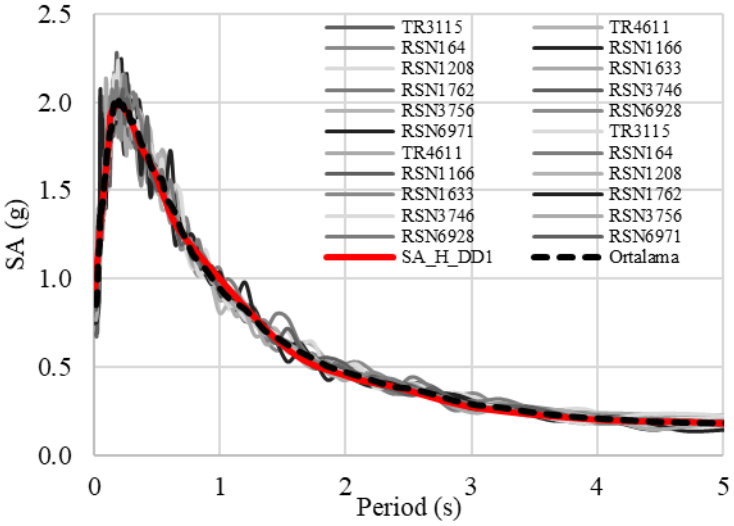
Bu çalışmada, kayıt seçimi ve ölçeklendirmesi için elde edilmiş hedef ivme spektrumları ve bunların 1.3 ile çarpılmış formları Set-1 için Şekil 3.1'de gösterilmiştir.

Öte yandan, tekrarlanma periyodu 2475 yıl olan deprem düzeyi için (DD-1) TBDY-2018 kuralları dikkate alınılarak yatay bileşenleri $0.2T_p$ - $1.5T_p$ periyotları aralığında ölçeklendirilmiş (spektral uyuşum) yer ivmesi 11 adet iki yönlü deprem yer hareketi kayıtları basit ölçeklendirme ya da RspMatch yöntemi (Alatik & Abrahamson, 2010) kullanılarak uyuşum sağlanmış kayıtlardır. Literatürde sıklıkla kullanılan RspMatch yönteminde spektrum uyumlu yer hareketinin elde edilmesi için sonlu süreli dalgacık eklenerek veya çıkarılarak hedef spektruma uyumlu deprem yer hareketi kayıtları elde

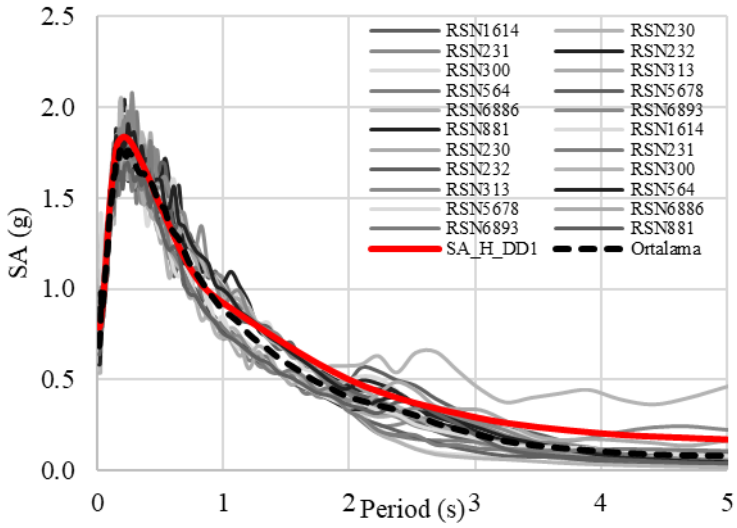
edilen bir yöntem olduğunu belirtmek uygun olacaktır. Bu yaklaşımla kayıtların hedef spektruma oldukça yakın ve uyumlu olduğu aşağıdaki Şekil 3.2 ve 3.3'te görülmektedir. Her üç setten elde edilen ortalama spektrum eğrilerinin karşılaştırılması ise Şekil 3.4'te verilmektedir.



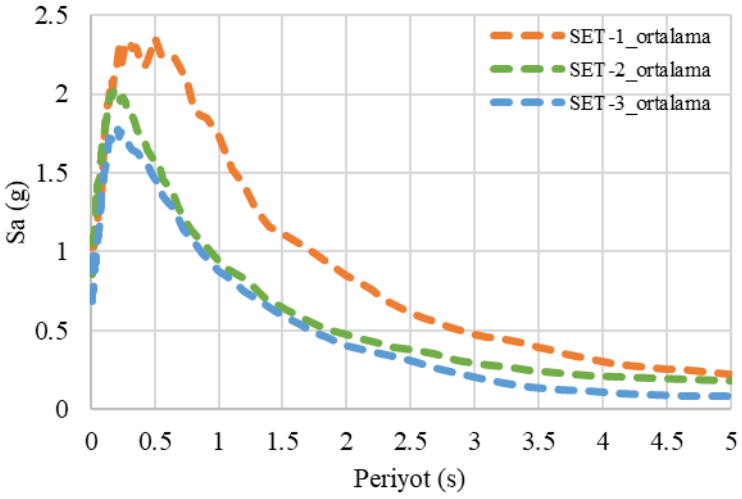
Şekil 3.1. SET-1 tasarıma esas 2475 yıl dönüş periyodu için hedef ivme spektrumu



Şekil 3.2. SET-2 tasarıma esas 2475 yıl dönüş periyodu için hedef ivme spektrumu



Şekil 3.3. SET-3 tasarıma esas 2475 yıl dönüş periyodu için hedef ivme spektrumu



Şekil 3.4. Çalışmada seçilen deprem setleri ortalama spektrumlarının karşılaştırılması

3.2. Prefabrik yapının modellenmesi

Bu çalışmada ele alınan Betonarme prefabrik sanayi (BPS) yapısının tasarımında, saha uygulamalarında yaygın bir şekilde kullanılan eleman boyutları, açıklıklar ve malzeme özellikleri tercih edilmiştir. Bu bağlamda, çalışmada incelenen BPS yapısının kolon yüksekliği 6 m olarak belirlenmiş, çatı makası ile birlikte toplam yapısal yükseklik 7,345 m'ye ulaşmıştır. Söz konusu yapı, x doğrultusunda 15 m, y doğrultusunda ise 6 m açıklığa sahiptir. Ayrıca, y doğrultusunda 8 açıklıklı olduğundan bu doğrultudaki toplam uzunluk

48 m olarak hesaplanmıştır (6x8=48 m). Yapı, x doğrultusunda iki adet aks (A-B), y doğrultusunda ise dokuz adet aks (1-9) ile tasarlanmıştır. Bu aks düzenlemesi, prefabrik yapıların taşıyıcı sistem tasarımında sıkça kullanılan bir yöntemdir. Bu bağlamda, oluşturulan üç boyutlu (3B) yapı modeline ilişkin detaylı görseller Şekil 3.9'da sunulmuştur.

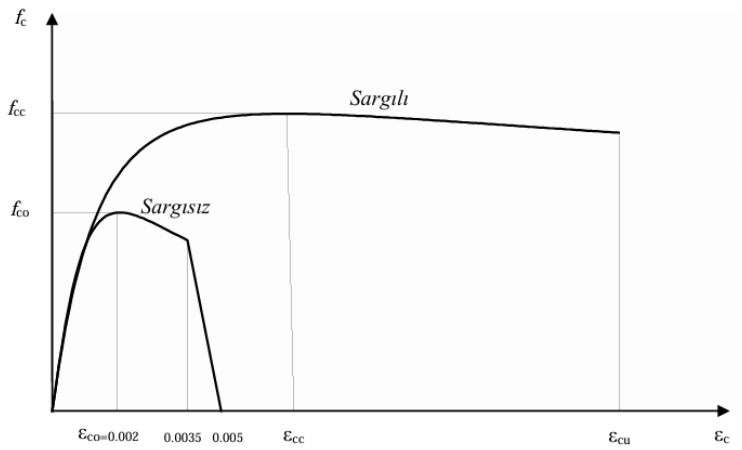
Y doğrultusunda yerleştirilen çerçeveler, çatı seviyesinde TBDY (2018)'de detayları verilen ve Bölüm 2.4'te açıklanan mafsallı kolon-çatı kiriş pimli bağlantı türü (MFB1) kullanılarak birleştirilmiştir. Bu bağlantı türü, prefabrik sistemlerin montaj sürecini hızlandırmak ve kolaylaştırmak amacıyla sıklıkla tercih edilmektedir. Çerçeveler, U kesitli oluk kirişleri ve aşıklar ile uygun şekilde bağlanmıştır. Ayrıca, TBDY (2018)'de belirtilen yönetmelik parametreleri doğrultusunda, bu bağlantılar deprem yükleri altında enerji yutma kapasitesini artıracak şekilde doğrusal olmayan davranış dikkate alınarak modellenmiştir.

3.2.1. Malzeme

Malzeme özellikleri bakımından, modelde kullanılan beton sınıfı C30 olarak seçilmiştir. Karakteristik beton dayanımı (f_{ck} = 30 MPa) ve beton elastisite modülü ($E = 5000\sqrt{f_{ck}}$) (MPa) olarak dikkate alınmıştır. Donatı elemanları ise B420C sınıfında olup, karakteristik akma dayanımı (f_{yk} = 420 MPa) olarak belirlenmiştir. Modelde kullanılan beton ve donatının doğrusal olmayan davranışını temsil eden gerilme–birim şekil değiştirme ilişkileri, Şekil 3.6 ve Şekil 3.8'de sunulmuştur. Bu malzeme özellikleri, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018)'ne uygun olarak seçilmiştir ve prefabrik yapı tasarımında sıkça kullanılan malzeme sınıflarını yansıtmaktadır.

Sargılı ve sargısız beton modelleri

TBDY (2018)'e göre doğrusal olmayan yöntemler ile şekil değiştirmeye dayalı değerlendirmede, betonun sargılı ve sargısız durumları için farklı gerilme–şekil değiştirme modelleri tanımlanmıştır (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Sargılı ve sargısız beton modelleri

Sargılı betonda beton basınç gerilmesi f_c , basınç birim şekil değiştirmesi ε_c'nin fonksiyonu olarak Denklem (3.2)'deki bağıntı ile verilmektedir:

$$f_c = \frac{f_{cc} x r}{r - 1 + x^r} \tag{3.2}$$

Bu bağıntıdaki sargılı beton dayanımı f_{cc} ile sargısız beton dayanımı f_{co} arasındaki ilişki Denklem (3.3)'te verilmiştir.

$$f_{cc} = \lambda_c f_{co} \qquad \lambda_c = 2.254\sqrt{1 + 7.94\frac{f_e}{f_{co}}} - 2\frac{f_e}{f_{co}} - 1.254 \tag{3.3}$$

Buradaki f_e etkili sargılama basıncı, dikdörtgen kesitlerde birbirine dik iki doğrultu için Denklem (3.4)'te verilen değerlerin ortalaması olarak alınabilir:

$$f_{ex} = k_e \rho_x f_{yw} \quad f_{ey} = k_e \rho_y f_{yw} \tag{3.4}$$

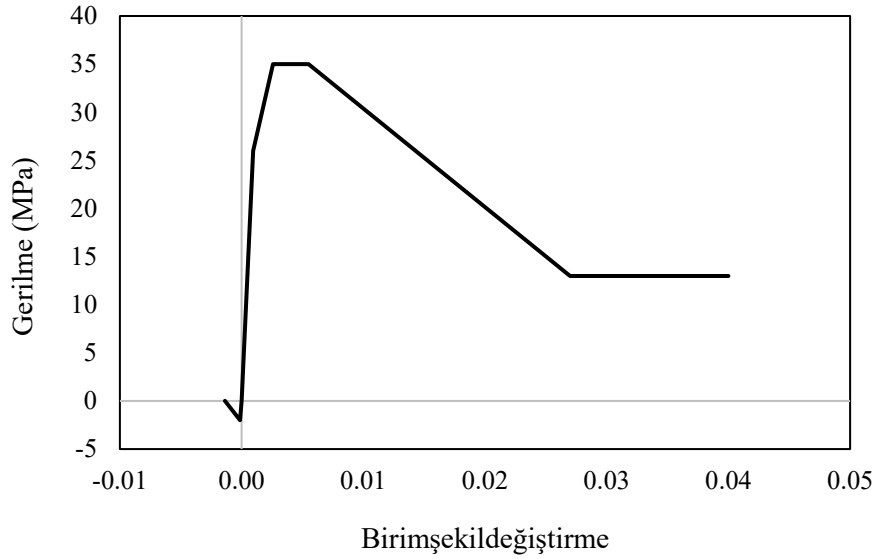
Bu bağıntılarda f_{yw} enine donatının akma dayanımını, ρ_x ve ρ_y ilgili doğrultulardaki enine donatıların hacimsel oranlarını, k_e ise Denklem (3.5)'te tanımlanan sargılama etkinlik katsayısı oranını göstermektedir.

$$k_e = \left(1 - \frac{\sum a_i^2}{6 b_0 h_0}\right)\left(1 - \frac{s}{2b_0}\right)\left(1 - \frac{s}{2h_0}\right)\left(1 - \frac{A_s}{b_0 h_0}\right)^{-1} \tag{3.5}$$

Burada a_i kesit çevresindeki boyuna donatıların eksenleri arasındaki uzaklığı, b_o ve h_o göbek betonunu sargılayan etriyelerin eksenleri arasında kalan kesit boyutlarını, s boyuna doğrultuda etriyelerin eksenleri arasındaki aralığı, A_s ise boyuna donatı alanını göstermektedir. Denklem (3.2)'deki normalize edilmiş beton birim şekil değiştirmesi x ile r değişkenine ilişkin bağıntılar Denklem (3.6) ve Denklem (3.7)'de verilmiştir.

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \qquad \varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co}[1 + 5(\lambda_c - 1)] \qquad \varepsilon_{co} \cong 0.002 \tag{3.6}$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \qquad E_c \cong 5000\sqrt{f_{co}}\ [MPa] \qquad E_{sec} = \frac{f_{cc}}{\varepsilon_{cc}} \tag{3.7}$$

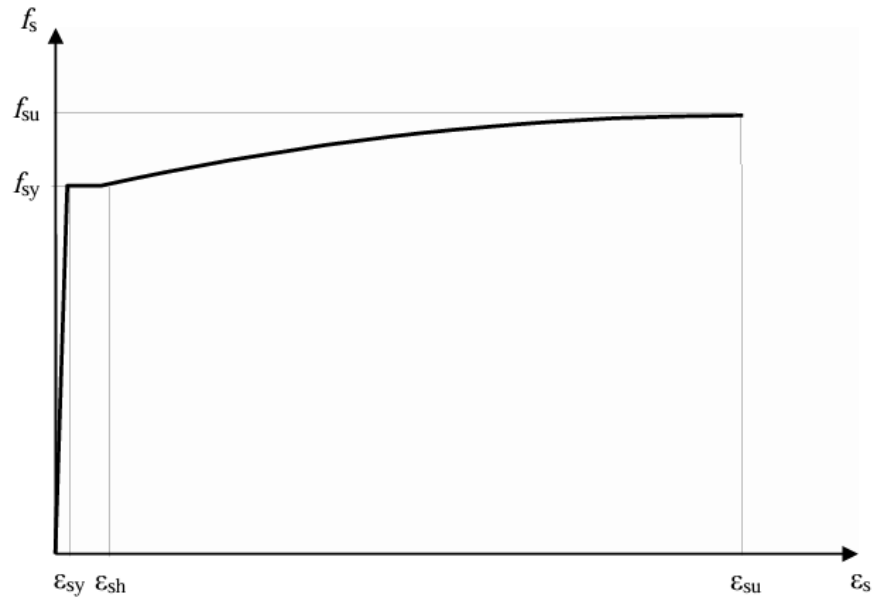


Şekil 3.6. Modellemede kullanılan beton modeli

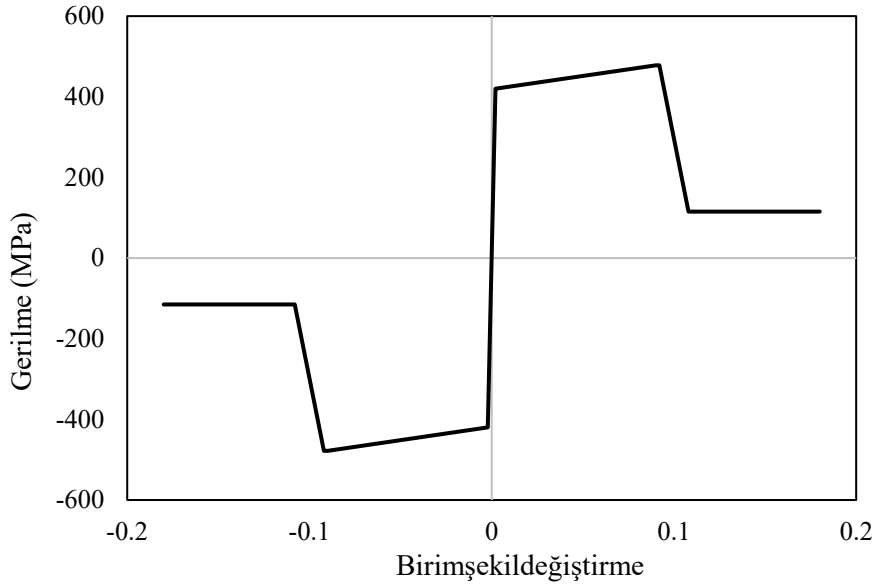
Donatı çeliği modeli

Doğrusal olmayan yöntemler ile şekil değiştirmeye göre değerlendirmede kullanılmak üzere, donatı çeliği için Denklem (3.8)'deki gerilme-şekildeğiştirme bağlantıları tanım tanımlanmaktadır (Şekil 3.7).

$$\begin{aligned} f_s &= E_s\varepsilon_s && (\varepsilon_s \le \varepsilon_{sy}) \\ f_s &= f_{sy} && (\varepsilon_{sy} < \varepsilon_s \le \varepsilon_{sh}) \\ f_s &= f_{su} - (f_{su} - f_{sy})\frac{(\varepsilon_{su} - \varepsilon_s)^2}{(\varepsilon_{su} - \varepsilon_{sh})^2} && (\varepsilon_{sh} < \varepsilon_s \le \varepsilon_{su}) \end{aligned} \tag{3.8}$$



Şekil 3.7. Donatı çeliği malzeme modeli TBDY 2018



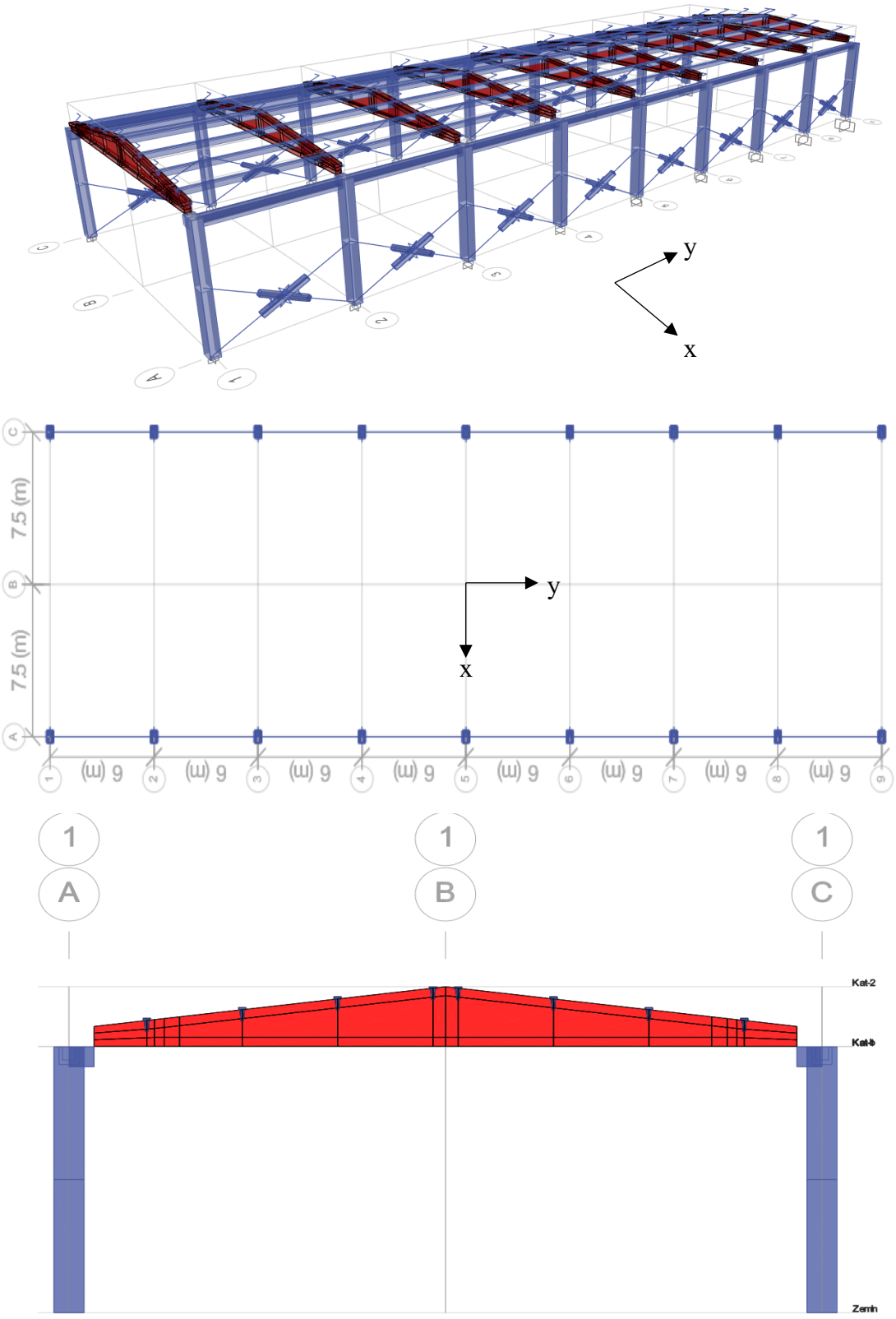
Şekil 3.8. Modellemede kullanılan donatı çeliği modeli

Modelde dikkate alınan doğrusal olmayan davranışa bağlı olarak, kritik yapısal bileşenler için iç kuvvet talepleri elde edilmektedir. Ardından, Göçmenin Önlenmesi (GÖ) performans seviyesine karşılık gelen ve modelde tanımlanmış sınır durumlar dikkate alınarak her deprem seti için ayrı ayrı olmak üzere talep-kapasite (T/K) oranları

hesaplanmıştır. Bu oranların değerlendirilmesinde kullanılan sınır değerler Çizelge 3.2'de özetlenmiştir.

Çizelge 3.2. Analizde kullanılan Göçmenin Önlenmesi (GÖ) performans seviyesine karşılık gelen sınır değerler.

Sınır durumu	**GÖ**	
	Sınır	birim
Donatıdaki birim şekildeğiştirme	0.032	-
Betondaki birim şekildeğiştirme	0.01	-
Düzlem içi kesme deplasman (Çatı makas-guse bağlantısı)	20	mm
Düzlem dışı kesme deplasman (Çatı makas-guse bağlantısı)	20	mm
Düzlem içi dönme (Çatı makas-guse bağlantısı)	0.025	radyan
Düzlem dışı dönme (Çatı makas-guse bağlantısı)	0.025	radyan
X ve Y yönündeki kesme deplasman (Aşık-çatı makası bağlantısı)	20	mm
Göreli ötelenme (Kolon üst ucu)	0.03	-



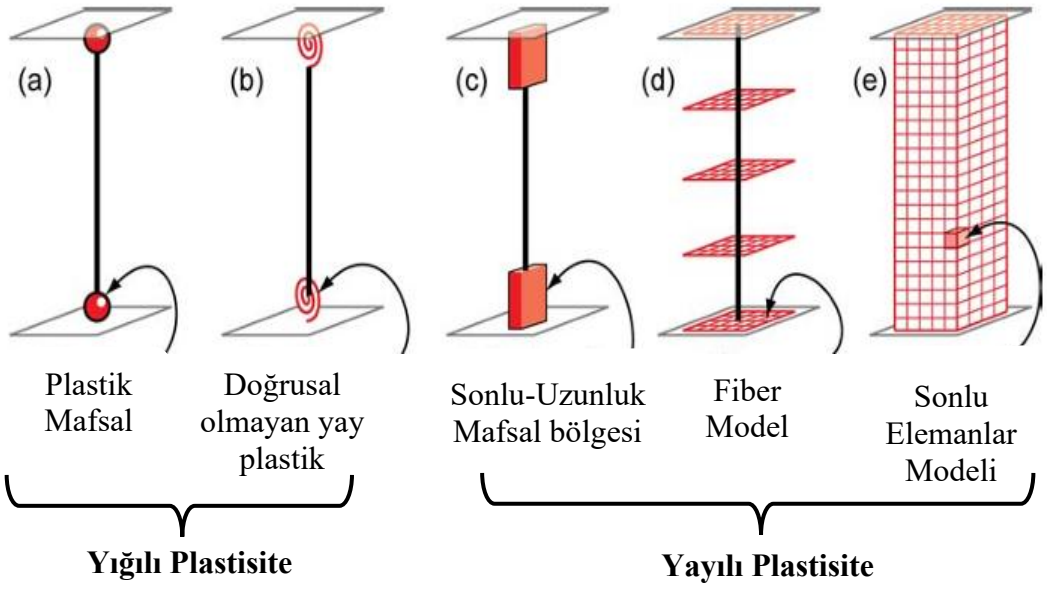
Şekil 3.9. Tek katlı prefabrik yapının üç boyutlu model görüntüsü

3.2.2. Yapısal elemanlar

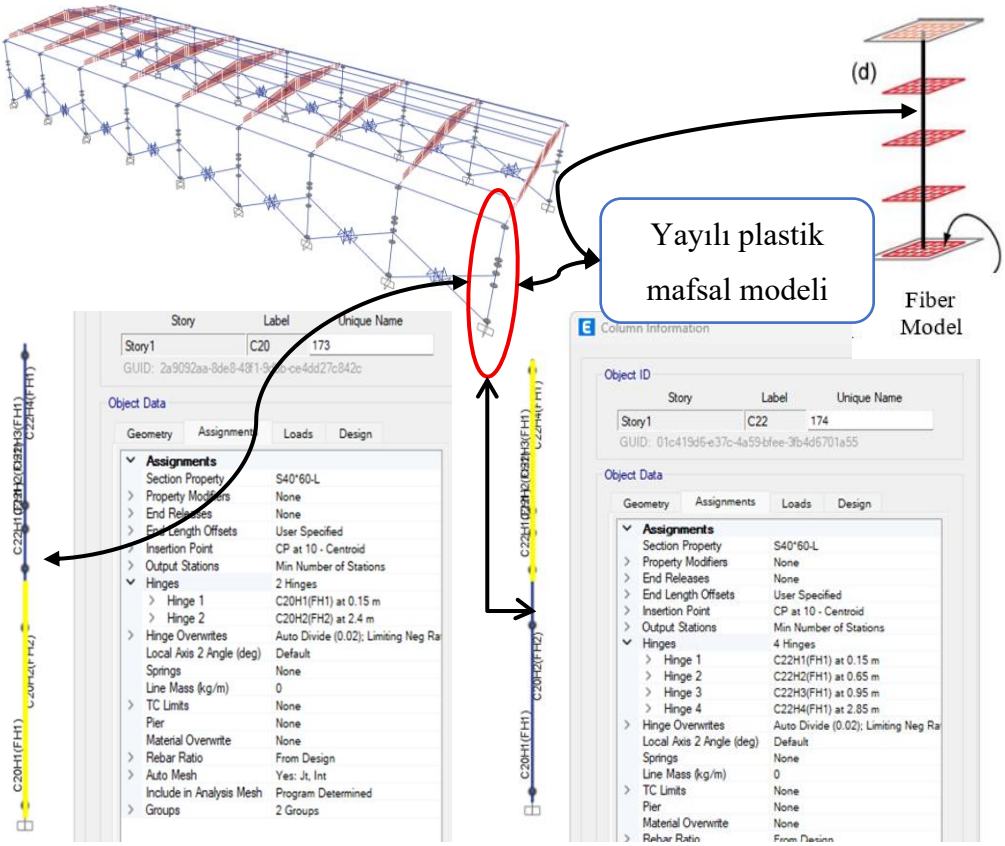
Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY (2018))'e göre, yapı elemanlarının doğrusal olmayan davranışının modellenmesinde iki temel yöntem tanımlanmaktadır: yığılı plastik davranış modeli (Madde 5.3.1) ve yayılı plastik davranış modeli (Madde 5.3.2). Yığılı plastik davranış modelinde, plastikleşme yalnızca çubuk elemanların uç noktalarında tanımlanan plastik mafsallar aracılığıyla temsil edilmektedir. Bu yöntem, plastikleşmenin lokalize olduğu varsayımına dayalı bir modelleme yaklaşımı sunarak hesaplamaların basitleştirilmesini amaçlamaktadır. Buna karşılık, yayılı plastik davranış modelinde, plastikleşmenin eleman boyunca belirli bir yayılım gösterdiği varsayılmakta ve bu durum, yapı davranışının daha detaylı ve gerçekçi bir şekilde modellenmesine olanak tanımaktadır. Şekil 3.10, bu iki farklı modele ait idealize edilmiş yaklaşımları karşılaştırmalı olarak sunmaktadır.

Yayılı plastik davranış modeli (lifli plastisite modeli), elastik ötesi davranışı dikkate alabilen ve mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılan doğrusal olmayan analiz yöntemlerinden biridir. Bu model, elemanların hem kesit düzeyinde hem de eleman uzunluğu boyunca oluşabilecek plastikleşmeleri dikkate alarak, yapı davranışının daha ayrıntılı bir şekilde değerlendirilmesine imkan sağlamaktadır. Lif (fiber) formülasyonu, plastikleşmenin eleman boyunca sürekli olarak temsil edilebilmesi amacıyla geliştirilmiş bir doğrusal olmayan analiz tekniğidir. Bu yaklaşımda, plastikleşme hem eleman kesiti hem de eleman uzunluğu boyunca sayısal integrasyon yöntemleri ile modellenmektedir. Kesit düzeyinde doğrusal olmayan eksenel gerilme–şekil değiştirme ilişkilerini tanımlamak için histeretik özelliklere sahip tek eksenli malzeme modelleri kullanılmaktadır. Bu yöntem, beton ve çelik gibi farklı malzemelerin elastik ve plastik davranışlarını gerçekçi bir şekilde temsil edebilmektedir. Yayılı lif esaslı modeller, geleneksel yoğunlaştırılmış plastik mafsal modellerinden farklı olarak, plastik mafsal dönmelerini doğrudan hesaplamak yerine, beton ve çelik liflerinde meydana gelen yerel şekil değiştirme (strain) talepleri üzerinden temsil edilebilmektedir. Bu sayede, yapı elemanlarının yerel malzeme davranışları ile genel yapısal davranış arasındaki ilişki daha doğru bir şekilde modellenebilmektedir.

Literatürde, yayılı plastisite modellerinin özellikle deprem etkileri altında yapıların doğrusal olmayan davranışını analiz etmede önemli avantajlar sunduğu vurgulanmaktadır. Örneğin, Park & Paulay (1975), yapı elemanlarının yerel plastikleşme kapasitelerinin doğru bir şekilde modellenmesinin genel yapı performansını değerlendirmede kritik bir öneme sahip olduğunu belirtmiştir. Ayrıca, Elnashai & Di Sarno (2008), yayılı plastisite yaklaşımının yüksek sismik tehlike bölgelerinde yapıların güvenilir performans değerlendirmelerine olanak tanıdığını ifade etmektedir. Şekil 3.11'de gösterilen modelde, elemanların kesit düzeyindeki şekil değiştirme kapasitelerini ve eleman uzunluğu boyunca plastikleşmeyi daha gerçekçi bir şekilde yansıtmak hedeflenmiştir. Lifli modelleme yaklaşımı, beton ve çelik malzemelerin histeretik davranışlarını dikkate alarak, yapı elemanlarının elastik ötesi davranışını ayrıntılı bir şekilde temsil etmektedir. Ayrıca, bu yöntem doğrultusunda yapılan analizler, deprem yükleri altında yapı elemanlarının şekil değiştirme ve enerji tüketme kapasitelerinin daha hassas bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanımaktadır.

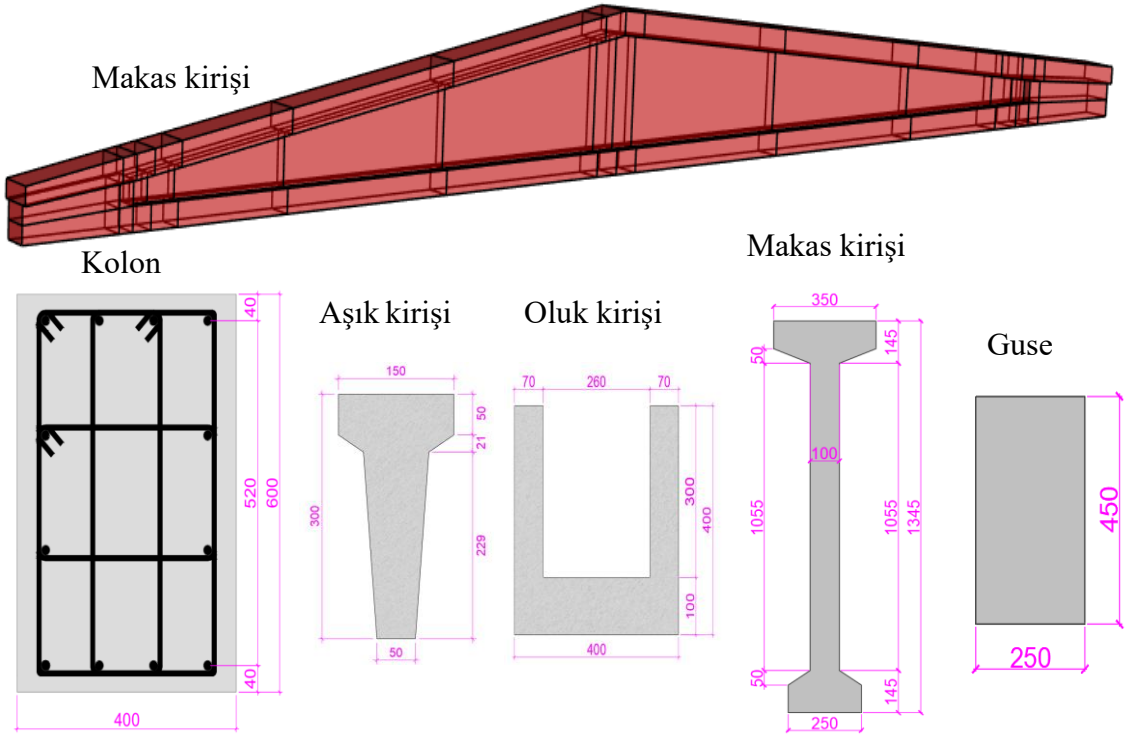


Şekil 3.10. Yapısal elemanlar için plastik davranışın dikkate alındığı idealleştirme yöntemleri (Deierlein vd., 2010)



Şekil 3.11. Kolonda plastik davranışın fiber plastik mafsal ile tanımlanması

BPS yapısında düşey taşıyıcı eleman olarak 600x400 mm boyutlarında kolonlar kullanılmıştır. Kolon kesitleri 16mm çapında 12 adet donatı ile donatılmıştır. Kolonlarda 100 mm aralık, 8mm çapındaki donatılar ile etriye yerleştirilmiş ve pas payı 40 mm olarak dikkate alınmıştır. Çatı makasları dinamik davranışı dikkate alabilmek için kabuk (Shell-Thin) eleman olarak modellenmiş olup üst başlık genişliği 350 mm, makas genişliği 100 mm ve alt başlık genişliği 250 mm olarak modellenmiştir. Prefabrik oluklar 400 mm genişlik ve 400 mm yükseklik ile U kesitli kiriş elemanları olarak modellenmiştir. Aşık kirişler, makas düzleminde çatı yükünü ve kaplamasını taşıyacak şekilde, T kesitine benzer bir biçimde modele dahil edilmiştir. Kısa konsol veya Guse elemanlarının genişliği 250 mm, derinliği ise 450 mm olarak modellenmiştir. Modelde kullanılan yapısal elemanlara ait kesit detayları Şekil 3.12'de verilmektedir.



Şekil 3.12. Modelde kullanan yapısal elemanların boyut detayları

Yapısal modelde, yükleme türleri ilgili yönetmeliklere uygun şekilde gruplandırılmıştır. Bu kapsamda, yapı elemanlarının kendi ağırlıkları G1, sabit yükler G2, hareketli yükler Q ve kar yükü S yükleme durumları olarak tanımlanmıştır (Çizelge 3.3). Çatı kaplamasının alüminyum sandviç panel olduğu kabul edilmiştir. Yapısal sistem üzerindeki sabit yükler kapsamında, çatı kaplama yükü 0.12 kN/m², kar yükü 0.75 kN/m² ve cephe kaplaması yükü ise 4.5 kN/m² olarak alınmıştır. Kütle çarpanları, TBDY (2018) esas alınarak, sabit yükler için 1.0, kar yükleri için ise 0.3 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 3.3. Modelde tanımlanan yükleme türleri

Yükleme	Kapsam
G1	Kolonlar, çatı kirişler, aşıklar, arakat kirişleri, önüretimli döşemeler, yapısal kaplama betonu özağırlıları
G2	Çatı kaplama yükü
Q	Hareketli yükler
S	Kar yükü

3.2.3. Düğüm noktaları

Bu çalışmada modellenen BPS yapısında, guse-çatı makas kirişi ve aşık-çatı makas kirişi düğüm noktaları bulunmaktadır. Söz konusu düğüm noktalarında doğrusal olmayan kesme kuvveti-deplasman ve geometriden ve uygulamadan kaynaklanan moment-dönme davranışlarını temsil edebilmek için uygun sayısal elemanlar üzerinde araştırmalar yapılmıştır. Guse- çatı makas kirişi bağlantıları, yatay doğrultudaki öteleme ve dönme davranışlarını tanımlayan kuvvet-yer değiştirme ve moment-dönme ilişkileri kullanılarak modellenmiştir. Bu modelleme, ETABS yazılımında bulunan multilinear plastic link elemanlar aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Öte yandan, düşey doğrultudaki öteleme ve dönme hareketleri sabitlenmiştir. Aşık- çatı makas kirişi bağlantısı ise yük transfer mekanizması olarak çalıştığından, bu bağlantının yalnızca kuvvet-yer değiştirme davranışı dikkate alınarak multilinear plastic link elemanlar ile modellenmiştir.

BPS yapılarının deprem tasarımındaki en kritik konularından biri, özellikle kiriş-kolon birleşim noktaları olmak üzere bağlantıların uygun şekilde tasarlanmasıdır. Literatürde, somun ve pulla bağlanan prefabrik kiriş ve kolon elemanlarının tek yönlü ve tersinir saf kesme (pure shear) yüklemeleri altındaki davranışını test eden sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Psycharis & Mouzakis (2012) tarafından yapılan çalışmada, bağlantıların kesme süneklik kapasitesi ve çeşitli tasarım parametrelerinin dayanım üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu çalışmada, sismik tasarımda kullanılabilecek pim bağlantılarının nihai kesme dayanımının hesaplanmasına yönelik bir formül önerilmiştir. Bağlantının, uygulanan sismik yükleri taşıma kapasitesinin tasarım kuvveti E_d'nin kayma direnci R_d'den küçük olduğu durumda doğrulandığı ifade edilmiştir. Diğer bir ifade ile, yönetmeliklerde belirtilen klasik eşitsizlik şu şekilde formüle edilmiştir:

$$E_d \leq R_d \tag{3.9}$$

Prefabrik guse- çatı makas kirişi bağlantılarının nihai kayma direnci (R_u) Denklem (3.10) ile , tersinir yükler altında (d/D) oranı 4 ile 6 arasında olduğu durumda Denklem (3.11) ile hesaplanmaktadır. Bu durumda, nihai kayma direnci şu şekilde ifade edilir:

$$R_u = \frac{C_0}{\gamma_R} * n * D^2 * \sqrt{\frac{f_{ck}}{\gamma_{mc}} * \frac{f_{yk}}{\gamma_{ms}}} \quad (3.10)$$

$$R_u = \frac{C_0}{\gamma_R} * \left(\frac{0.25d}{D} - 0.50\right) * n * D^2 * \sqrt{\frac{f_{ck}}{\gamma_{mc}} * \frac{f_{yk}}{\gamma_{ms}}} \quad (3.11)$$

Burada, γ_{mc} ve γ_{ms} sırasıyla beton ve çelik için kısmi güvenlik katsayılarıdır. TS500'de önerilen katsayı değerleri şu şekildedir: $\gamma_{mc} = 1.5$, $\gamma_{ms} = 1.15$. C_0 katsayısı birleşim noktalarındaki dönme büyüklüğüne bağlı olarak 0.90 ile 1.10 arasında değişmektedir. Esnek kolonlarda, büyük dönmelerin meydana gelebileceği durumlarda C_0 değeri 0.90–0.95 aralığında önerilmektedir. Ayrıca bu formüllerin türetilmesinde kullanılan deneysel testlerdeki belirsizlikler ve sınırlı sayıdaki deneysel veri göz önünde bulundurularak, genel bir güvenlik katsayısı tanımlanmaktadır. Bu katsayı γ_R=1.30 olarak önerilmektedir (Psycharis & Mouzakis, 2012). Guse-makas kirişi ve aşık-makas kirişi bağlantılarında boyutlar ve malzeme özellikleri sırasıyla Çizelge 3.4 ve Çizelge 3.5'te verilmiştir. Guse-makas kirişi bağlantısında nihai kesme direnci $R_u = 63.2kN$ olarak, aşık-makas kirişi bağlantısında nihai kesme direnci $R_u = 13.8kN$ olarak hesaplanmıştır.

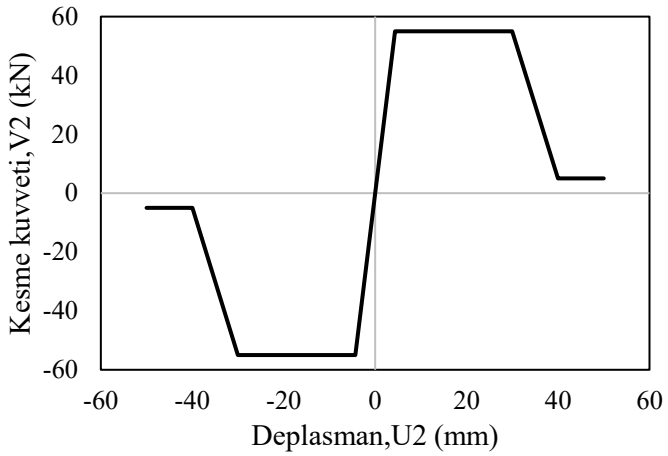
Çizelge 3.4. Guse- çatı makas kirişi bağlantısı boyutları ve malzeme verileri

n	D (mm)	d (mm)	f_{ck} (MPa)	f_{yk} (MPa)	f_{cd} (MPa)	f_{yd} (MPa)	d/D	C_0	γ_R
2	16	100	30	420	20	365.2	6.25	0.95	1.3

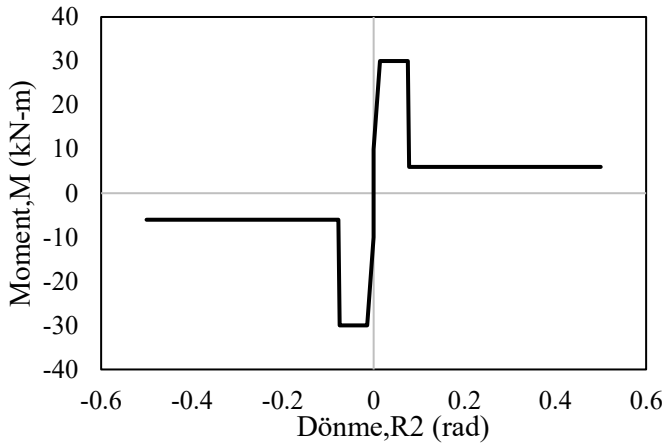
Çizelge 3.5. Aşık- çatı makas kirişi bağlantısı boyutları ve malzeme verileri

n	D (mm)	d (mm)	f_{ck} (MPa)	f_{yk} (MPa)	f_{cd} (MPa)	f_{yd} (MPa)	d/D	C_0	γ_R
1	14	60	30	420	20	365.2	4.29	0.95	1.3

Hesaplanan nihai kesme dayanımlarına göre, guse- çatı makas kirişi ve aşık- çatı makas kirişi bağlantılarının deneysel davranışını temsil edebilen doğrusal olmayan modeller oluşturulmuştur. Guse- çatı makas kirişi bağlantısı, kuvvet-deplasman ve moment-dönme ilişkilerini dikkate alacak şekilde ETABS'ta bulunan Degrading Hysteresis Model kullanılarak modellenmiştir (Şekil 3.13 ve 3.14).

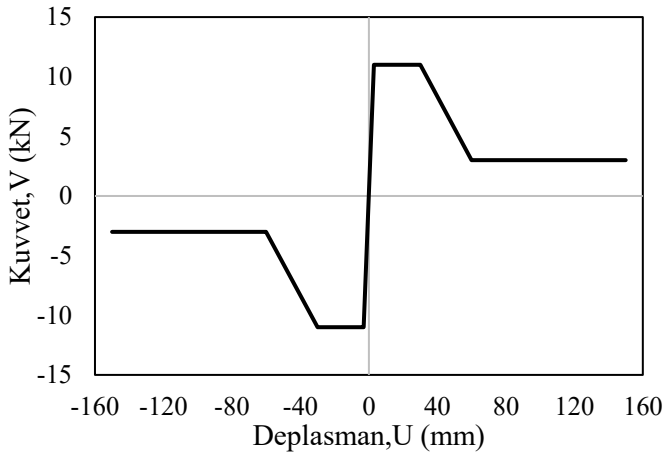


Şekil 3.13. Guse- çatı makas kirişi için tanımlanan kuvvet-deplasman ilişkisi



Şekil 3.14. Guse- çatı makas kirişi için tanımlanan moment-dönme ilişkisi

Aşık elemanlar, makas kirişlerinden gelen yanal yükleri aktarma görevi gördüklerinden, yalnızca kuvvet-deplasman ilişkileri tanımlanacak şekilde Degrading Hysteresis Model kullanılarak modellenmiştir. Bu bağlantıda da ETABS yazılımında multilinear plastic link eleman olarak modellenmiştir.



Şekil 3.15. Aşık-çatı makas kirişi için tanımlanan kuvvet-deplasman ilişkisi

3.2.4. Dolgu duvar

Dolgu duvarlar, literatürde yaygın olarak kullanılan eşdeğer diyagonal basınç çubuğu olarak modellenmiştir. Modelde diyagonal çubuğun etkili genişliği, dolgu duvarlı çerçevenin yanal rijitlik katsayısı, dayanımı ve dolgu duvar ile çerçeve arasındaki etkileşim en önemli parametreler olarak gösterilmektedir. Bu parametreler aşağıda detaylı bir şekilde incelenecektir.

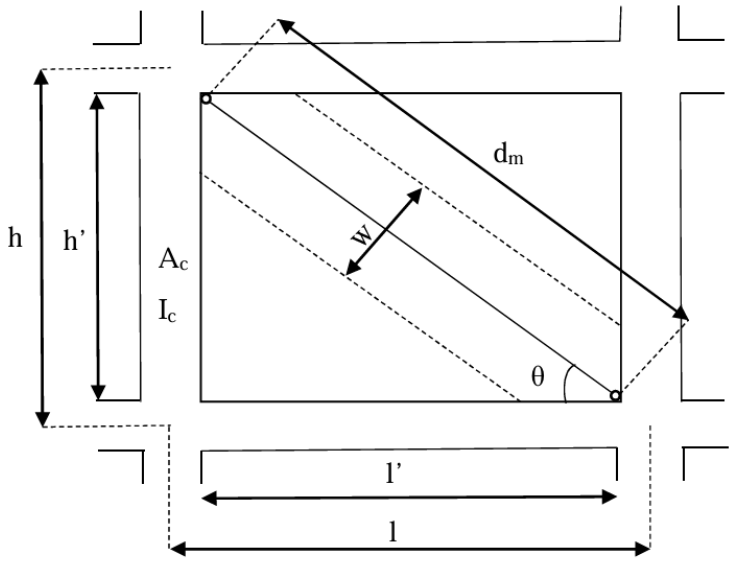
Eşdeğer basınç çubuğu etkili genişliği (w) ile ilgili ilk yaklaşım d_m duvar diyagonal uzunluğunu göstermek üzere Denklem (3.12) ile hesaplamıştır (Holmes vd., 1962).

$$w = \frac{d_m}{3} \tag{3.12}$$

Burada λ_h dolgu duvarın çerçeveye göre olan relatif rijitliğini tanımlayan birimsiz bir katsayıdır ve Denklem (3.13)'e göre hesaplanmaktadır. Burada t ve h' sırasıyla dolgu duvarın kalınlığı ve yüksekliğini, Denklem (3.14) ile hesaplanan θ diyagonal çubuğun yatayla yaptığı açıyı, E_c ve E_d sırasıyla dolgu duvar ve betonun elastisite modülünü ve I_c kolonun atalet momentini göstermektedir (Şekil 3.16).

$$\lambda_h = \sqrt[4]{\frac{E_m t * \sin 2\theta}{4E_c I_c h'}} \tag{3.13}$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{h'}{l'}\right) \tag{3.14}$$



Şekil 3.16. Diyagonal çubuğun etkili genişliği, (Timurağaoğlu, 2015)

Mainstone (1971), küçük ölçekli çelik çerçeveli duvarlar üzerinde diyagonal yönde basınca maruz bırakılan deneyler gerçekleştirmiş ve Denklem (3.15)'i elde etmiştir.

$$w = 0.16\lambda_h d_m \tag{3.15}$$

Abdul-Kadir (1974), gerilme dağılımını dikkate alarak, dolgu duvar çerçeve arasındaki temas mesafesine bağlı olarak eşdeğer çubuk genişliği için Denklem (3.17)'yi önermiştir. Burada;

$$Z_l = \frac{\pi}{\lambda_l} \; ve \; Z_h = \frac{\pi}{2\lambda_h} \tag{3.16}$$

olmak üzere, w aşağıdaki bağıntıdan elde edilmektedir.

$$w = \frac{1}{2}\sqrt{(Z_l)^2 + (Z_h)^2} \tag{3.17}$$

Burada Z_l ve Z_h kolon ve kirişin dolgu duvar ile olan temas mesafesini göstermektedir. Denklem (3.16) bağıntısı Denklem (3.17)'de yerine yazıldığında çubuk genişliği aşağıda verilen bağıntıdan elde edilebilmektedir.

$$w = \frac{\pi}{2}\sqrt{\left(\frac{1}{\lambda_l}\right)^2 + \left(\frac{1}{\lambda_h}\right)^2} \tag{3.18}$$

Te-Chang & Kwok-Hung(1984), çelik çerçeveli duvarlar üzerine yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde ettikleri verileri dikkate alarak etkili genişlik için Denklem (3.19)'u bulmuşlardır.

$$w = \frac{0.95h' \cos\theta}{\sqrt{\lambda_h}} \tag{3.19}$$

Diğer taraftan son yıllarda gerçekleştirilen çalışmalardan Paulay & Priestly (1992), genişlik (w) değerlerinin büyük olmasının daha rijit yapı anlamına geldiğini ve deprem yüklerine karşı daha büyük tepki vereceğini belirterek Denklem (3.20)'yi önermişlerdir.

$$w = 0.25d_m \tag{3.20}$$

TBDY (2018)'de eşdeğer basınç çubuğu genişliğinin, λ_h Denklem (3.13)'ten belirlenmek üzere, Denklem (3.21) ile hesaplanabileceği belirtilmiştir. Eşdeğer basınç çubuğunun k_m eksenel rijitliği (kN/m) ise Denklem (3.22)'den hesaplanmaktadır.

$$w = 0.175(\lambda_h h_k)^{-0.4} d_m \tag{3.21}$$

$$k_m = \frac{wtE_d}{d_m} \tag{3.22}$$

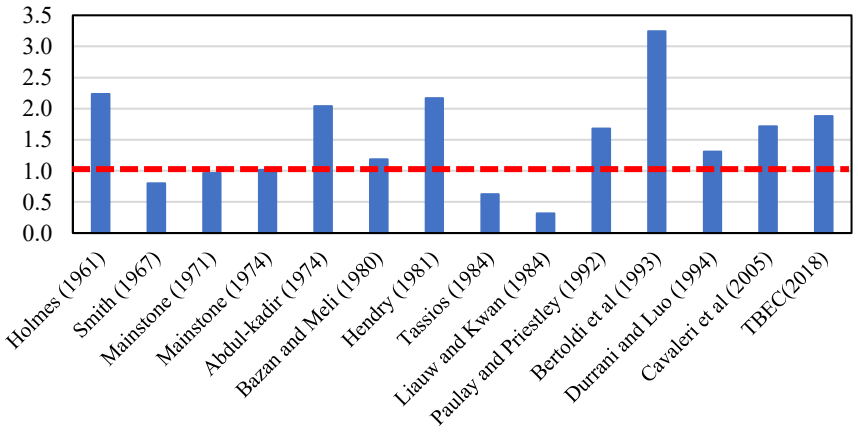
Bu denklemlerde, h_k kolon boyunu, d_m dolgu duvarı köşegen uzunluğunu, t dolgu duvar kalınlığını ve E_d dolgu duvarın elastisite modülünü temsil etmektedir.

Yukarıdaki eşitlikler ve literatürde bulunan birkaç farklı çalışmadaki öneriler (Bazan & Meli, 1980; Bertoldi vd., 1993; Cavaleri vd., 2005; Durrani & Luo, 1994; Hendry, 1981) dikkate alınarak hesaplanan eşdeğer basınç çubuğu genişlikleri Şekil 3.17'de

verilmektedir. Şekil dikkatle incelendiğinde çubuk genişliklerinin 0.3-3.2m arasında değiştiği görülmektedir. Bu çalışma kapsamında ortalama bir değer dikkate almak amacıyla eşdeğer basınç çubuğu genişliği w=1 m olarak seçilmiştir.

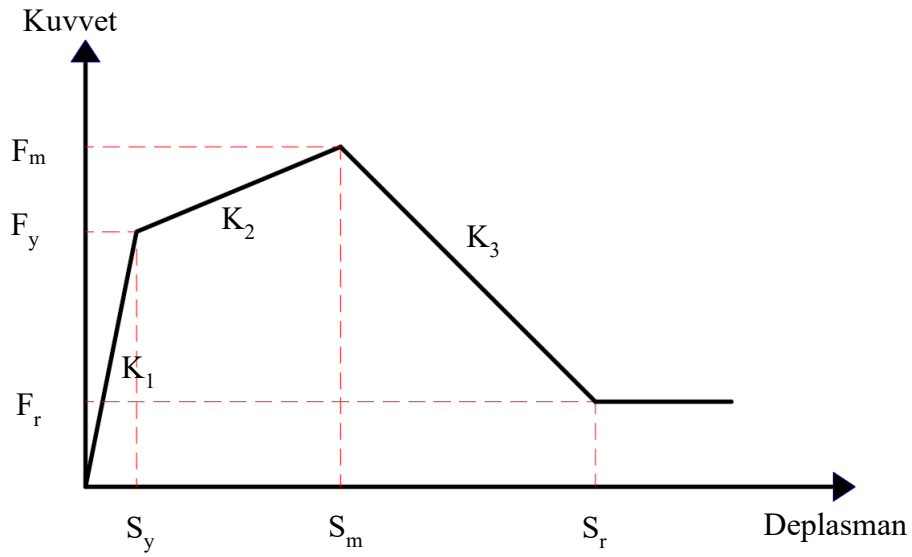
Çizelge 3.6. Dolgu duvarın özellikleri

Malzeme özellikleri	**Duvar boyutları**	**Kolon boyutlar**
$\boldsymbol{E_c = 27000\ MPa}$	l_w=5.6m	b=0.4m
$\boldsymbol{E_d = 1000\ MPa}$	h_w=2.8m	h=0.6m
$\boldsymbol{f_d = 330\frac{kN}{m^2}}$	t=0.2m	I_k=0.0072m^4



Şekil 3.17. Eşdeğer basınç çubuğunun genişliği (m)

T.B. Panagiotakos & M.N.Fardis (1996), tuğla dolgu duvarlı çerçeveler üzerinde gerçekleştirdikleri tersinir deneysel testlere dayanarak duvarın davranışını basitleştirilmiş dört doğrusal (tetra-lineer) bir ilişki ile ortaya koymuşlardır (Şekil 3.18). Bu bölümler, dolgu duvarın kayma davranışını, çerçeve ile dolgu duvar arasındaki ayrılmayı (basınç çubuğu oluşumu), maksimum yer değiştirme S_m sonrasındaki yumuşama davranışını ve son olarak, genellikle sayısal kararlılığı artırmak amacıyla modellenen sabit artık/kalıntı dayanımı tanımlar.



Şekil 3.18. Eşdeğer basınç çubuğu için kuvvet-deplasman ilişkisi

Eşdeğer basınç çubuğunun başlangıç rijitliği:

$$K_1 = \frac{G_d t l_w}{h_w} \tag{3.23}$$

Dolgu duvarın akma dayanımı:

$$F_y = f_{tp} * t * l_w \tag{3.24}$$

Dolgu duvarın akma deplasmanı:

$$S_y = \frac{F_y}{K_1} \tag{3.25}$$

Eşdeğer basınç çubuğunun akma sonrası rijitliği:

$$k_d = K_2 = \frac{wtE_d}{d_m} \tag{3.26}$$

Dolgu duvarın maksimum dayanımı:

$$F_m = 1.25 * F_y \tag{3.27}$$

Dolgu duvarın maksimum deplasmanı:

$$S_m = S_y + \frac{F_m - F_y}{k_2} \tag{3.28}$$

Eşdeğer basınç çubuğunun yumuşama rijitliği:

$$K_3 = 0.0525 * K_1 \tag{3.29}$$

$$0.0525 * K_1 < K_3 < 0.1 * K_1 \tag{3.30}$$

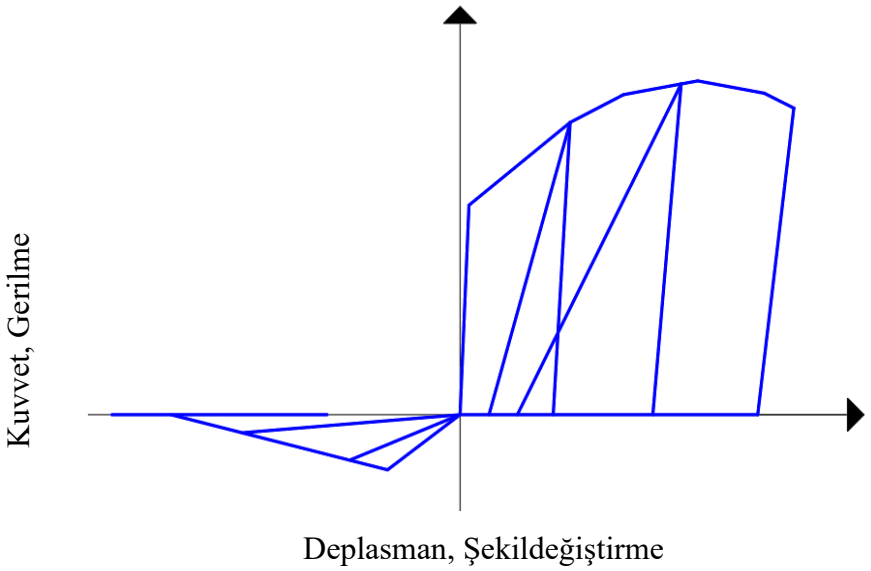
Dolgu duvarın artık/kalıntı kuvveti:

$$F_r = 0.1 * F_y \tag{3.31}$$

Dolgu duvarın artık/kalıntı deplasmanı:

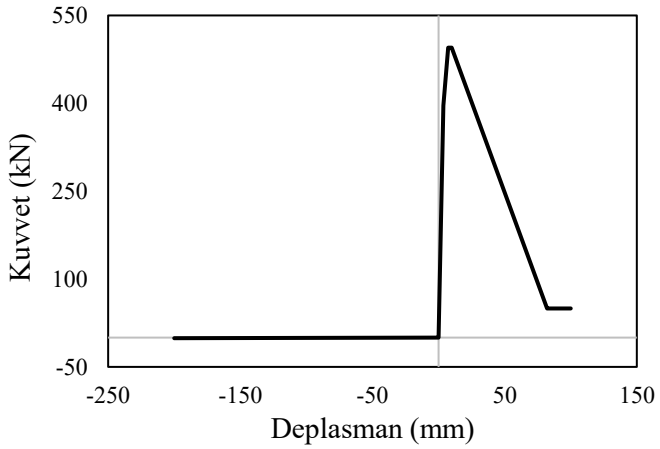
$$S_r = S_m + \frac{F_m - F_r}{k_3} \tag{3.32}$$

Bu çalışmada, tekrarlı yükler altındaki dolgu duvarların doğrusal olmayan davranışı, ETABS (2024) yazılımında yer alan Beton Histerezis Modeli kullanılarak temsil edilmiştir. Şekil 3.19'de gösterilen bu model, esas olarak betonarme olmayan gevrek malzemeler (örneğin yığma, tuğla duvarlar) için tasarlanmıştır ve çekme ile basınç davranışını birbirinden bağımsız olarak tanımlamaya olanak sağlamaktadır. Bu çalışmada, enerji tüketimi ve rijitlik kaybını temsil etmek amacıyla enerji azalım katsayısı (energy degradation factor) f = 0.3 olarak seçilmiştir. Model, boşaltma ve yeniden yükleme davranışını bu katsayıya göre belirler; basınç davranışı bir pivot noktası etrafında dönen doğrusal kurallara göre tanımlanır. Çekme davranışı ise ya sıfır olarak ya da sınırlı kapasiteyle temsil edilebilir. Yığma duvarların çekmeye karşı düşük dayanımı ve gevrek yapısı göz önüne alındığında, yalnızca basınç yükünü taşıyabilen bir eleman olarak idealize edilmesi uygun bir yaklaşımdır. Uygulanan histeresis modeli, bu tür yapı elemanlarının deprem etkisi altındaki beklenen doğrusal olmayan davranışını etkin biçimde yansıtmaktadır.



Şekil 3.19. Artan Çevrimsel Yük Altında Beton Histerezis Modeli (ETABS , 2024)

Yukarıda verilen eşitlikler kullanılarak, modelde duvar davranışını dikkate alınan kuvvet-deplasman ilişkisi Şekil 3.20'de görüldüğü gibi belirlenmiştir. Bu ilişkide dolgu duvarın çekme davranışı ihmal edildiğinden çekme bölgesinde dayanım tanımlanmamıştır.



Şekil 3.20. Dolgu duvar modelinde kullanılan kuvvet-deplasman ilişkisi

3.2.5. Sıvı viskoz sönümleyici

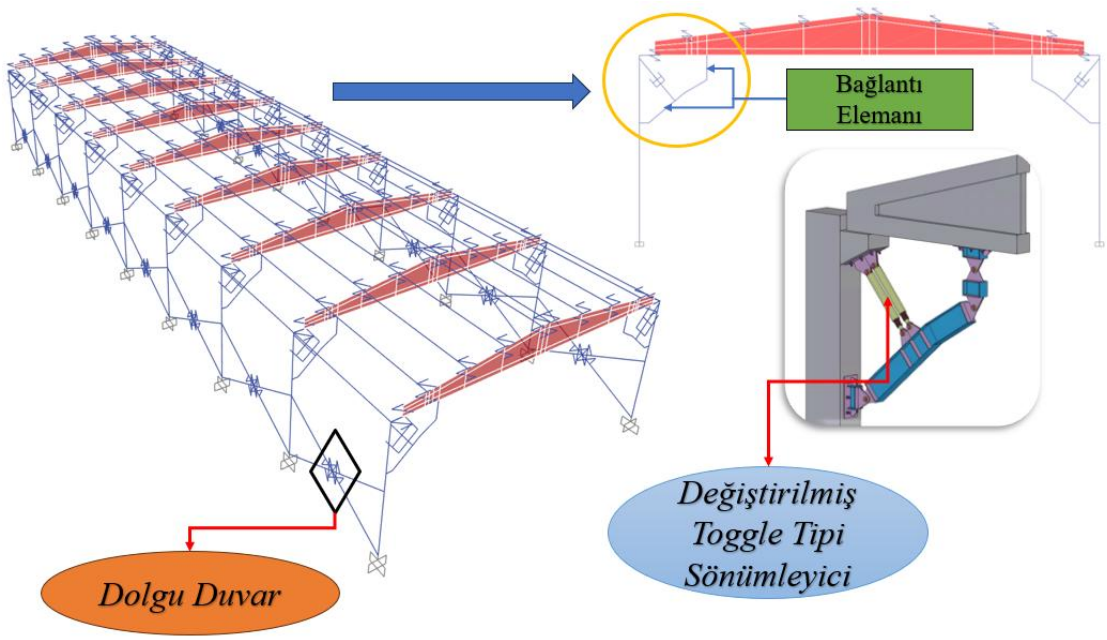
Bu çalışmada, prefabrik sanayi yapıların güçlendirilmiş modellenmelerinde doğrusal olmayan SVS'ler kullanılmıştır. SVS'lerin avantajlarından biri, binanın işlevini ve

hizmetini aksatmadan uygulanabilmesidir. Prefabrik sanayi yapılarında açıklık ve yükseklikler büyük olduğundan, iki kolon arasına viskoz sönümleyici yerleştirilmesi yüksek maliyet ve iş gücü gerektirmektedir. Bu nedenle, düzlem içi viskoz sönümleyici modeli dikkate alınmıştır. Her bir açıklığın iki tarafına paralel ikişer adet viskoz sönümleyici kullanılmıştır. Toplamda 9 açıklıktan oluşan modelde, 36 adet SVS elemanı kullanılmıştır. ETABS yazılımı kullanılarak oluşturulan modelde, Livaoglu vd. (2025) Livaoğlu ve diğ.,(2025) tarafından önerilen değiştirilmiş toggle ve Seleemah & Constantinou (1997) tarafından önerilen diyagonal viskoz sönümleyicilerin yerleşimi sırasıyla Şekil 3.21 ve 3.22'de sunulmaktadır. Çizelge 3.7'de ise modelde kullanılan SVS'lere ait sönümleyici sabiti, yay sabiti ve hız üssü değerleri ayrıntılı olarak belirtilmiştir. Sönümleyicinin kapasitesi, belirtilen parametreler doğrultusunda 40 kN olarak hesaplanmıştır. Sönümleyiciler çifter yerleştirildiğinden, her bir çiftin toplam taşıma kapasitesi 80 kN'dur.

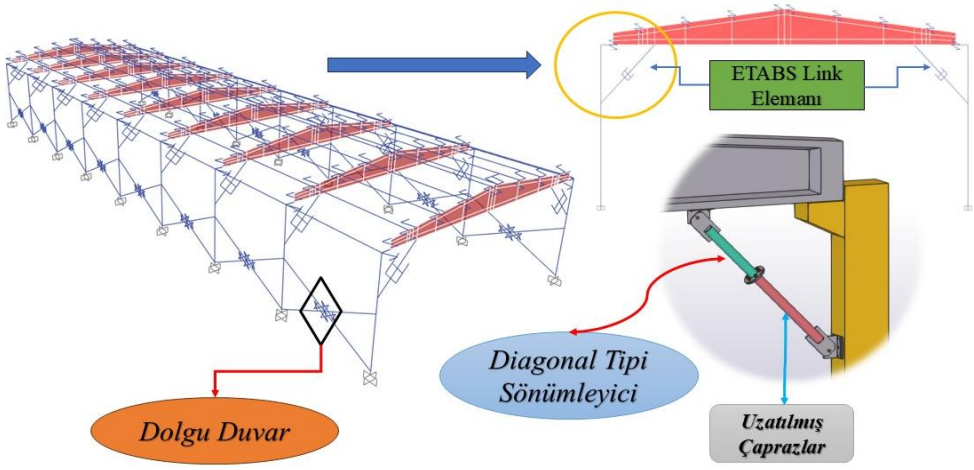
ETABS (2024) yazılımında SVS'ler link elemanı olarak modellenmiştir. Sönümleyicinin daha etkin bir şekilde sönüm üretmesi amacıyla analizlerde özellikleri Çizelge 3.7'de verilen iki adet sönümleyici paralel olarak kullanılmıştır. Değiştirilmiş toggle tipi sönümleyici elemanların bağlantısı için IPE300 kesitli çelik profil bağlantı elemanı kullanılmıştır (Şekil 3.21).

Çizelge 3.7. Sıvı viskoz sönümleyici modellerinde kullanılan katsayılar

Sönümleme Sabiti (C)	**129.66 (kN-s/m) $^{\alpha}$**
Hız Üssü (α)	0.3
Seri Yay Sabiti (K)	34066 kN/m



Şekil 3.21. Toggle SVS'lerin yapıya yerleşim detayı (Livaoglu vd., 2025)



Şekil 3.22. Diyagonal SVS'lerin yapıya yerleşim detayı

3.2.6. Yapısal Sönüm

Yapıların dinamik davranışlarının doğru bir şekilde değerlendirilebilmesi için sönümleme etkisinin uygun şekilde modellenmesi büyük önem taşımaktadır. Modelde elastik olarak modellenen yapısal elemanların sönümünü tanımlamak için modal sönüm kullanılmıştır. ETABS (2024) yazılımı bu kapsamda kullanıcıya, modal sönüm oranlarını malzeme temelli ve rijitlik ağırlıklı olacak şekilde tanımlama imkânı sunmaktadır. Bu

yaklaşım, ETABS (2024) tarafından geliştirilen analiz algoritmasında "composite modal damping" olarak tanımlanmakta olup, her bir elemanın ilgili moda katkısı, mod şekli, eleman rijitlik matrisi ve modal rijitlik değerleri üzerinden hesaplanmaktadır. Ancak bu çalışmada, analiz modeli için tüm modlara sabit bir sönüm oranı tanımlanmıştır. Bu çalışmada da tüm titreşim modlarına %5 (0.05) oranında sönüm uygulanmıştır. Bu oran, TBDY (2018) deprem yönetmeliğinde betonarme ve prefabrik yapılar için önerilen tipik modal sönüm değeri ile uyumludur. Sabit modal sönüm modeli, tüm modlara aynı oranda enerji kaybı uyguladığı için özellikle doğrusal analiz senaryolarında basit ve uygulanabilir bir çözüm sunmaktadır.

3.2.7. Yer hareketinin tanımlanması

Yapıların deprem etkisi altındaki dinamik davranışlarını daha gerçekçi biçimde inceleyebilmek amacıyla zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yöntemi tercih edilmiştir. Bu analiz yaklaşımı, yapı modeline zamana bağlı yer hareketlerinin doğrudan uygulanmasına imkân tanımakta ve özellikle plastikleşme, enerji sönümü, rijitlik değişimi ile birleşim detaylarının etkilerinin ayrıntılı şekilde değerlendirilmesini sağlamaktadır (Chopra, 2019).

Bu çalışmada kullanılan yapı modeli, ETABS (2024) yazılımında oluşturulmuş ve tüm analizler bu yazılım üzerinden gerçekleşmiştir. Analiz kapsamında, “Nonlinear Direct Integration Time History” yöntemi seçilmiştir. TBDY (2018) madde 5.7.2.1’e göre zaman tanım alanında doğrusal olmayan hesaplar için aşağıdaki esaslar belirtilmektedir:

- Zaman tanım alanında yapılacak doğrusal olmayan hesaplarda en az on bir deprem yer hareketi takımı kullanılacaktır.
- Birbirine dik yatay iki doğrultudaki ivme kayıtları, taşıyıcı sistemin X ve Y asal eksenleri doğrultusunda aynı anda birlikte etki ettirilecektir.
- Daha sonra ivme kayıtlarının eksenleri 90° döndürülerek hesap tekrarlanacaktır

Bu kriterler göz önüne alındığında 1 deprem seti için toplamda 22 adet analiz gerekmektedir. Bu yaklaşım, deprem sırasında meydana gelebilecek çift eksenli etkilerin yapının davranışına yansımasını daha doğru şekilde ortaya koymaktadır. Özellikle düşük rijitlikli prefabrik yapılar gibi taşıyıcı sistemlerde bu etkilerin ihmal edilmesi, analiz

sonuçlarının yanıltıcı olmasına neden olabileceğinden, yönetmelikte öngörüldüğü şekilde iki bileşenli yüklemeler esas alınmıştır. Ancak analiz işlem yükü çok arttığı için eksenler 90^o döndürülerek analizler gerçekleştirilmemiştir.

Zaman tanım alanı analizleri, yapının dinamik davranışını zamana bağlı olarak değerlendirmek amacıyla belirli zaman adımları (time steps) üzerinden gerçekleştirilir. Bu tür analizlerde, toplam zaman adımı sayısı nstep parametresi ile, her bir zaman adımının büyüklüğü ise dt (output time step size) parametresi ile tanımlanır. ETABS (2024)ETABS (2024) ve benzeri yazılımlarda zaman tanım alanı analizlerinde doğru ve verimli sonuçlar elde edilebilmesi için, çıktı zaman adımının, girdi (ivme kaydı) zaman adımını tam bölen ya da tam olarak onunla bölünebilir bir değer olarak seçilmesi önerilmektedir. Böylece hem yükleme adımlarında tutarlılık sağlanır hem de rijitlik matrisinin gereksiz tekrar çözülmesi önlenmiş olur (ETABS 2024)(ETABS 2024).

Zaman tanım alanı analizinin doğrudan entegrasyon yöntemiyle gerçekleştirilmesinde çeşitli yaygın yaklaşımlar bulunmaktadır. Bu yöntemler arasında, yenilikçi bir teknik olan ve farklı bir yöntem özellikle tercih edilmediği sürece varsayılan olarak kullanılan Hilber-Hughes-Taylor (HHT) yöntemi önerilmektedir (ETABS , 2024)(ETABS , 2024).Click or tap here to enter text. HHT yöntemi, *üç ayrı* parametre kullanır. Bu parametrelerden *alfa* 0 ile -1/3 arasında bir değer alabilir. *Alfa = 0* olduğunda, yöntem Newmark yöntemi ile eşdeğerdir; bu yöntem aynı zamanda ortalama ivme yöntemi (ya da trapez kuralı) olarak da bilinir. *Alfa = 0* kullanımı, mevcut yöntemler arasında en yüksek doğruluğu sağlar; ancak, zaman adımı büyüklüğüne yakın ya da daha kısa periyoda sahip yüksek frekanslı modlarda aşırı titreşimlere izin verebilir. *Alfa* negatif değerlere sahip olduğunda, yüksek frekanslı modlar daha güçlü şekilde sönümlenir. Bu sönüm fiziksel değildir, çünkü daha küçük zaman adımları kullanıldığında azalır. Bununla birlikte, doğrusal olmayan bir çözümün yakınsamasını sağlamak için genellikle negatif *alfa* değeri kullanılması gerekebilir. En iyi sonuçların elde edilebilmesi için, pratikte mümkün olan en küçük zaman adımının kullanılması ve alfa değerinin sıfıra mümkün olduğunca yakın seçilmesi önerilmektedir. Ayrıca, çözümün bu parametrelere aşırı derecede duyarlı olmadığından emin olunabilmesi için farklı alfa ve zaman adımı değerlerinin denenmesi tavsiye

edilmektedir. Bu çalışmada ise alfa değeri sıfır olarak, *gamma = 0.5* ve *beta = 0.25* değerleri olarak seçilmiştir.

ETABS (2024)ETABS (2024) yazılımında zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizlerde kullanılan "Nonlinear Parameters" sekmesi altında üç farklı çözüm yöntemi sunulmaktadır: Iterative Only, Event-to-Event Only ve Iterative Event-to-Event. Başlangıçta Iterative Only yöntemi tercih edilmiş olsa da bu yöntemin enerji dengelemesinde yüksek hata üretmesi, analiz süresinin aşırı uzun olması ve sonuçların güvenilirliğini olumsuz etkilemesi nedeniyle yeterli görülmemiştir. Bu nedenle alternatif olarak diğer yöntemler de değerlendirilmiştir. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda hem analiz süresini optimize eden hem de daha doğru ve kararlı sonuçlar sağlayan Iterative Event-to-Event yöntemi tercih edilmiştir. Bu yöntem, zaman adımı içinde meydana gelen olayları dikkate alıp çözüm üreterek analiz doğruluğunu artırmakta ve çözüm sürecinde avantaj sağlamaktadır.

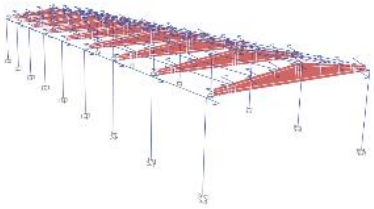
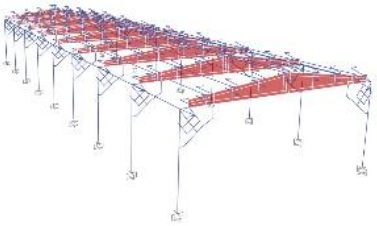
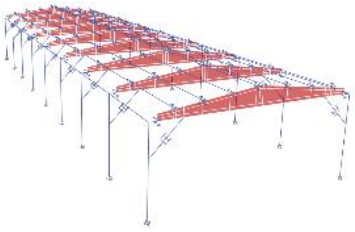
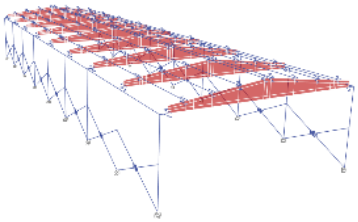
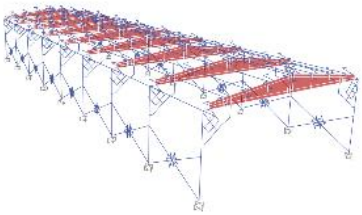
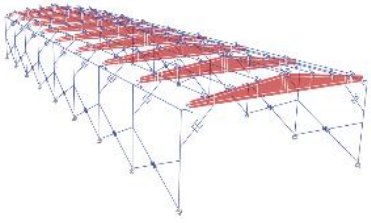
Doğrusal olmayan doğrudan entegrasyon analizleri, doğrusal olmayan bir statik analizden veya daha önce gerçekleştirilmiş başka bir doğrusal olmayan doğrudan entegrasyon analizinden devam ettirilebilir. Bu çalışmada, zaman tanım alanı analizi, öncelikle gerçekleştirilen doğrusal olmayan statik analiz sonucundaki durumdan (G+nQ_NL) devam ettirilmiştir. Bu tür bir yaklaşımda, önceki analiz adımında kullanılan geometrik doğrusal olmayanlık (P-Delta vb.) parametreleriyle tutarlılık sağlamak amacıyla, aynı doğrusal olmayanlık seçeneklerinin seçilmesi önemle tavsiye edilmektedir. ETABS (2024).

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

BPS yapısının düzlem içi ve düzlem dışı sismik yükler altındaki davranışını araştırmak amacıyla düğüm noktalarındaki gerçekçi davranışı temsil edebilen üç boyutlu (3B) sayısal modeller geliştirilmiştir. Düzlem içine yerleştirilen sıvı viskos sönümleyicilerin (SVS) ve düzlem dışına tanımlanan dolgu duvarın yapının deprem yükleri altındaki tepkilerini değerlendirmek amacıyla, duvarsız ve sönümleyicisiz referans model, duvarlı model, değiştirilmiş-toggle ve diyagonal sönümleyici konfigürasyonları ile birlikte toplam altı farklı model oluşturulmuştur. Bu modeller için gerçekleştirilen modal analiz ve zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz sonuçları, kolonlar, guse-çatı makası, aşık-çatı makası ve dolgu duvar gibi yapı elemanlarının tepkileri ve bunların talep/kapasite (T/K) oranları incelenmektedir. Enerji ilişkileri üzerinden yapıdaki toplam enerji girdisi ile, yapısal elemanların ve sönümleyicilerin tükettiği enerji oranları belirlenerek, sönümleyici etkinliği bu veriler ışığında değerlendirilmektedir. Bu karşılaştırmalara ek olarak, guse-çatı makası ve aşık-çatı makası bağlantılarında kullanılan SVS'lerin zaman tanım alanındaki tepkileri de detaylı biçimde incelenmektedir.

Bu çalışmada, gerçek yapı projelerinde kullanılan ve farklı zemin koşulları ile çeşitli deprem tehlike seviyelerine göre belirlenmiş deprem kayıtları kullanılmıştır. Çizelge 3.7'de belirtilen bu deprem kayıtları temel alınarak, üç farklı deprem seti oluşturulmuştur. Bu setler sırasıyla Set-1, Set-2 ve Set-3 olarak isimlendirilmiş olup, her biri 11 deprem çiftinden oluşmaktadır. Analizlerde kullanılan altı farklı yapısal model ise şu şekilde tanımlanmıştır: Sönümleyici Yok, Duvar Yok (SYDY); Sönümleyici Yok, Duvar Var (SYDV); Değiştirilmiş-Toggle Sönümleyici Var, Duvar Yok (TSDY); Diyagonal Sönümleyici Var, Duvar Yok (DSDY); Değiştirilmiş-Toggle Sönümleyici Var, Duvar Var (TSDV); ve Diyagonal Sönümleyici Var, Duvar Var (DSDV). Bu kısaltmalar ve modellere ait görseller Çizelge 4.1'de detaylandırılmış olup, kısaltmalar tartışma bölümünde sıkça referans verilmektedir. Ayrıca, TSDY, DSDY, TSDV, DSDV, SYDV ve SYDY modellerine ait toplamda 11 deprem kaydından oluşan üç deprem seti kullanılarak, her biri 11×3=33 ve toplamda 198 zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz gerçekleştirilmiştir. Bu analizler, TBDY (2018) kapsamında, ETABS paket programı kullanılarak yapılmıştır.

Çizelge 4.1. Oluşturulan 3B model isimleri ve kısaltmaları

Model ismi	Kısaltması	Görsel
Sönümleyici Yok - Duvar Yok (Referans model)	SYDY	
Toggle Sönümleyici - Duvar Yok	TSDY	
Diyagonal Sönümleyici - Duvar Yok	DSDY	
Sönümleyici Yok - Duvar Var	SYDV	
Toggle Sönümleyici - Duvar Var	TSDV	
Diyagonal Sönümleyici - Duvar Var	DSDV	

4.1. Model dinamik karakteristiklerinin değerlendirilmesi

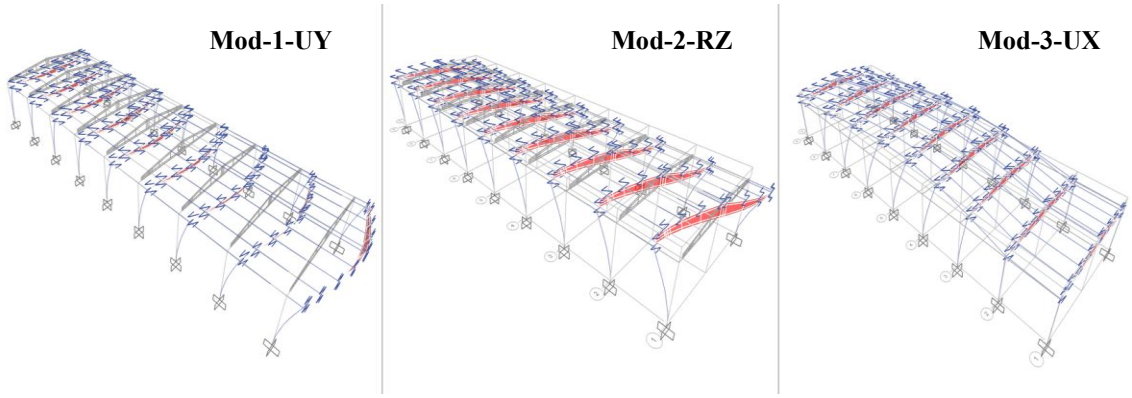
Zaman tanım alanında dinamik analizlerden önce her bir modelin dinamik özelliklerini belirlemek amacıyla modal analizler gerçekleştirilmiştir. Her bir modelden elde edilen ilk üç moda ait periyotlar ve kütle katılım oranları Çizelge 4.2'de verilmektedir. Bu modlara ait mod şekilleri ise SYDY için Şekil 4.1'de, SYDV için Şekil 4.2'de ve sönümleyici olan modeller için Şekil 4.3'te gösterilmektedir. SYDY modelinde birinci moda karşılık gelen periyod T_1=0,781s olarak belirlenmiş ve modelin y doğrultusundaki modal kütle katılım oranı %87 olarak hesaplanmıştır. Dolgu duvarın sisteme eklenmesiyle beraber sistemin dinamik özellikleri önemli oranda değişim göstermiştir. SYDV modelinde birinci moda karşılık gelen periyod T_1=0,579s değerine düşmüştür. Bu değer sistemin düzlem dışı y doğrultusunda rijitleştiğini açıkça göstermektedir. Benzer şekilde duvarın varlığının SYDV modelinde kütle katılım oranlarını da değiştirdiği anlaşılmaktadır. Duvarın sisteme tanımlanmasıyla beraber y doğrultusundaki birinci moda ait kütle katılım oranı %87'den %39'a düşmektedir. SYDY modelinde ikinci mod %14 kütle katılım oranı ile burulma moduyken SYDV modelinde üçüncü mod %30 kütle katılım oranı ile burulma modu olmaktadır. Burulma modunun periyodu referans modelde T_2=0.480s'den SYDV modelde T_3=0.39s'ye düşmektedir. Bunlara ek olarak, SYDY modelinde x doğrultusundaki kütle katılım oranı %74 ve o moda ait periyod T_3=0.428s iken duvarlı model olan SYDV modelinde kütle katılım oranı %60 ve o moda ait periyod T_2=0.39s olarak elde edilmiştir. Bunlara karşın sisteme değiştirilmiş toggle veya diyagonal fark etmeksizin sönümleyici eklenmesi sistemin dinamik özelliklerinde bir değişikliğe sebep olmadığı Çizelge 4.2'den ve Şekil 4.3'ten açıkça anlaşılmaktadır. Dolgu duvarın olmadığı ve sönümleyicilerin olduğu modellerde (DSDY ve TSDY) dinamik özellikler SYDY modeline benzerken duvarın ve sönümleyicilerin mevcut olduğu modellerde (DSDV ve TSDV) sistemin dinamik karakteristikleri SYDV modeline benzerdir.

Bütün bu sonuçlar, dolgu duvarların sisteme ek rijitlik kazandırdığını ve sistemin dinamik özelliklerini değiştirdiğini, buna karşın sıvı viskoz sönümleyicilerin (SVS) sisteme ek bir rijitlik katkısı sağlamadığı ve yapının dinamik özellikleri üzerinde belirgin bir değişikliğe yol açmadığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, dolgu duvarsız sistemde periyodun uzadığı

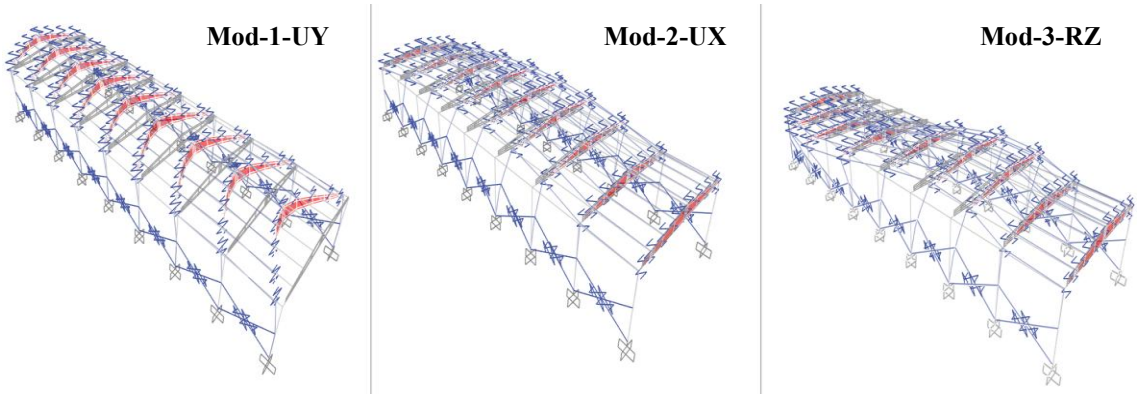
ve yapının daha esnek davrandığı, periyot değerlerinden ve kütle katılım oranlarından açıkça anlaşılmaktadır.

Çizelge 4.2. Modellere ait periyod ve kütle katılım oranları

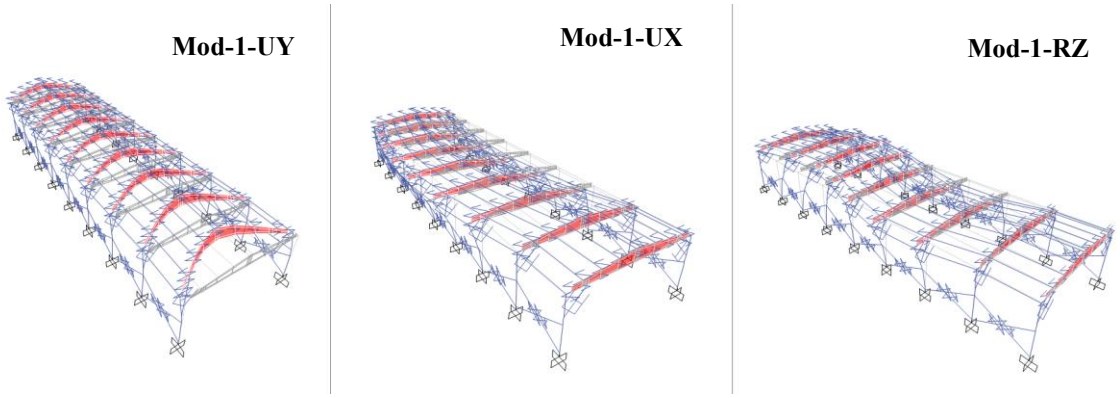
Model			Kütle katılım oranı		
	Mod	Periyod (sn)	UX	UY	RZ
SYDY	1	0.781	0	87%	0
	2	0.480	0	0	14%
	3	0.428	74%	0	0
DSDY	1	0.781	0	87%	0
	2	0.480	0	0	14%
	3	0.428	74%	0	0
TSDY	1	0.781	0	87%	0
	2	0.480	0	0	14%
	3	0.428	74%	0	0
SYDV	1	0.579	0	39%	0
	2	0.39	60%	0	0
	3	0.39	0	0	30%
DSDV	1	0.579	0	39%	0
	2	0.39	60%	0	0
	3	0.39	0	0	30%
TSDV	1	0.579	0	39%	0
	2	0.39	60%	0	0
	3	0.39	0	0	30%



Şekil 4.1. SYDY, DSDY ve TSDY modellerine ait mod şekilleri



Şekil 4.2. SYDV modeline ait mod şekilleri



Şekil 4.3. DSDV ve TSDV modellerine ait mod şekilleri

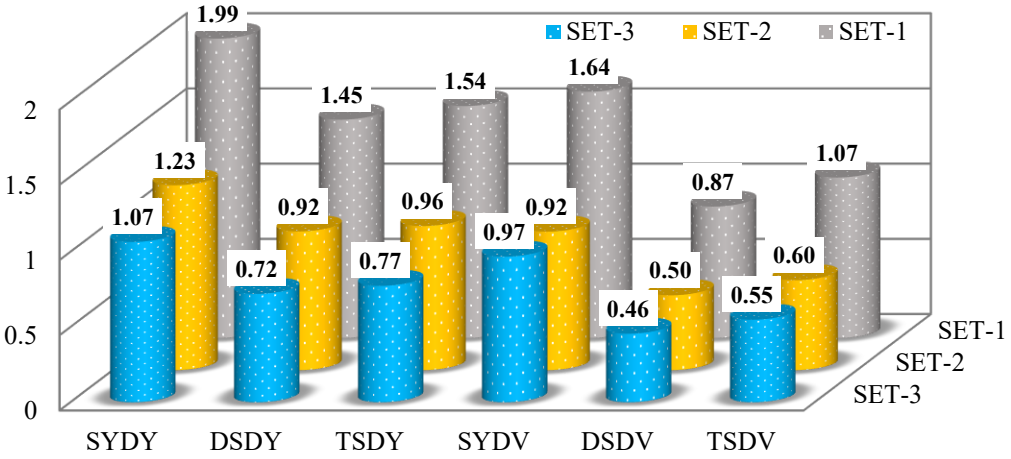
4.2. Kolon T/K oranlarının değerlendirilmesi

Kolon donatısındaki birim şekil değiştirme için T/K değerleri, Çizelge 3.2'de tanımlanan Göçmenin Önlenmesi (GÖ) performans hedefi için ilgili sınır değerler esas alınarak hesaplanmıştır. Şekil 4.4 her bir set ve model için ayrı ayrı olmak üzere kolon donatılarındaki ortalama T/K oranlarını göstermektedir. Şekil incelendiğinde, SYDY ve SYDV modelleri için tüm setlerde en yüksek T/K oranlarının elde edildiği açıkça gözlemlenmektedir. İki model karşılaştırıldığında bütün setlerde yapı sisteminde duvarın varlığının kolon donatısındaki şekil değiştirme T/K değerlerinde %10-25 oranlarında azalmalara neden olduğu anlaşılmaktadır. Öte yandan duvarlar beraber sönümleyicilerin eklenmesiyle (DSDV ve TSDV) şekil değiştirme T/K değerlerinin SYDY modeline göre

%60 oranlarına kadar azaldığı ilgili karşılaştırmalarda görülmektedir. Öte yandan, sönümleyici elemanların bulunmadığı yapı konfigürasyonlarında (SYDY ve SYDV) kolon elemanlarının daha yüksek yapısal taleplere maruz kaldığını göstermektedir. Duvarın bulunmadığı ancak sönümleyicilerin mevcut olduğu DSDY ve TSDY modellerinde referans modele göre %22-30 civarında azalmalar gerçekleşmiştir.

Bununla beraber, DSDV hariç bütün modellerde, özellikle deprem tehlikesinin yüksek olduğu Set-1 senaryosu altında kolon elemanlarında T/K oranının birim değerin üstünde kaldığı tespit edilmiştir. Özellikle TSDV modelinde, donatıların kapasitesinin yaklaşık %7 oranında aşıldığı, DSDV modelinde ise bu oranın 1 değerinin altında kaldığı belirlenmiştir. Bu sonuçlar, sönümleyicilerin duvarsız modellerde etkinliklerinin aynı olduğunu, duvarlı modellerde ise diyagonal sönümleyicilerin değiştirilmiş-toggle sönümleyicilere göre kolon donatısı birim şekildeğiştirme üzerindeki etkisinin %15-19 oranında daha fazla olduğunu ve kolon donatısındaki talepleri azalttığını ortaya koymaktadır. Ayrıca artan deprem tehlikesi ile referans modele göre sönümleyicilerin donatı şekil değiştirme T/K oranını 1 değerinin altına indirmede yetersiz kaldığını vurgulamak gerekir. Bu açıdan bakıldığında düşük kapasiteli SVS'lerin sisteme sağladığı sönümün belirli bir düzeyde kaldığını belirtmek gerekir.

Öte yandan, her iki sönümleyici ve duvarlı DSDV ve TSDV modellerde daha düşük deprem tehlikesine sahip Set-2 ve Set-3 senaryoları için GÖ performans sınırının aşılmadığı gözlemlenmiştir. Buna karşın her iki sette de duvarsız modelde talepler kapasiteyi aşmıştır. Bu bulgular, diyagonal ve değiştirilmiş-toggle tipi sönümleyici elemanların uygun yerleşim ve tasarımı ile yapı sisteminin sismik performansını iyileştirilebileceğini göstermektedir. Bu karşılaştırmalara göre, sönümleyici elemanların yapıya entegrasyonu, kolon elemanlarındaki donatı şekil değiştirmelerinde oluşabilecek aşırı taleplerin azaltılmasına katkı sağlayarak, genel yapısal performansı önemli ölçüde artırdığı söylenebilir. Ayrıca, bütün modellerde Set-1 sonuçlarının en yüksek olduğu görülmektedir. Bunun sebebi olarak Set-1'de deprem tehlikesinin diğer setlere nazaran çok daha fazla olması şeklinde ifade edilmesi uygun olacaktır. Bu durum her üç setin tepki spektrumlarının karşılaştırıldığı Şekil 3.4'te açıkça anlaşılmaktadır.

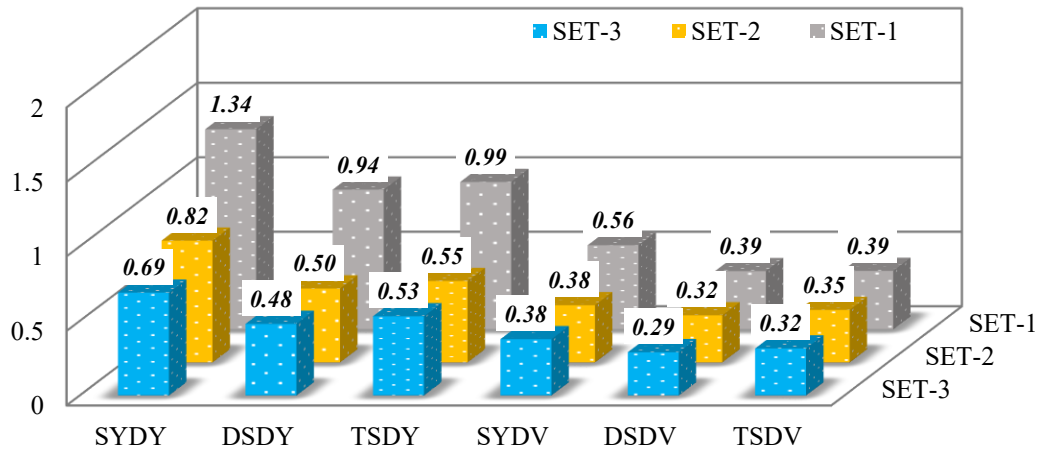


Şekil 4.4. Kolon donatısı birim şekil değiştirme ortalama T/K oranları

Betondaki birim şekil değiştirme değerlerine dayanarak elde edilen kolon elemanlarının ortalama T/K oranları Şekil 4.5'te sunulmuştur. Şekil incelendiğinde, Set-1 senaryosu için elde edilen 1.34'lik T/K oranı ile en yüksek değerin hem duvarın hem sönümleyicinin olmadığı SYDY modelinde gerçekleştiği anlaşılmaktadır. Bu durum donatıdaki birim şekildeğiştirme ile birlikte düşünüldüğünde bu senaryo için kolonun göçme durumunda olduğuna işaret etmektedir. Sisteme sadece sönümleyici tanımlanmasıyla T/K oranı Set-1, Set-2 ve Set-3 için de azalmıştır. Bu azalımlar DSDY modelinde %30-39 arasındayken TSDY modelinde ise %23-36 arasında kalmaktadır. Sadece dolgu duvarın sisteme eklenmesiyle bu oran azalarak 0.38-0.56 arasında değişen değerlere düşmektedir. Diğer yandan, duvar ve sönümleyici içeren DSDV ve TSDV modellerinde elde edilen oranların SYDV modeline göre %15–30 civarında, SYDY modeline göre ise %57–70 oranında azaldığı görülmektedir. Duvarsız sönümleyici içeren DSDY ve TSDY sistemlerinde ise beton şekil değiştirmelerinde azalmalar SYDY modeline göre %30-40 civarında olmaktadır. Ayrıca, DSDY ve TSDY ile SYDV modelleri karşılaştırıldığında duvarın sönümleyicilere göre beton birim şekildeğiştirme üzerinde %30-40 civarında daha etkili olduğu ortaya çıkmaktadır.

Bu durum, sönümleyici ve duvar kullanımının yalnızca donatı davranışı üzerinde değil, beklenildiği üzere betonun şekil değiştirme talepleri üzerinde de olumlu etkiler yarattığını

göstermektedir. Örneğin, sönümleyici ve duvar olmayan SYDY modelinde Set-1 senaryosuna ait T/K oranı 1,34 iken DSDV ve TSDV modellerinde bu oran 0.39 olarak gerçekleşmektedir.



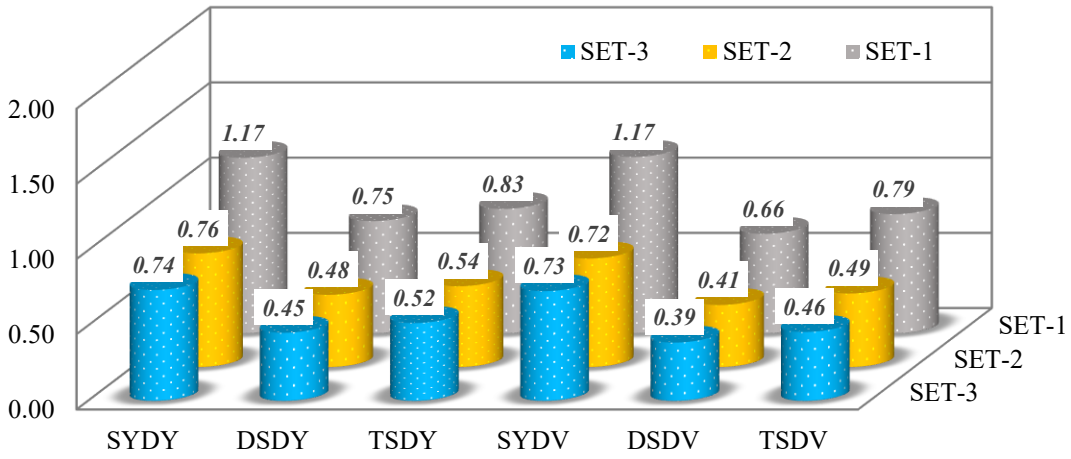
Şekil 4.5. Kolonda beton birim şekildeğiştirme ortalama T/K oranları

4.3. Göreli kat ötelemesi T/K oranlarının değerlendirilmesi

Göreli kat ötelemesi kolon üst ucundaki deplasmanın kolon uzunluğuna bölünmesiyle hesaplanmıştır. Şekil 4.6'da kolon ile çatı makası bağlantı noktasında x yönündeki göreli kat ötelemesine ait ortalama T/K oranları verilmiştir. Elde edilen verilere göre, SYDY ve SYDV modellerinde x yönünde en yüksek öteleme oranının gözlemlendiği anlaşılmaktadır. Özellikle SYDY ve SYDV modellerinde Set-1 senaryosu altında elde edilen 1.17 değeri, sönümleyici ve duvar bulunmayan sistemde yatay ötelemenin ciddi boyutlara ulaşabildiğini göstermektedir. Sadece duvar bulunan SYDV modelinde de SYDY modeline benzer değerler elde edilmesi ise düzlem dışına yerleştirilen duvarın düzlem içi davranışına katkısının olmadığı göstermektedir. SYDV ve SYDV modellerinde daha düşük deprem tehlikesine sahip Set-2 ve Set-3 senaryolarında düzlem içi kat ötelemeleri %35 civarında daha düşük değerler elde edildiği gözlemlenmiştir. Sadece sönümleyicinin bulunduğu TSDY modelinde bütün setlerde SYDY modeline kıyasla %30 oranında azalma meydana gelirken DSDY modelinde bu oran yaklaşık %40 olarak gerçekleşmiştir. Duvarla beraber diyagonal sönümleyicinin eklenmesiyle sistemde

ötelenmeler SYDV'ye göre ortalama %45 oranında azalırken değiştirilmiş-toggle tipi sönümleyicide ise diyagonal sönümleyiciye göre ötelemelerde %10-20 oranında artış gözlenmektedir. SYDV ve SYDY modellerinde T/K oranı 0.72-1.17 arasında değişmekteyken DSDV modelinde x yönündeki kat ötelemesi Set-1 için 0.66'ya, Set-3 senaryosunda bu değer 0.39'a kadar düşmektedir. TSDV modelinde ise en yüksek oran 0.79 (Set-1), en düşük oran ise 0.46 (Set-3) olarak elde edilmiştir.

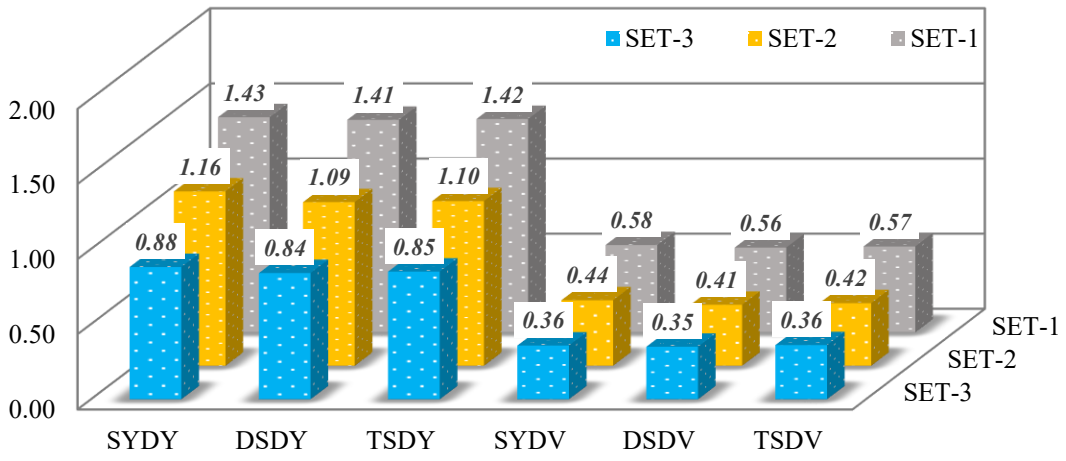
Deprem tehlikesi yüksek bölgelerde (Set-1), sönümleyicisiz modellerin T/K oranlarının 1'in üstünde olması ve sönümleyici içeren modellerin T/K oranlarının birim değerin altında kalması, sönümleyici entegrasyonunun sismik performansa katkı sağladığını ve yapısal ötelemelerin güvenli sınırlar içerisinde tutulabildiğini ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, sönümleyici sistemlerin kullanımı, yalnızca taşıyıcı elemanlarda oluşan iç kuvvetleri ve şekil değiştirmeleri değil, aynı zamanda yapının göreli kat ötelenme davranışını da iyileştirdiği sonucunu doğurmaktadır.



Şekil 4.6. Kolon-çatı makası x yönü göreli kat ötelemesine ait ortalama T/K oranları

Şekil 4.7, kolon-çatı makası bağlantısında y yönündeki göreli kat ötelemesine ait ortalama T/K oranlarını sunmakta ve yapısal sistemin düzlem dışı y yönü davranışını değerlendirme imkânı sağlamaktadır. Elde edilen sonuçlara göre, SYDY, DSDY ve TSDY modellerinde, deprem tehlikesi yüksek olan Set-1 ve Set-2'de y yönündeki ötelemelerin T/K oranının birim değerin üzerinde olduğu açıkça görülmektedir. Set-1

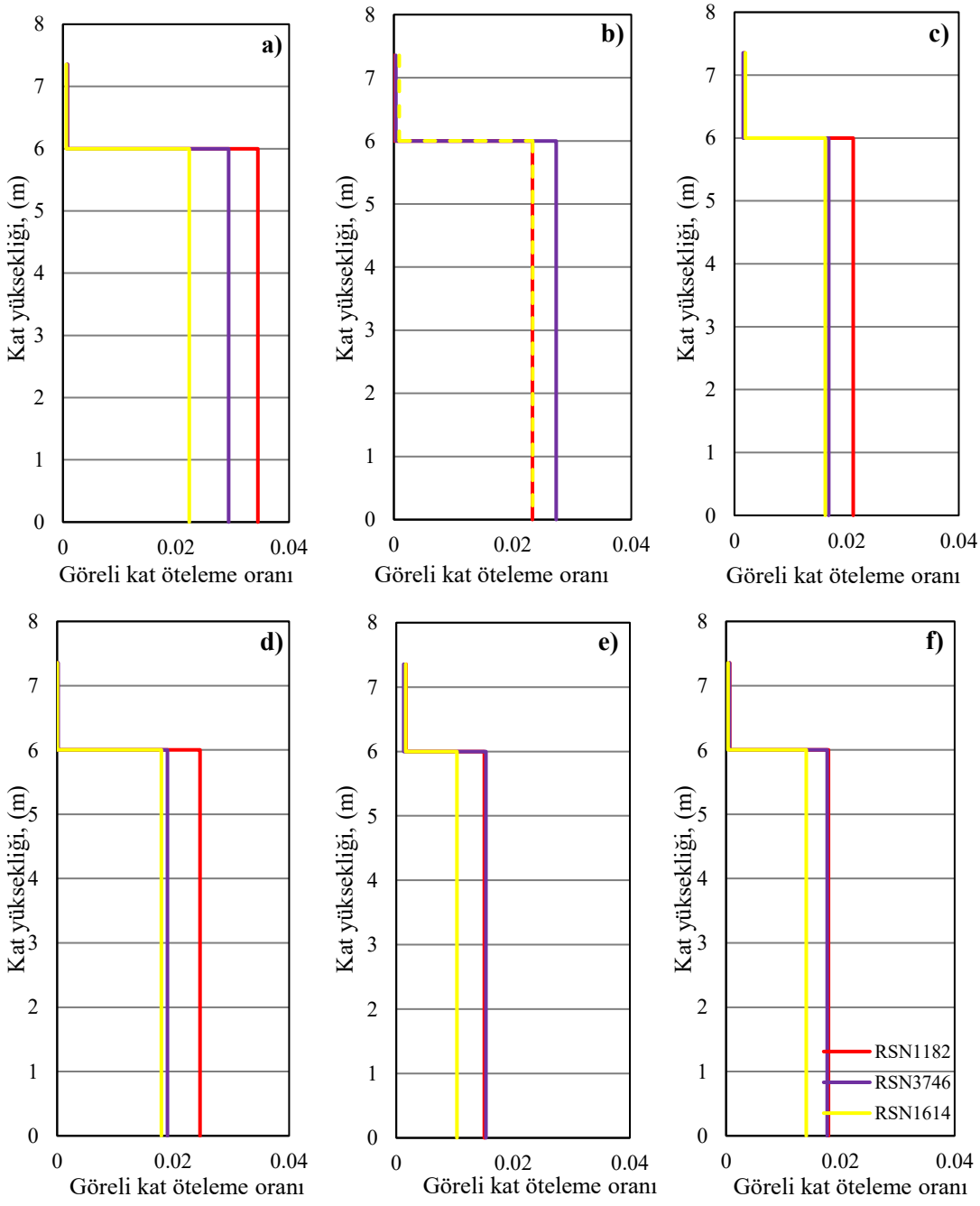
senaryosunda elde edilen 1.43'lük oran, bu modelde en yüksek yatay ötelenme değerini göstermektedir. Bu yüksek oranlar, dolgu duvar elemanların bulunmadığı yapılarda yatay yükler altında y yönünde önemli deplasmanların meydana geldiğini göstermektedir. Set-1 ve 2'ye göre SYDY, DSDY ve TSDY modellerinde Set-3 için göreli kat ötelemelerinde sırasıyla %40 ve %25 oranında daha az değerler meydana gelmektedir. Sadece duvarın bulunduğu SYDV modelinde, dolgu duvarların sisteme ek rijitlik kazandırdığı ve yatay ötelenmeleri ortalama %60 oranında azalttığı görülmektedir. Buna karşılık, duvar ve sönümleyici içeren DSDV ve TSDV modelleri incelendiğinde, tüm senaryolarda T/K oranlarında önemli bir değişim olmadığı görülmektedir. Benzer davranış duvarın olmadığı modellerde de görülmektedir. SYDY modeli oranları ile DSDY ve TSDY model T/K oranları birbirine yakın seyretmektedir. Bu sonuçlar, duvarın mevcut olduğu durumda düzlem içi yerleştirilen sönümleyicilerin düzlem dışı (y yönü) ötelenmeleri sınırlamada etkisiz olduğunu göstermektedir. Sonuçlar, y yönündeki yapısal deformasyonların azaltılmasında duvarların varlığının sistemin öteleme davranışını belirlerken öteleme oranının kabul edilebilir seviyelere indiğini göstermektedir.



Şekil 4.7. Kolon-çatı makası y yönü göreli kat ötelemesine ait ortalama T/K oranları

Her bir seti temsilen bir adet (Set-1 için RSN1182, Set-2 için RSN3764 ve Set-3 için RSN1614) deprem kaydı kullanılarak, Şekil 4.28'de gösterilen C1 kolon elamanı ve çatı-makası üst ucundan alınan deplasman değerleri kullanılarak yapının göreli öteleme

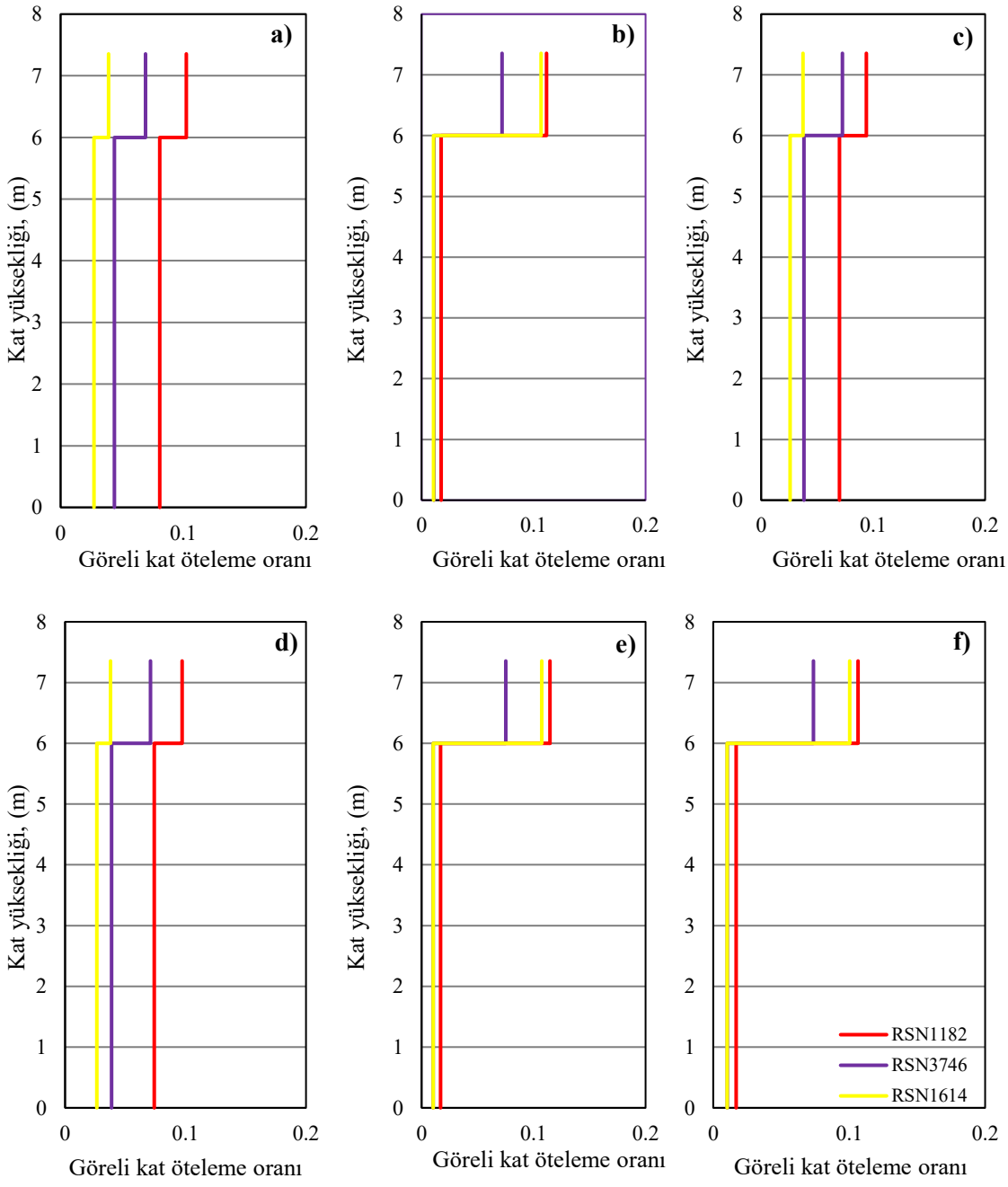
oranını (drift) gösteren grafikler elde edilmiştir. Analizlerde tüm modeller için aynı deprem kayıtları esas alınmıştır. Modellerin x yönündeki göreli kat öteleme oranlarının kat yüksekliği ile değişimi Şekil 4.8'de verilmektedir. Kolon ve çatı makasında meydana gelen göreli kat öteleme oranları ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Referans modelde (SYDY) düzlem içi x yönünde kolonda oluşan göreli kat öteleme oranları RSN1182 ve RSN3746 kayıtları için yaklaşık %2.2-3.4 SYDV modelinde ise RSN3746 kayıtı için %2.7 seviyelerinde gerçekleşmiştir. Sisteme değiştirilmiş toggle (TSDV) ve diyagonal (DSDV) sönümleyicilerin eklenmesiyle bu değerler yaklaşık %1,5-1,8 seviyelerine kadar düşmüş ve böylece yaklaşık %40 oranında bir azalma sağlanmıştır. Çatı makasında oluşan öteleme oranlarının ise tüm modellerde %0,2'in altında kaldığı görülmüştür (Şekil 4.8). Sadece sönümleyicilerin olduğu DSDY ve TSDY modellerinde referans modele göre %20-40 oranında azalmalar gerçekleşmiştir. Ayrıca, deprem tehlikesinin azalmasına bağlı olarak RSN1614 kaydında kolonda oluşan göreli öteleme oranlarının referans model (SYDY) ve dolgu duvarlı model (SYDV) için %2,2 oranına; değiştirilmiş toggle (TSDV) ve diyagonal (DSDV) sönümleyiciler içeren modellerde ise yaklaşık %1,4 ile %1,0 seviyelerine kadar azaldığı tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, duvar ve sönümleyicilerin etkisiyle beraber göreli kat öteleme oranlarında yaklaşık %36 ile %60 arasında değişen oranlarda anlamlı bir azalma meydana geldiğini göstermektedir.



Şekil 4.8. Modellerin x yönündeki göreli kat öteleme değerleri; a) SYDY, b) SYDV, c) DSDY, d) TSDY e) DSDV f) TSDV

Modellerin y yönündeki göreli kat öteleme oranlarının kat yüksekliği ile değişimi Şekil 4.9'da verilmektedir. Şekil incelendiğinde, kolonda düzlem dışı y yönündeki göreli kat öteleme oranlarının referans (SYDY), DSDY ve TSDY modellerde diğer modellere kıyasla belirgin şekilde daha yüksek olduğu görülmektedir. Deprem tehlikesi yüksek olan RSN1182 kaydında bu oranın yaklaşık %7-8 civarında olduğu, RSN3746 kaydında ise

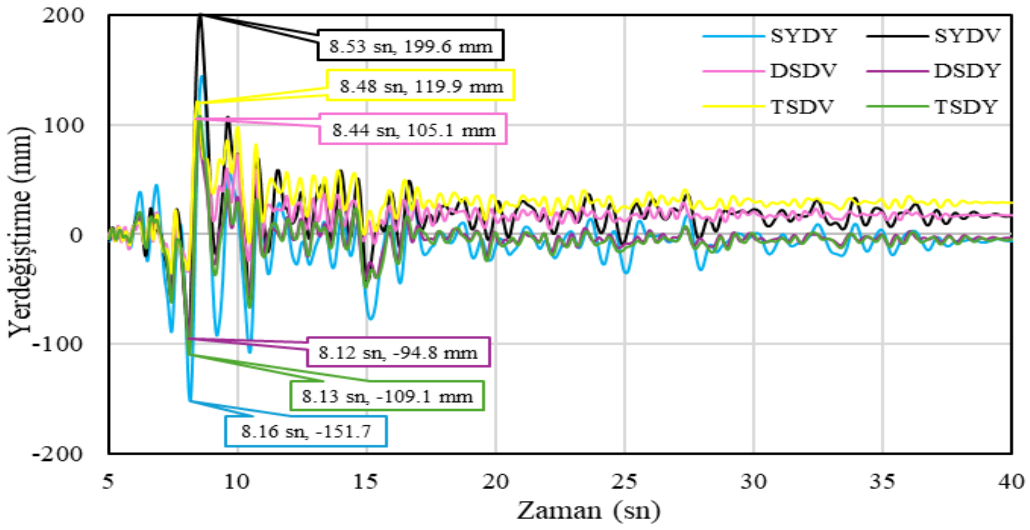
yaklaşık %3,8-4.4'e ulaştığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, çatı makasında meydana gelen göreli kat öteleme oranlarının tüm setileri temsil eden deprem kayıtlarında %4 ile %11 aralığında gerçekleştiği belirlenmiştir. Bu değerler, TBDY 2018'de öngörülen göreli kat ötelemesi sınır değerinin (%3) yaklaşık üç katına karşılık gelmekte olup, yapının bu doğrultuda ciddi bir göçme riski altında olduğunu göstermektedir. Öte yandan, deprem tehlikesi düşük olan RSN1614 kaydında kolonda göreli öteleme oranlarının sınır değere yakın olarak yaklaşık %2.6 seviyesinde gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Sadece sönümleyicilerin bulunduğu DSDY ve TSDY modellerinde kolon öteleme oranları SYDY referans modele göre %8.0-3 aralığından sırasıyla %2.5-6.9 ve %2.4-7.4 aralığına düşmektedir. Analiz sonuçlarına göre, dolgu duvarının modele dahil edilmesiyle dolgu duvarsız modele kıyasla kolonda göreli öteleme oranlarının yaklaşık %1,7'ye kadar düştüğü gözlemlenmiştir. Dolgu duvarının y yönünde sağladığı ek rijitlik nedeniyle dolgu duvarlı (SYDV), değiştirilmiş toggle (TSDV) ve diyagonal sönümleyici (DSDV) sistemlerinde kolonlarda düşük yer değiştirmeler gerçekleşirken, çatı makasında y yönünde yüksek yer değiştirmelere ve dolayısıyla yüksek öteleme oranlarına maruz kalınmaktadır.



Şekil 4.9. Modellerin y yönündeki göreli kat öteleme değerleri; a) SYDY, b) SYDV, c) DSDY, d) TSDY c) DSDV, d) TSDV

Şekil 4.10'da her model için Set-1'de bulunan RSN778 kaydının bir bölümüne ait x yönü C1 kolonun üst ucundaki yer değiştirme–zaman ilişkisi sunulmaktadır. Bu set, yüksek deprem tehlikesine sahip bir senaryoyu temsil etmektedir. Şekildeki yer değiştirme–zaman grafikleri karşılaştırıldığında, dolgu duvarlı modelin (SYDV) en büyük yer değiştirmesi, dolgu duvarsız modele (SYDY) kıyasla yaklaşık %13 daha fazla olduğu

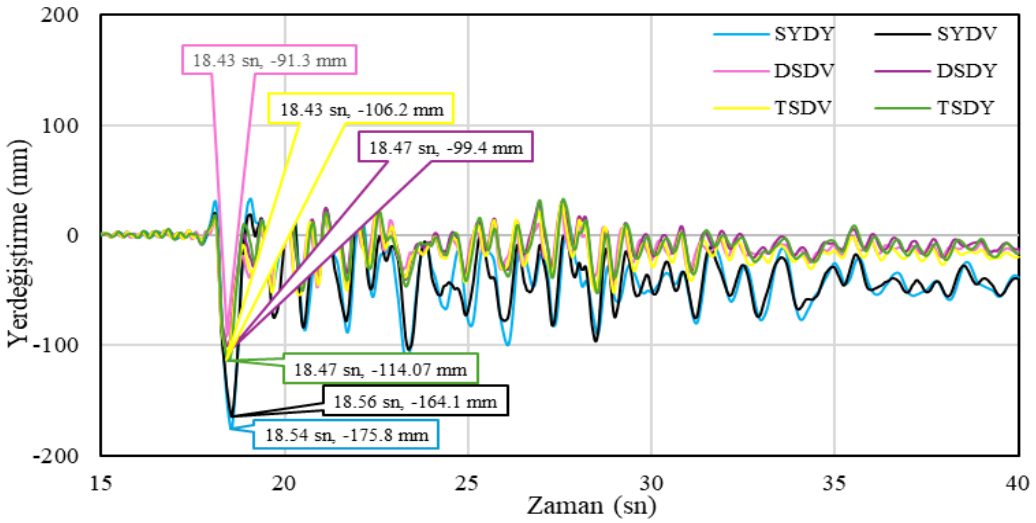
görülmektedir. Sadece sönümleyicilerin bulunduğu DSDY ve TSDY sistemlerinde düzlem içi en büyük yer değiştirmeler sırasıyla 94,8mm ve 109mm olurken duvarın eklenmesiyle her iki model de 105mm ve 119mm değerine çıkmaktadır. SYDY, DSDY ve TSDY modellerinde kalıcı yer değiştirmeler en düşük (~4mm) iken SYDV, DSDV ve TSDV sistemlerinde en büyük kalıcı deformasyon değerleri (~29mm) elde edilmiştir. Ayrıca, düzlem içine yerleştirilen (x yönü) değiştirilmiş toggle (TSDV) ve diyagonal sönümleyici (DSDV) sistemlerinin, dolgu duvarlı SYDV modeline göre en büyük yer değiştirmeleri yaklaşık %40-47 oranında azalttığı belirlenmiştir. Grafikten de görüldüğü üzere, ilave sönümleyici sistemlerin kullanımı, en büyük yer değiştirmelerin daha hızlı sönümlenmesini sağlamaktadır. Dolgu duvarsız (SYDY) modele göre, DSDV ve TSDV modelleri %24-30 oranında maksimum deplasmanı azaltmıştır. Ancak, sistemlerin deprem boyunca yer değiştirme davranışına bakıldığında bu kayıt için dolgu duvarın sistemin düzlem içi yer değiştirmelerini arttırdığı ortaya çıkarken, duvarın bulunmadığı sönümleyici modellerinde (DSDY ve TSDY) sönümleyicilerin etkinliğinin arttığı ve sistemin düzlem içi toplam yer değiştirmelerinin azaldığı anlaşılmaktadır (Şekil 4.10).



Şekil 4.10. Set-1 RSN778 deprem kaydı için x yönü yer değiştirme–zaman ilişkisi

Set-2 RSN3746 deprem yer hareketi etkisi altında incelenen altı farklı yapısal modelin x yönü yer değiştirme–zaman tepkileri karşılaştırmalı olarak Şekil 4.11'de değerlendirilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, en yüksek yer değiştirme değeri 175.8 mm ile dolgu duvarsız modelde (SYDY) meydana gelmiş olup, dolgu duvarının eklenmesiyle

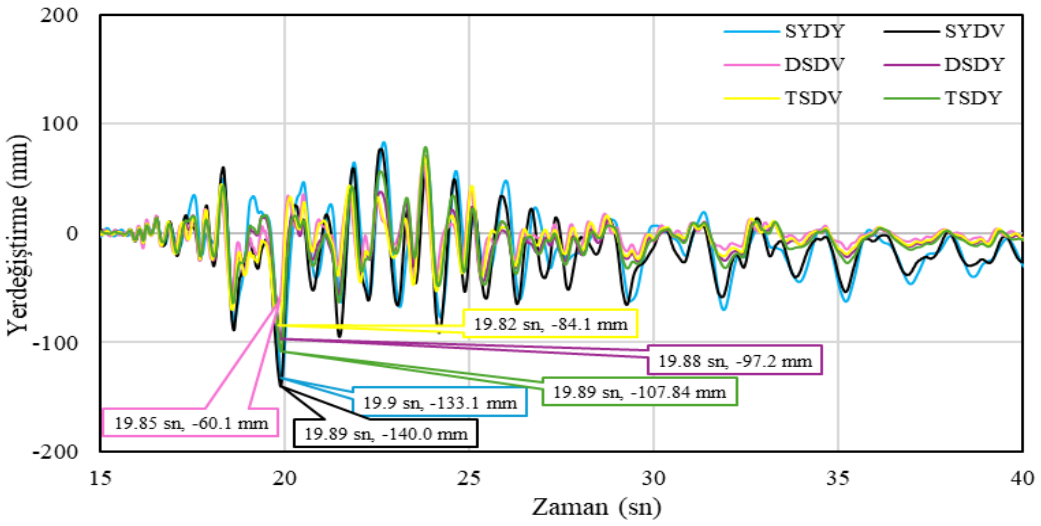
(SYDV) bu değer yaklaşık %6,6 oranında azalarak 164,1mm değerine düşmüştür. Bu durum dolgu duvarın düzlem içi davranışına etkisinin sınırlı düzeyde kaldığını göstermektedir. Duvarsız sönümleyici modeller DSDY ve TSDY dikkate alındığında en büyük yer değiştirmelerin sırasıyla 99mm ve 114mm değerine kadar azaldığı belirlenmiştir. Duvarla beraber sönümleyicilerin kullanılmasıyla, diyagonal sönümleyiciye sahip modelde (DSDV) en büyük yer değiştirme değeri 91,3 mm olarak kaydedilmiştir. Bu değerler, dolgu duvarsız (SYDY) ve dolgu duvarlı (SYDV) modellere kıyasla %44–48 aralığında daha düşük gerçekleşmiştir. Diğer yandan, değiştirilmiş toggle sönümleyiciye sahip modelde (TSDV) maksimum yer değiştirme 106.2 mm olup, bu değer dolgu duvarsız ve dolgu duvarlı modellere kıyasla %35–39 aralığında daha düşüktür. Ayrıca, grafikten de görüldüğü üzere, dolgu duvarsız (SYDY) ve dolgu duvarlı (SYDV) modellerde, sönümleyici kullanılan sistemlere (DSDV ve TSDV) kıyasla kalıcı plastik deplasman değerlerinin daha yüksek olduğu açıkça anlaşılmaktadır. Sönümleyici bulunan DSDV, DSDY, TSDV ve TSDY modellerde yer değiştirmeler birbirine yakın davranış sergilemektedir. Bu sonuçlar duvarın düzlem içi davranış üzerindeki etkisinin kısıtlı kaldığını göstermektedir.



Şekil 4.11. Set-2 RSN3746 deprem kaydı için x yönü yer değiştirme–zaman ilişkisi

Diğer setlere kıyasla daha düşük deprem tehlikesine sahip Set-3'te bulunan RSN1614 deprem kaydı yer değiştirme-zaman ilişkileri Şekil 4.12'de verilmiştir. Analiz sonuçlarına göre en yüksek yer değiştirme değeri 140 mm ile SYDV modelinde, en düşük

değer ise 60 mm ile DSDV modelinde gözlemlenmiştir. Bu kayıt için DSDV modelinde elde edilen bu düşük değer, SYDV ve SYDY modellerine kıyasla %54-57, TSDV modeline kıyasla ise %28 oranında daha az yer değiştirme anlamına gelmektedir. Sönümleyici bulunan modeller (DSDV, TSDV, DSDY ve TSDY) kıyaslandığında diyagonal sönümleyicilerin değiştirilmiş-toggle sönümleyicilere oranla yer değiştirmeleri azaltmada daha etkin davranış sergilediği görülmektedir. Değiştirilmiş toggle sönümleyici (TSDV) modeli, maksimum 84.1 mm yer değiştirme göstermiş olup, bu değer SYDY modeline kıyasla %36, SYDV modeline göre ise %40 oranında bir iyileşmeye karşılık gelmektedir. DSDV-DSDY ve TSDV-TSDY modelleri karşılaştırıldığında düzlem dışına yerleştirilen duvarın düzlem içindeki yer değiştirmeleri sırasıyla %62 ve %28 oranında arttırdığı görülmektedir. Her ne kadar en büyük yer değiştirmede farklılık olsa da RSN3746 davranışına benzer şekilde, RSN1614 kaydında da SYDY ve SYDV modellerinin yer değiştirme-zaman ilişkileri duvarın düzlem dışında etkin olmadığını gösterecek şekilde birbirine yakın seyretmektedir. Aynı davranış sönümleyici bulunan modellerde gözlenebilmektedir.

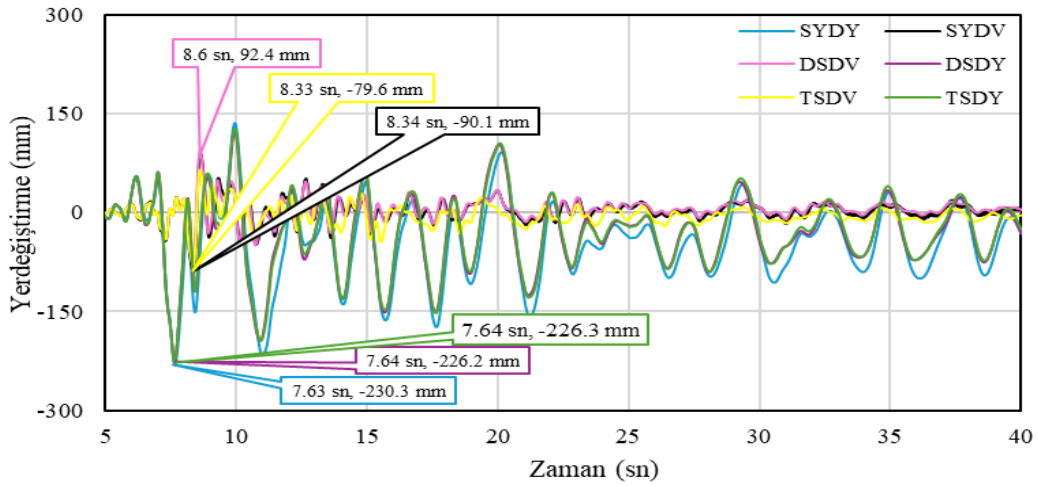


Şekil 4.12. Set-3 RSN1614 deprem kaydı için x yönü yer değiştirme–zaman ilişkisi

Sonuç olarak, düzlem içi davranış dikkate alındığında dolgu duvarlı (SYDV) sistemde, en yüksek yer değiştirme değeri RSN788 kaydında olup bu değer, RSN3746'e göre %18 artış göstermekte, RSN1614'e göre ise yer değiştirme miktarı %30 düşüşle 140 mm'ye inmiştir. Dolgu duvarsız (SYDY) sistemde Set-2'de en büyük yer değiştirme meydana

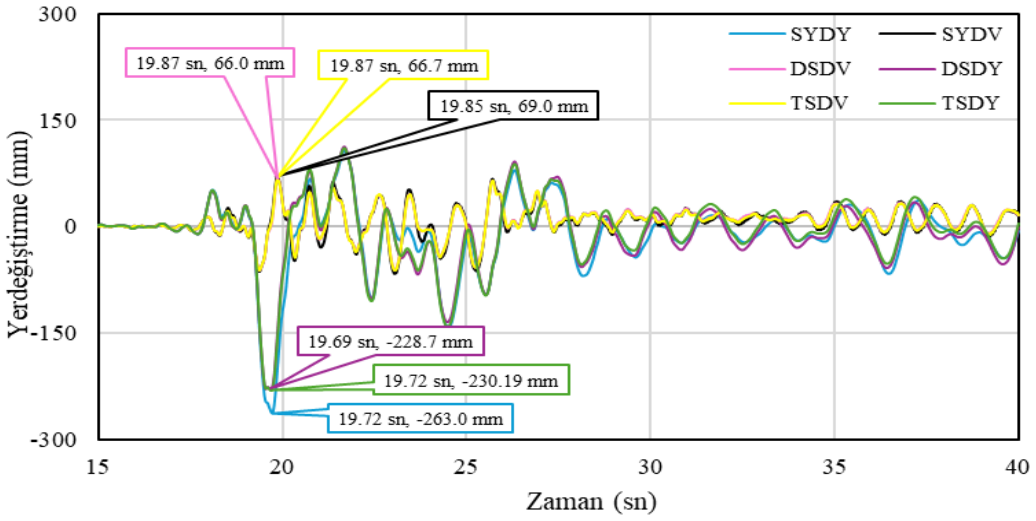
gelmiştir. Diyagonal sönümleyici (DSDV) kullanılan sistemde en büyük yer değiştirme değerinde RSN778'e göre RSN1614'da %75 gibi ciddi bir azalma meydana gelmiştir. Değiştirilmiş toggle sönümleyici (TSDV) sistemde, RSN778 kaydında en büyük yer değiştirme miktarı RSN1614'e göre %43 daha büyüktür. Bu durum, sönümleyicinin enerji sönümleme kapasitesinin görece düşük deprem tehlikesinde daha verimli çalıştığını göstermektedir. RSN778'deki DSDV ve TSDV modelleri hariç sönümleyici barındıran bütün modeller düzlem içinde yer değiştirmeleri azaltan yönde davranış sergilemiştir.

Öte yandan, y yönündeki yer değiştirme–zaman ilişkileri Şekil 4.13–4.15'te sunulmaktadır. Şekil 4.13'te, Set-1 için RSN778 deprem kaydı kullanılarak yukarıda bahsedilen altı farklı model için sonuçlar karşılaştırılmaktadır. Analiz sonuçlarına göre, en büyük yer değiştirme dolgu duvarsız sistemler olan SYDY, DSDY ve TSDY modellerinde 230 mm değerine ulaşmaktadır. Sadece duvarın sisteme eklenmesiyle kolon üst ucundaki en büyük yer değiştirme %60 oranında azalarak 79.6 mm değerine düşmektedir. Bu durum, dolgu duvarın düzlem dışı y yönünde eklenmesinin sistemin yer değiştirmesi üzerindeki olumlu etkisini açıkça ortaya koymaktadır. Sistemin deprem kaydı boyunca davranış incelendiğinde değiştirme tepkileri duvarlı modeller yakın davranış sergilerken duvarsız modeller ise daha büyük yer değiştirmeler yaparak benzer davranış göstermektedir. Bu sebeple dolgu duvarın yer değiştirmeleri azaltan en önemli etken olduğu ve sadece sönümleyici bulunan modellerin düzlem dışı davranış üzerinde etkisiz kaldığı ifade edilmelidir.



Şekil 4.13. Set-1 RSN778 deprem kaydı için y yönü yer değiştirme–zaman ilişkisi

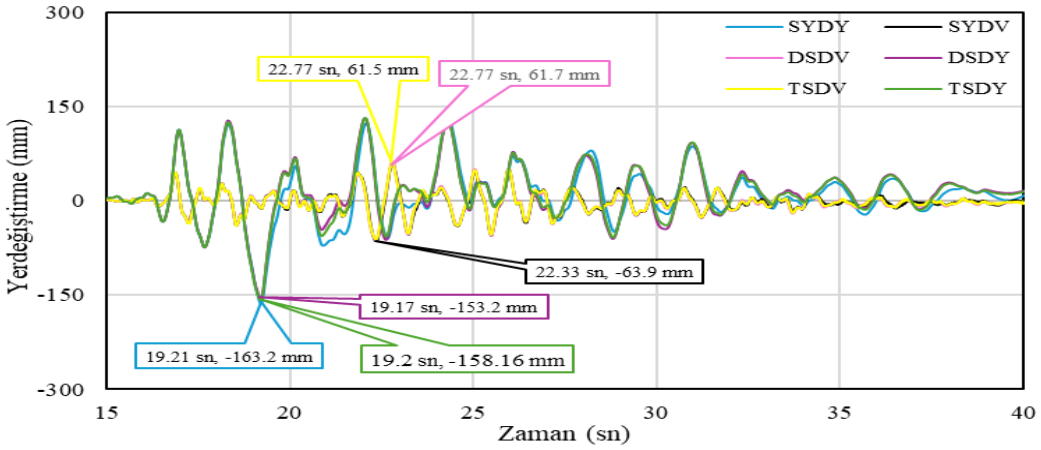
Set-2'ye ait RSN3746 deprem kaydı altında bütün modellerde kolon üst ucunda meydana gelen yer değiştirme-zaman tepkileri Şekil 4.14'te verilmektedir. Şekil detaylı bir şekilde incelendiğinde, y yönünde dolgu duvarsız modelin (SYDY) en büyük yer değiştirmesi 263 mm olarak gerçekleşmiş olup, bu değer RSN778 ve RSN1614'e kıyasla en yüksek yer değiştirme talebine karşılık gelmektedir. Buna karşın, dolgu duvarlı (SYDV), değiştirilmiş toggle (TSDV) ve diyagonal sönümleyici (DSDV) sistemlerinde bu değer yaklaşık 66 mm civarında olup, SYDY modeline kıyasla yaklaşık %75 oranında daha düşüktür. Ayrıca, SYDV, TSDV ve DSDV modelleri arasında yer değiştirme açısından kayda değer bir fark gözlenmemiştir. Sadece sönümleyicilerin kullanıldığı SYDY, DSDY ve TSDY modellerinde davranış birbirine yakın olmaktadır. Bu bağlamda dolgu duvarlar düzlem dışı yer değiştirme taleplerini azaltan en önemli eleman olduğu anlaşılmaktadır. Duvarla beraber sönümleyicinin kullanıldığı DSDV ve TSDV modellerinde sönümleyicilerin davranışı değiştirmediği, benzer şekilde sönümleyicinin olmadığı SYDV modelde de davranışın değişmediği gözlenmektedir.



Şekil 4.14. Set-2 RSN3746 deprem kaydı için y yönü yer değiştirme–zaman ilişkisi

Diğer setlere kıyasla daha düşük deprem tehlikesine sahip Set-3'te bulunan RSN1614 deprem kaydı yer değiştirme-zaman ilişkileri Şekil 4.15'te verilmiştir. Şekil 4.15 incelendiğinde, düşük deprem tehlikesini temsil eden deprem kaydı altında dolgu duvarsız modelin (SYDY) en büyük yer değiştirme 163 mm olarak gerçekleşmiştir. Duvarlı SYDV, TSDV ve DSDV modellerinde bu değer %62'e yakın bir oranda azalarak

61.5 mm değerlerine kadar inmiştir. Davranışı etkileyen en önemli husus, sönümleyicinin varlığına veya türüne bakılmaksızın, dolgu duvarın varlığıdır. Bu sonuç, düzlem dışı y yönünde dolgu duvarların sistemin ötelenme davranışını kontrol ettiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.15. Set-3 RSN1614 deprem kaydı için y yönü yer değiştirme–zaman ilişkisi

Sonuç olarak, y yönündeki yer değiştirme–zaman tepkileri karşılaştırıldığında, en yüksek yer değiştirmelerin yüksek deprem tehlikesini temsil eden Set-1'de değil Set-2 altındaki kayıtlarda, en düşük yer değiştirmelerin ise düşük deprem tehlikesini temsil eden Set-3 altında meydana geldiği görülmektedir. Dolgu duvarsız modelde (SYDY) maksimum yer değiştirme değerleri Set-1 ve Set-2 için yaklaşık 230−263 mm, Set-3 için ise 163 mm olarak kaydedilmiş olup, bu durum Set-3'teki kayıtta yer değiştirme taleplerinin yaklaşık %30-38 oranında daha az olduğunu göstermektedir. Dolgu duvarlı (SYDV), değiştirilmiş toggle (TSDV) ve diyagonal sönümleyici (DSDV) sistemlerinde ise bu değerler tüm setlerde SYDY modeline kıyasla yer değiştirme taleplerinde %60–75 düzeyinde bir azalma sağlanmıştır. Bu sonuçlar düzlem dışı davranışı belirleyen unsurun dolgu duvarlar olduğunu göstermektedir.

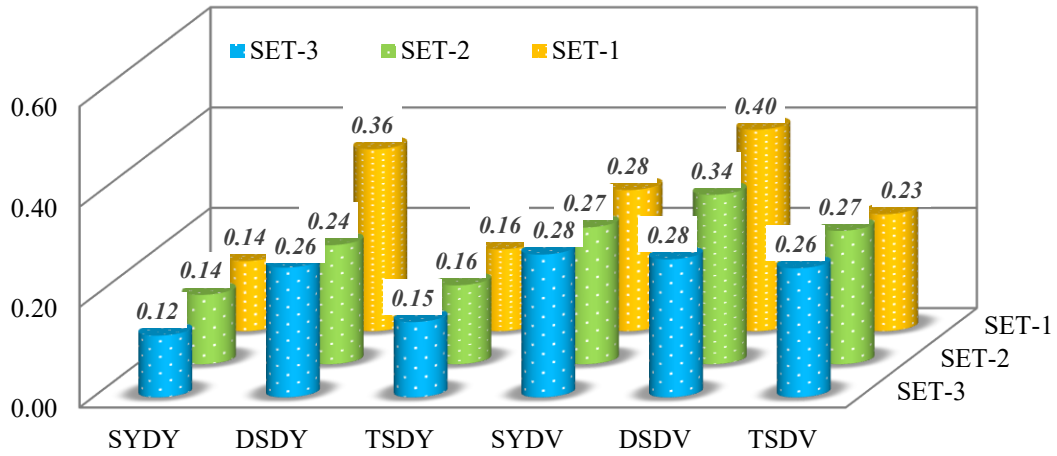
BPS yapısının göreli kat ötelemesi açısından bakıldığında hem düzlem içi hem de düzlem dışı sismik yükler altındaki davranışı açıklayan iki farklı davranış ön plana çıkmaktadır. Düzlem içinde kolonlardaki yer değiştirmeleri azaltmada sönümleyiciler davranış üzerinde etkin rol alırken düzlem dışında dolgu duvarlar davranışta hakim olmaktadır. Bu açıdan bakıldığında düzlem içinde sönümleyiciler düzlem dışında ise duvarlar yapının

sismik performansı üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Burada vurgulanması gereken bir husus ta en büyük yer değiştirmenin her zaman deprem tehlikesi yüksek olan kayıtta meydana gelmeyeceğidir.

4.4. Guse-çatı makası T/K oranlarının değerlendirilmesi

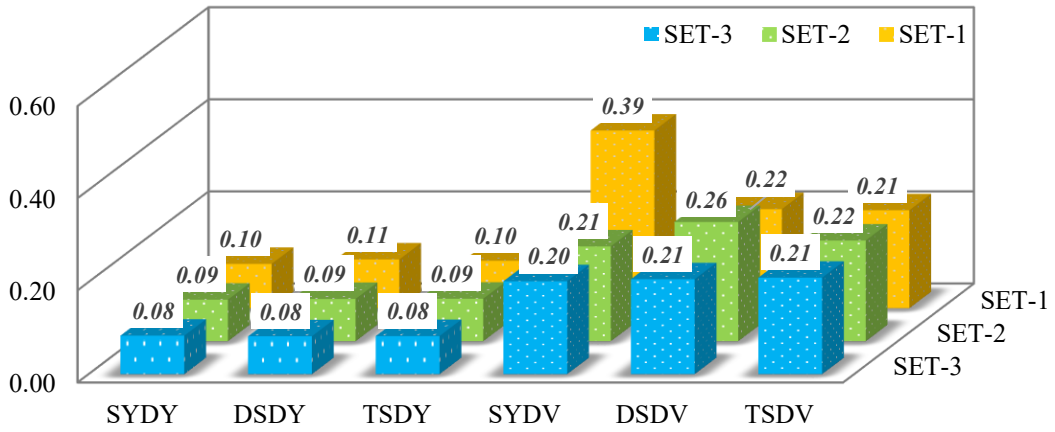
Kesme kuvvet–deplasman ilişkilerinde gevrek davranışın ortaya çıkması, sonuçların standart sapmasını artırmaktadır. Bu nedenle elde edilen sonuçların daha gerçekçi ve güvenilir şekilde temsil edilebilmesi amacıyla T/K ortalamasına iki standart sapma (2σ) eklenmiştir. Bu yaklaşım, davranıştaki belirsizlikler ve ani göçme olasılığını istatistiksel olarak dikkate alarak yapılan 11 analizden yaklaşık %90'ınından fazlasını kapsanmasını sağlamaktadır. Dolayısıyla, kritik kesme davranışında ortaya çıkabilecek göçmelerin değerlendirmeye yansıtılması amacıyla hem düzlem içi hem de düzlem dışı kesme deplasman değerleri için bu yöntem karşılaştırmalarda tercih edilmiştir.

Guse-çatı makası düzlem içi ve düzlem dışı ortalama kesme deplasmanı T/K oranları sırasıyla Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'de gösterilmektedir. Grafikler birlikte değerlendirildiğinde, guse-çatı makası bağlantısında oluşan düzlem içi (x) ve düzlem dışı (y) kesme deplasmanlarına ait T/K oranlarının, genel olarak göçmenin önlenmesi performans seviyesine karşılık gelen değerin altında kaldığı görülmektedir.



Şekil 4.16. Guse-çatı makası düzlem içi ortalama kesme deplasmanı T/K oranları

Öte yandan Şekil 4.17'de guse-çatı makası düzlem dışı ortalama T/K oranları sunulmaktadır. Şekilde gösterildiği üzere düzlem dışında dolgu duvarın modellerde dikkate alınması talepleri önemli oranda arttırırken sönümleyicilerin eklenmesi beklendiği üzere talepte kayda değer bir değişikliğe sebep olmamaktadır. Bunun sebebi ise sönümleyicilerin düzlem içi doğrultusuna yerleştirilmiş olmasıdır. Dolgu duvarın eklenmesi talepleri arttırırken hem düzlem içi hem de düzlem dışı T/K oranlarının kapasitenin üzerine çıkmadığı görülmektedir.



Şekil 4.17. Guse-çatı makası düzlem dışı ortalama kesme deplasmanı T/K oranları

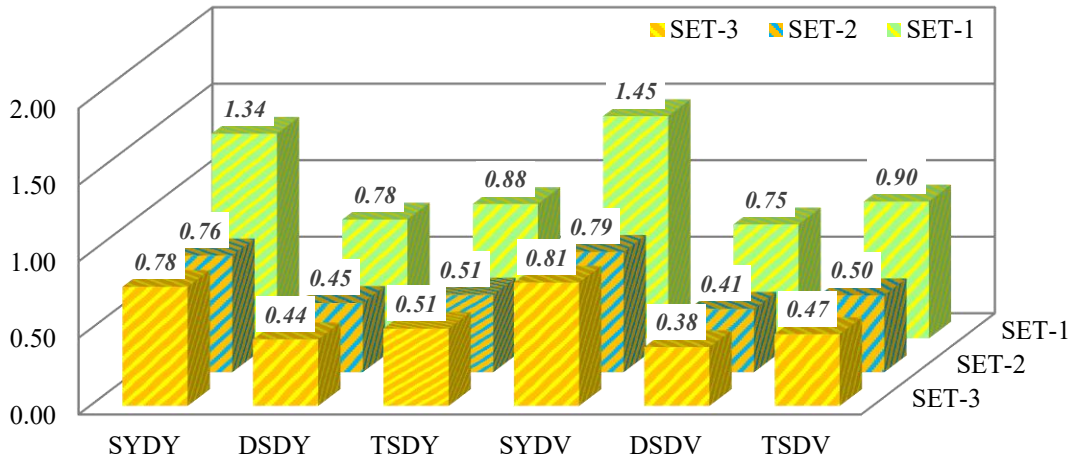
Guse-çatı makası düzlem içi ve düzlem dışı her bir set için elde edilen sonuçların ortalama dönme T/K oranları sırasıyla Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'da gösterilmektedir. Düzlem içi dönme açısından değerlendirildiğinde, Şekil 4.18'de de görüldüğü üzere Set-1 senaryosu için SYDY ve SYDV modellerinde talepler kapasitelerinin sırasıyla %34 ve %45 oranında üzerine çıkmıştır. Bununla birlikte, özellikle sönümleyici sistemlerin, düzlem içi dönmeleri etkili bir şekilde azalttığı da açıkça görülmektedir. Bu azalımlar diyagonal sönümleyicilerde DSDY ve DSDV modeller için sırasıyla ortalama %40 ve %50 civarında iken değiştirilmiş toggle sönümleyicilerde TSDY ve TSDV modellerinde ortalama %35 ve %40 civarındadır. Sönümleyici bulunan modeller kıyaslandığında diyagonal sönümleyicilerin değiştirilmiş-toggle sönümleyicilere oranla düzlem içi dönmeleri %10-15 oranında daha fazla azalttığı görülmektedir. Düzlem dışına

yerleştirilen dolgu duvarın düzlem içi dönmeleri %4 ila %8 oranında arttırdığı ifade edilmelidir.

Guse-çatı makası düzlem dışı dönme (R2) T/K oranlarının değerlendirilmesinde, DSDV, SYDV ve TSDV modellerine ait RSN778 deprem kaydı, diğer kayıtlara kıyasla oldukça yüksek değerler (11–12.25 rad) ürettiğinden analiz dışında bırakılmıştır. Örneğin, DSDV modelinde Set 1 için R2 değerleri genellikle 0.9–2.5 rad aralığındayken, RSN778 kaydı bu sınırı aşarak 11–12.25 rad olarak hesaplanmıştır. Bu aşırı dönme değerlerinin, analizde nümerik hatadan kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu sebeple ilgili deprem kayıtları guse–çatı makası düzlem dışı dönme ortalama T/K oranlarında hesaplamaya dahil edilmemiştir.

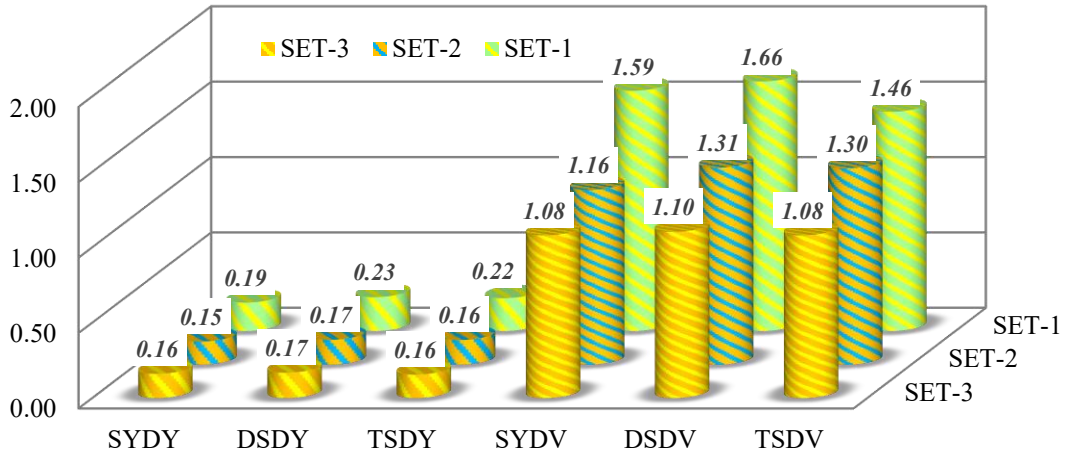
Şekil 4.19 incelendiğinde, guse-çatı makası bağlantısında oluşan düzlem dışı dönmeye (R2) ait ortalama T/K oranlarının, tüm setlerde dolgu duvarsız modeller hariç tüm modellerde birim değerin üzerinde gerçekleştiği görülmektedir. En yüksek ortalama T/K oranı, 1.66 ile DSDV modelinde elde edilmiştir. Bu durum, dolgu duvarın sistemde düzlem dışı dönme talebini artırarak kapasitesinin üzerine çıkardığına işaret etmektedir. Ayrıca, dolgu duvarlı modellere diyagonal sönümleyici eklenmesiyle bu talebin %4 ila %11 oranında daha da arttığı gözlemlenmektedir. Deprem tehlikesinin yüksek olduğu Set-1 senaryosunda ise, değiştirilmiş toggle (TSDV) modelinin DSDV modeline kıyasla düzlem dışı dönmeyi yaklaşık %12 oranında azalttığı belirlenmiştir.

Sonuç olarak, dolgu duvar ve diyagonal sönümleyici yerleşiminin düzlem dışı dönme taleplerini artırıcı etkisi net olarak gözlemlenmekte; özellikle Set-1'de bu etkinin 6 ila 9 katına kadar çıkabildiği, değiştirilmiş toggle uygulamasının ise referans modele kıyasla sistemin zorlanmasını %80 oranında artırdığı anlaşılmaktadır.



Şekil 4.18. Guse-çatı makası düzlem içi dönme ortalama T/K oranları

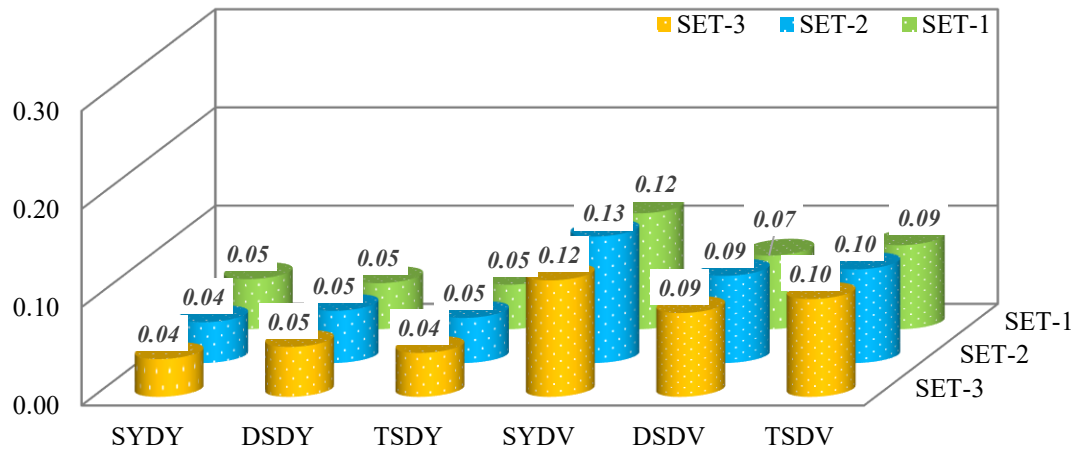
Bu veriler ışığında guse-çatı makası düzlem içi ve düzlem dışı dönme davranışı açısından bakıldığında düzlem içi dönmeler kritik olmamakla beraber deprem tehlikesinin yüksek olduğu durumlarda göçmeye sebebiyet verebilecek kadar zorlanmaktayken düzlem dışında dönmeler bütün setlerde dolgu duvarlı modellerde talepler kapasitenin üzerinde kalarak sistemin göçmesine yol açan en kritik parametre olarak karşımıza çıkmaktadır.



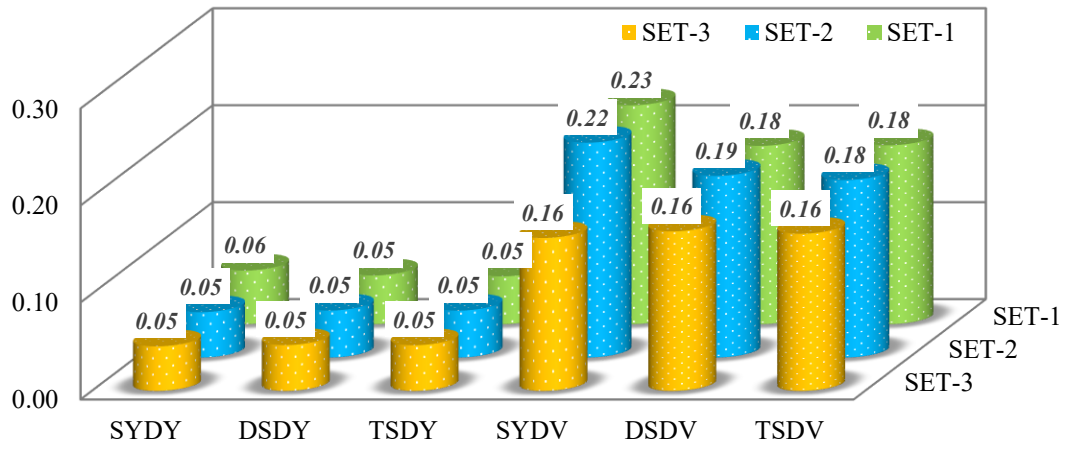
Şekil 4.19. Guse-çatı makası düzlem dışı dönme ortalama T/K oranları

4.5. Aşık-çatı makası T/K oranlarının değerlendirilmesi

Aşık-çatı makası x ve y yönündeki ortalama kesme deplasmanı T/K oranları sırasıyla Şekil 4.20 ve Şekil 4.21'de verilmektedir. Şekiller birlikte incelendiğinde, x ve y yönündeki kesme deplasmanlarında tüm modeller ve tüm setler için T/K oranlarının 1'in oldukça altında olduğu ve aşık-çatı makas bağlantısının çok zorlanmadığı anlaşılmaktadır. Bu durum, aşık-çatı makası bağlantısının, iç kuvvetler açısından yapısal bütünlüğünü koruduğunu göstermektedir. Aşık-çatı makası y yönündeki kesme deplasmanı T/K oranlarının değerlendirilmesinde, SYDV modeline ait RSN778 deprem kaydı, diğer kayıtlara kıyasla oldukça yüksek değer (41.8 mm) ürettiğinden analiz dışında bırakılmıştır. Örneğin, SYDV modelinde Set 1 için U2 değerleri genellikle 3–7 mm aralığındadır. Buna ek olarak, dolgu duvarların hem x hem y yönündeki aşık kesme deplasman taleplerini 3-5 katına kadar arttırdığını vurgulamak gerekir. Duvarlı ve duvarsız kullanılan sönümleyici sistemlerde diyagonal ve değiştirilmiş toggle sönümleyiciler sistemde x ve y yönündeki kesme deplasmanı taleplerinde önemli bir değişikliğe sebep olmamıştır.



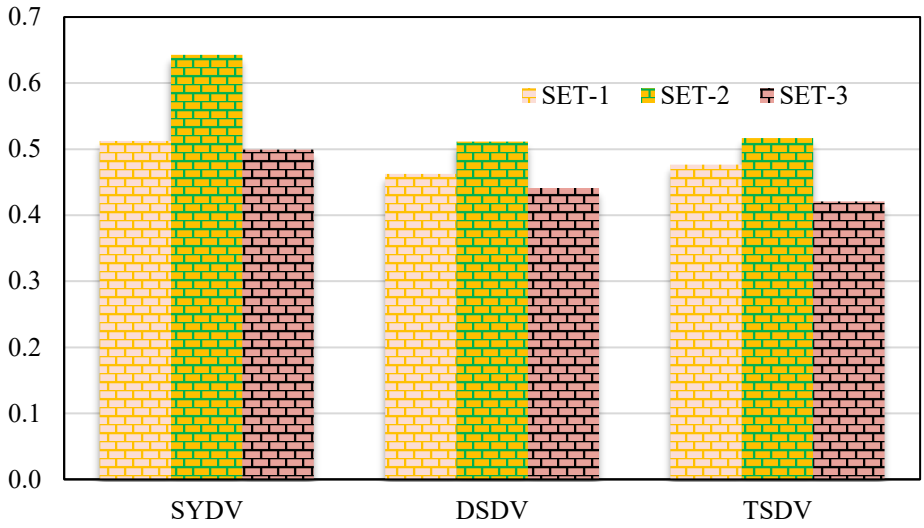
Şekil 4.20. Aşık-çatı makası x yönü kesme deplasmanı ortalama T/K oranları



Şekil 4.21. Aşık-çatı makası y yönü kesme deplasmanı ortalama T/K oranları

4.6. Dolgu duvar T/K oranlarının değerlendirilmesi

Daha önce belirtildiği üzere dolgu duvarlar eşdeğer basınç çubuğu olarak modellenmiş ve yalnızca basınç etkisi altındaki davranış dikkate alınarak modellenmiştir. Bu kapsamda, göçme öncesi performans seviyesi için ortalama T/K oranları deplasmanlara göre elde edilmiştir. Bu duruma ilişkin bulgular, Şekil 4.22'de sunulmaktadır. Şekilde görüldüğü üzere, tüm modellerde ve tüm setlerde elde edilen duvar deplasmanına dayalı T/K oranları, birim değerin altında kalmıştır. Set-2'de, SYDV modelinin dolgu duvarın ortalama T/K değerlerinin DSDV ve TSDV modellerine kıyasla yaklaşık %20 daha yüksek olduğu görülmektedir. Diğer setlerde ise sönümleyicilerin eklenmesiyle duvarın T/K oranında azalma yaşanmaktadır. Bütün setlerde diyagonal modelde duvarda değiştirilmiş-toggle sisteme nazaran daha büyük talepler oluşmaktadır.



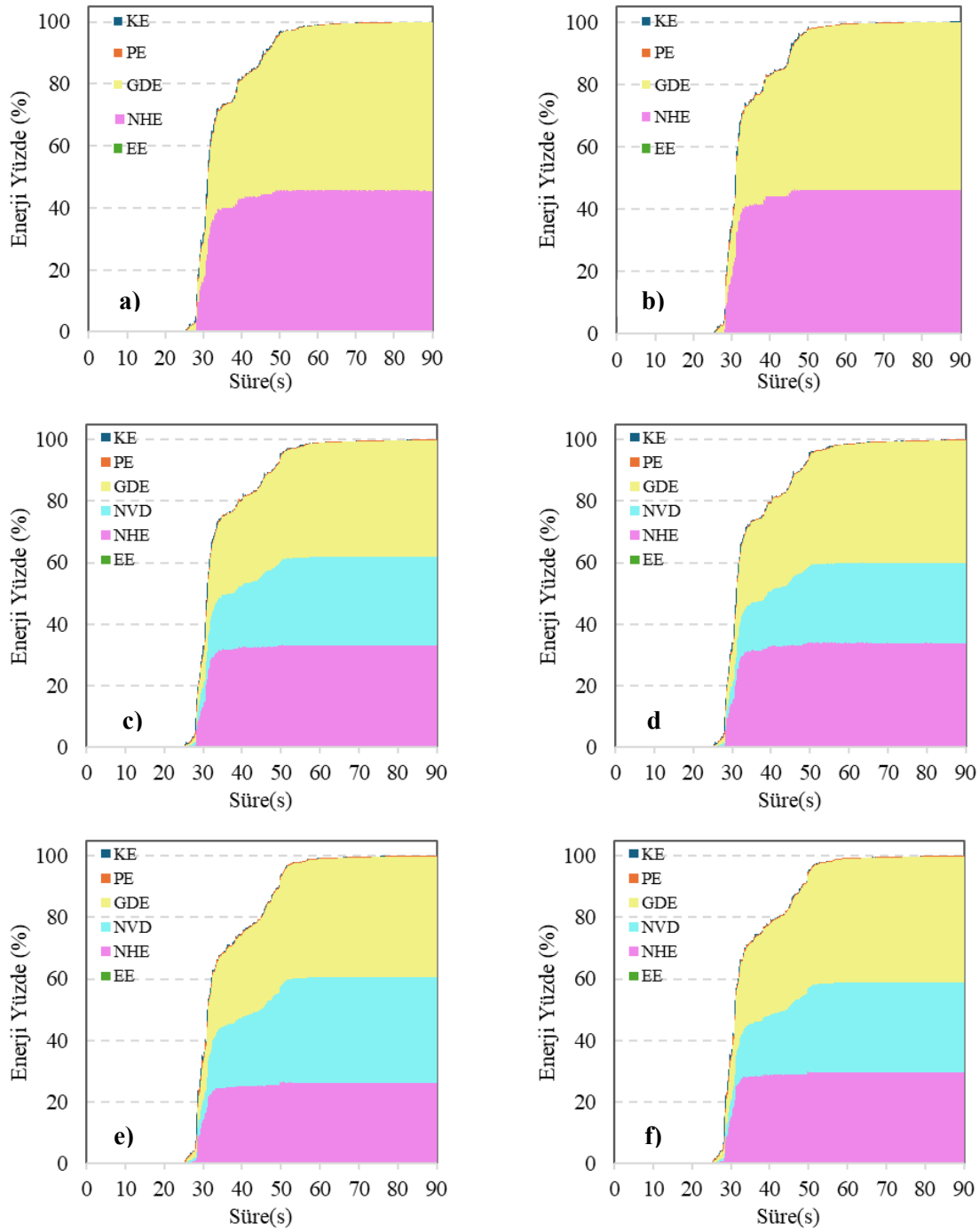
Şekil 4.22. Dolgu duvar ortalama T/K oranları

4.7. Enerji grafiklerinin değerlendirilmesi

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen her bir analiz sonucunda hesaplanan enerji grafikleri sisteme giren deprem enerjisinin hangi bileşenler tarafından sönümlendiğini ve/veya depolandığını anlamak için değerlendirilmektedir. Bu tür veriler, gerçekleştirilen analizlerin sayısal doğruluğu ve güvenilirliği açısından da önemli bir gösterge niteliğindedir. Elde edilen sonuçların fiziksel beklentilerle uyumlu olması, sayısal modellemenin yeterliliğini ve hesaplama sürecindeki tutarlılığı ortaya koymaktadır. Özellikle enerji hatası sayısal modelin geçerliliğini gösteren önemli bir parametredir. Yapısal elemanlar tarafından sönümlenen enerjinin kümülatif yüzdesine ilişkin kapsamlı veriler bileşenlere göre orantısal olarak hesaplanmaktadır. Bu bileşenler kinetik enerji (KE), potansiyel enerji (PE), global sönümleme enerjisi (GDE), doğrusal olmayan viskoz sönümleyici enerjisi (NVD), doğrusal olmayan histeretik enerji (NHE) ve enerji hatası (EE) şeklinde ifade edilebilir. GDE modellerde tanımlanan %5 modal sönüm sistem tarafından tüketilen enerjiyi tanımlarken NHE yapısal elemanların doğrusal olmayan davranışından kaynaklı tüketilen enerjiyi temsil etmektedir.

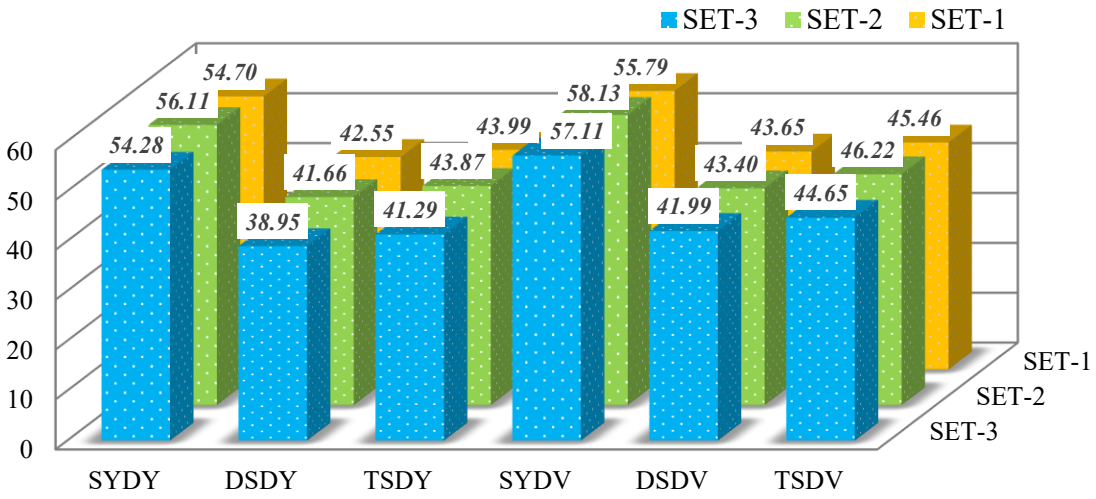
Aşağıda Şekil 4.23'te deprem tehlikesi en yüksek olan Set-1 RSN1504 depremi sonucunda elde edilen enerji grafikleri her bir model için karşılaştırmalı olarak verilmektedir. Bu eğrileri daha etkin bir şekilde açıklayabilmek için 6 farklı model ve 3

farklı setten elde edilen ortalama enerji verileri ve tükettikleri sönüm oranları hesaplanmıştır. Yapısal sönüm oranları %5 kabul edilerek söz konusu karşılaştırmalar yapılmaktadır.



Şekil 4.23. Set-1 RSN1504 deprem kaydı için enerji grafikleri a) SYDY b) SYDV c) DSDY d) TSDY e) DSDV f) TSDV

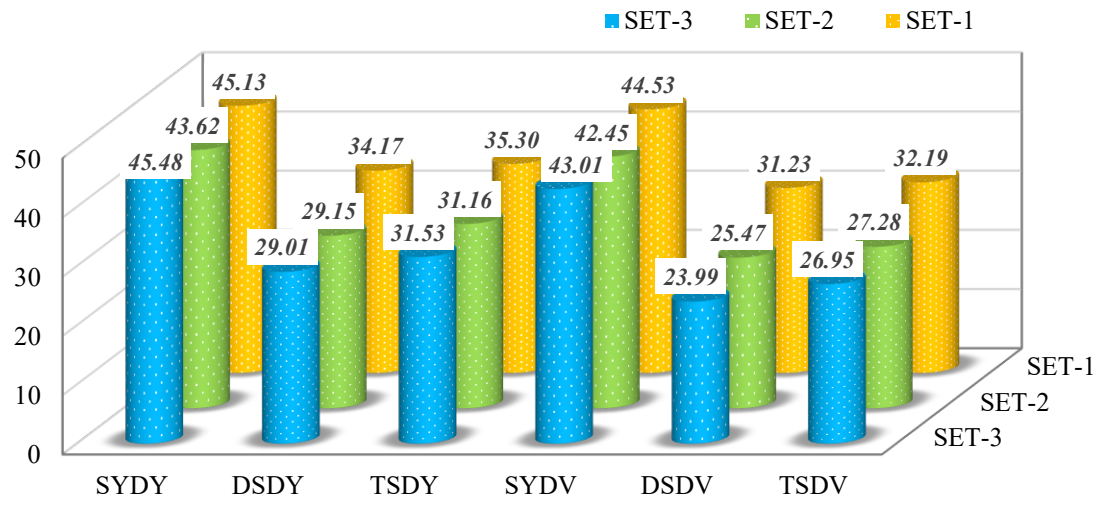
Yukarı açıklandığı üzere 6 farklı model ve 3 farklı setten elde edilen ortalama GDE değerleri Şekil 4.24'te verilmektedir. Sisteme eklenen sabit sönümü temsil eden ortalama GDE değerleri incelendiğinde, sönümleyici bulunmayan sistemlerde tüm setler için tüketilen toplam enerjinin %50'nin üzerine çıktığı belirlenmiştir. Sadece sönümleyicinin bulunduğu modellerde (DSDY ve TSDY) sönümleyici toplam enerjinin yaklaşık %40'ını sönümlerken referans SYDY modeline göre %30 daha fazla enerji tükettiği görülmektedir. Buna karşılık, değiştirilmiş-toggle (TSDY ve TSDV) ve diyagonal sönümleyici (DSDY ve DSDV) sistemlerin eklenmesiyle tüm setlerde duvarsız (SYDY) ve duvarlı (SYDV) modellere kıyasla GDE tarafından tüketilen enerjinin %20–30 oranında azaldığı görülmektedir.



Şekil 4.24. Global sönüm enerjisi (GDE) ortalama enerji değerleri (%)

Şekil 4.25'te, yapısal elemanların doğrusal olmayan davranışından kaynaklanan enerjiyi temsil eden ortalama NHE değerleri sunulmaktadır. Duvarın ve sönümleyicinin bulunmadığı durumda (SYDY), NHE tarafından tüketilen enerjinin, toplam tüketilen enerjinin yarısından daha az olduğu (~%45) gözlemlenmektedir. Sadece sönümleyicinin eklenmesiyle (DSDY ve TSDY) NHE tarafından sönümlenen enerjinin referans modele göre Set-1'de %20, Set-2 ve Set-3'te %30'dan fazla azaldığı gözlenmiştir. Sadece duvarın modelde dikkate alınmasıyla (SYDV), doğrusal olmayan davranışla tüketilen enerjinin yaklaşık %0-6 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Bu azalma dolgu duvarın yapısal

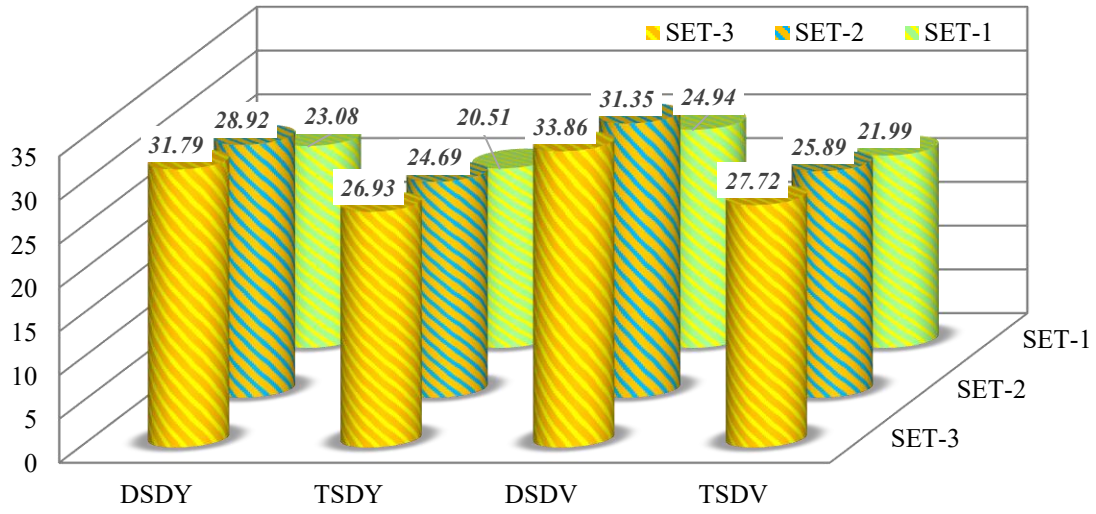
elemanlardaki iç kuvvetleri sınırlı oranda azalttığına işaret etmektedir. Duvarla beraber sönümleyicilerin kullanılması durumunda ise (DSDV ve TSDV), düşük deprem tehlikesini temsil eden Set 3'te doğrusal olmayan enerji tüketiminin %40 oranında azaldığı, yüksek deprem tehlikesi için ise bu oranın %30'lara düştüğü belirlenmiştir. Konfigürasyonlar açısından, elastik ötesi davranışın azaltılmasını işaret eden bu enerji tüketim mekanizmasındaki azalmanın, diyagonal yerleşim için daha etkili olduğu görülmekle birlikte, artan deprem tehlikesi ile bu farkın azalarak %2 mertebesine kadar düştüğü gözlemlenmiştir. Set 3 için bu oran %10 mertebesinde elde edilmiştir. Yukarıda yapılan karşılaştırmalar dikkate alındığında, göreli olarak daha düşük deprem tehlikesini temsil eden Set-2 ve Set-3 için kapasitelerin göçme sınırının altında olduğu unutulmamalıdır. Bu nedenle, efektif sönümleme mekanizması açısından kritik düzeyde deprem tehlikesi söz konusu olduğunda, değiştirilmiş-toggle sönümleyicilerin bulunduğu sistemler (TSDV) ile diyagonal sönümleyicilerin yerleştirildiği sistemler (DSDV) arasında bu bağlamda anlamlı bir farktan bahsetmek mümkün değildir.



Şekil 4.25. Doğrusal olmayan histeretik enerji (NHE) ortalama enerji değerleri (%)

Şekil 4.26'da, değiştirilmiş toggle sönümleyici (TSDV) ve diyagonal sönümleyici (DSDV) sistemlerinin, farklı deprem yer hareketlerini temsil eden Set-1, Set-2 ve Set-3 altında sönümledikleri enerji değerleri karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Yukarıda da belirtildiği üzere, GDE dikkate alındığında, yapıya eklenen sıvı viskoz sönümleyiciler, toplam global enerjinin yaklaşık %20–30'unu sönümlemektedir. Şekil 4.26

incelendiğinde, yüksek deprem tehlikesi içeren Set-1 için, hem değiştirilmiş toggle sönümleyici hem de diyagonal sönümleyici sistemlerin diğer setlere kıyasla daha az enerji sönümlediği görülmektedir. Özellikle Set-1'e ait NVD değerleri, Set-3'e göre yaklaşık %20–25, Set-2'ye göre ise yaklaşık %15–20 oranında daha düşük gerçekleşmiştir. Bulgular, tüm setlerde diyagonal sönümleyici (DSDY ve DSDV) sistemlerinin değiştirilmiş toggle sönümleyici (TSDY ve TSDV) sistemlerine kıyasla daha yüksek enerji sönümlediğini göstermektedir. DSDY sistemi, TSDY sistemine göre Set-2 ve Set-3'te yaklaşık %20, Set-1'de ise yaklaşık %15 oranında daha fazla enerji sönümlemiştir. DSDV sistemi, TSDV sistemine göre Set-1'de yaklaşık %10, Set-2'de yaklaşık %16 ve Set-3'te yaklaşık %18 oranında daha fazla enerji sönümlemiştir. Duvarsız ve duvarlı modeller karşılaştırıldığında duvarlı modellerin (DSDV ve TSDV) sönümleyici etkinliğini arttırdığı anlaşılmaktadır. Bu artış diyagonal modellerde ortalama %8 civarındayken değiştirilmiş-toggle modellerde ise %3-4 arasında kalmaktadır. Sönümleyicilerin tükettiği enerji toplam enerjinin %22 ila %34'ü arasında kalmaktadır.



Şekil 4.26. Doğrusal olmayan viskoz sönüm (NVD) ortalama enerji değerleri (%)

Değiştirilmiş toggle sönümleyici (TSDV) ve diyagonal sönümleyici (DSDV) sistemlerinin ürettiği sönüm oranı, her set için Denklem (4.1)'de gösterildiği şekilde, doğrusal olmayan viskoz sönüm (NVD) ile global sönüm enerjisi (GDE) değerlerinin ortalamaları dikkate alınarak hesaplanmıştır. Yapısal sönüm oranı, Bölüm 3.2.6'da

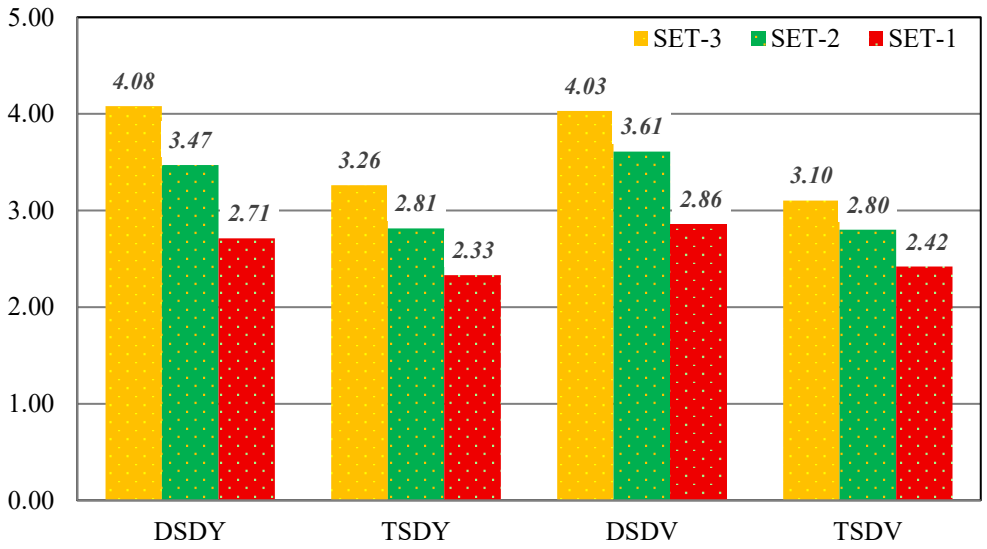
belirtildiği üzere %5 olarak kabul edilmiştir. Buna göre etkin sönüm oranı (ξ) aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir:

$$\xi = \frac{NVD_{ortalama}}{GDE_{ortalama}} \times 5\% \tag{4.1}$$

Şekil 4.27'de, değiştirilmiş toggle sönümleyici (TSDV) ve diyagonal sönümleyici (DSDV) sistemlerine ait, çeşitli deprem kayıtlarından oluşan Set-1, Set-2 ve Set-3 için Denklem (4.1) ile hesaplanan ortalama sönüm oranları sunulmaktadır. Grafik incelendiğinde, tüm setler için diyagonal sönümleyici (DSDV) sistemi değiştirilmiş-toggle sönümleyici (TSDV) sistemine kıyasla daha yüksek enerji sönümlediği görülmektedir. Düşük deprem tehlikesini temsil eden Set-3 koşullarında, bütün modeller için en yüksek enerji sönümleme oranları elde edilmiştir. Bu koşullarda, DSDY ve DSDV sistemi %4.08 ve %4.03, TSDY ve TSDV sistemi ise %3.26 ve %3.10 oranında sönüm oranına sahiptir. Buna göre, DSDY modeli TSDY modeline göre Set-2 ve Set-3'te %23, Set-1'de ise %16 daha fazla sönüm üretmiştir. Benzer şekilde DSDV sistemi, TSDV sistemine kıyasla yaklaşık %16-18 arasında daha yüksek bir sönümleme oranı sağlamaktadır. Ayrıca setler arası karşılaştırmalar incelendiğinde, DSDY sisteminin enerji sönümleme oranının Set-1'e göre Set-2'de yaklaşık %28 (2.71'den 3.47'ye), Set-3'te ise yaklaşık %51 (2.71'den 4.08'e) ve DSDV sisteminin enerji sönümleme oranının Set-1'e göre Set-2'de yaklaşık %26 (2.86'dan 3.61'e) ve Set-3'te yaklaşık %41 (2.86'dan 4.03'e) oranında arttığı görülmektedir. Benzer şekilde, TSDV sisteminde ise bu artışın Set-1'e kıyasla Set-2'de yaklaşık %16 (2.42'den 2.80'e) ve Set-3'te yaklaşık %28 (2.42'den 3.10'a) seviyesinde olduğu belirlenmiştir.

Diğer yandan, dolgu duvarsız modeller (DSDY ve TSDY) karşılaştırıldığında, diyagonal sönümleyici kullanılan DSDY sisteminin değiştirilmiş toggle sönümleyici kullanılan TSDY sistemine göre tüm setlerde daha yüksek sönümleme oranına sahip olduğu görülmektedir. Set 3 koşullarında DSDY sistemi %4.08, TSDY sistemi ise %3.26 oranında sönümleme kapasitesi göstermektedir. Bu durumda DSDY sistemi TSDY sistemine göre yaklaşık %25 daha yüksek sönüm sağlamaktadır. Benzer şekilde, Set 1 ve Set 2 koşullarında bu fark sırasıyla yaklaşık %16 (2.71'e karşı 2.33) ve %23 (3.47'ye karşı 2.81) düzeyindedir. Setler arası karşılaştırmalar incelendiğinde, DSDY sisteminin

enerji sönümleme oranının Set-1'e göre Set-2'de yaklaşık %28 (2.71'den 3.47'ye) ve Set-3'te yaklaşık %51 (2.71'den 4.08'e) oranında arttığı görülmektedir. TSDY sisteminde ise bu artışın Set-1'e kıyasla Set-2'de yaklaşık %21 (2.33'ten 2.81'e) ve Set-3'te yaklaşık %40 (2.33'ten 3.26'ya) seviyesinde olduğu belirlenmiştir. Duvarın bulunduğu diyagonal model (DSDV), duvarsız modele göre (DSDY) yaklaşık %2-6 arasında daha fazla sönüm üretmiştir. Tam tersine, değiştirilmiş-toggle sönümleyici durumunda ise duvarsız TSDY modeli, TSDV modeline göre Set-2'de yaklaşık aynı, Set-3'te %5 daha fazla sönüm üretirken Set-1'de ise %4 daha az sönüm üretmiştir.

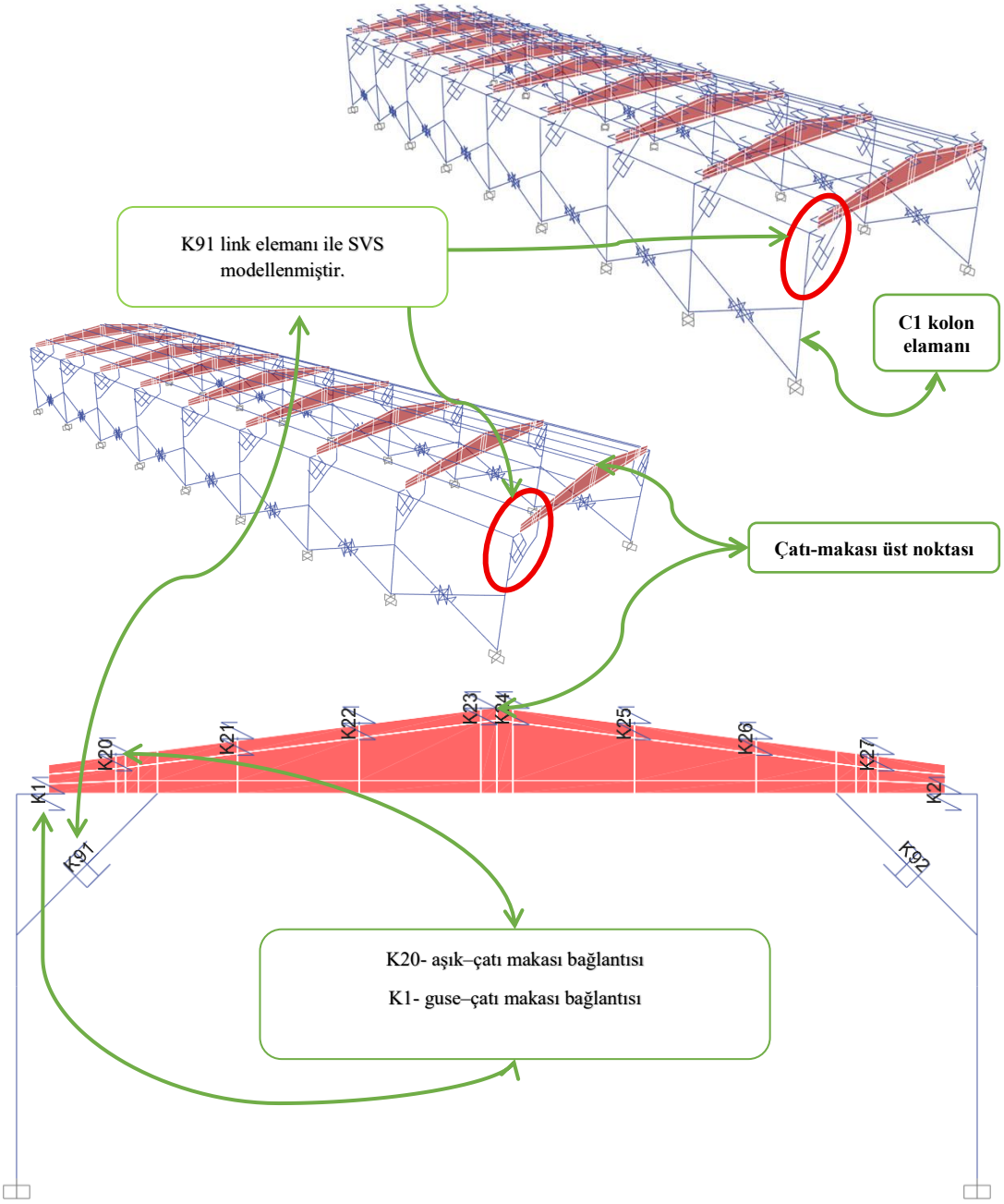


Şekil 4.27. Doğrusal olmayan NVD kaynaklı sönüm oranı (%)

4.8. Sıvı Viskoz Sönümleyicilerin kuvvet-deplasman ilişkileri

Sıvı viskoz sönümleyicilerin (SVS) yapısal sistem içerisinde yerleşimleri Şekil 4.28'de sunulmaktadır. Söz konusu SVS'lerin tasarımları itibari ile belirli kapasitelerinin olduğu ve yükleme koşullarında belirli stroke sınırları içerisinde üretim spesifikasyonlarına bağlı olarak performans gösterdikleri unutulmamalıdır. Dolayısıyla söz konusu elemanların tasarımlarının deprem yükleri altındaki davranışının kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle çalışmada gerçekleştirilen analizlerde tüm SVS'lerin deprem yükleri altındaki davranışı, tasarımcılara ve araştırmacılara fikir vermesi maksadıyla, bu başlık altında kontrol edilecektir. Bu bağlamda depremler sırasındaki tepkilerini irdelemek için kenar

akslara yerleştirilen SVS'lerde daha büyük deplasman olması nedeniyle kenar akslara yerleştirilen sönümleyicilere ait kuvvet-deplasman ilişkileri incelenmiştir (Şekil 4.28).



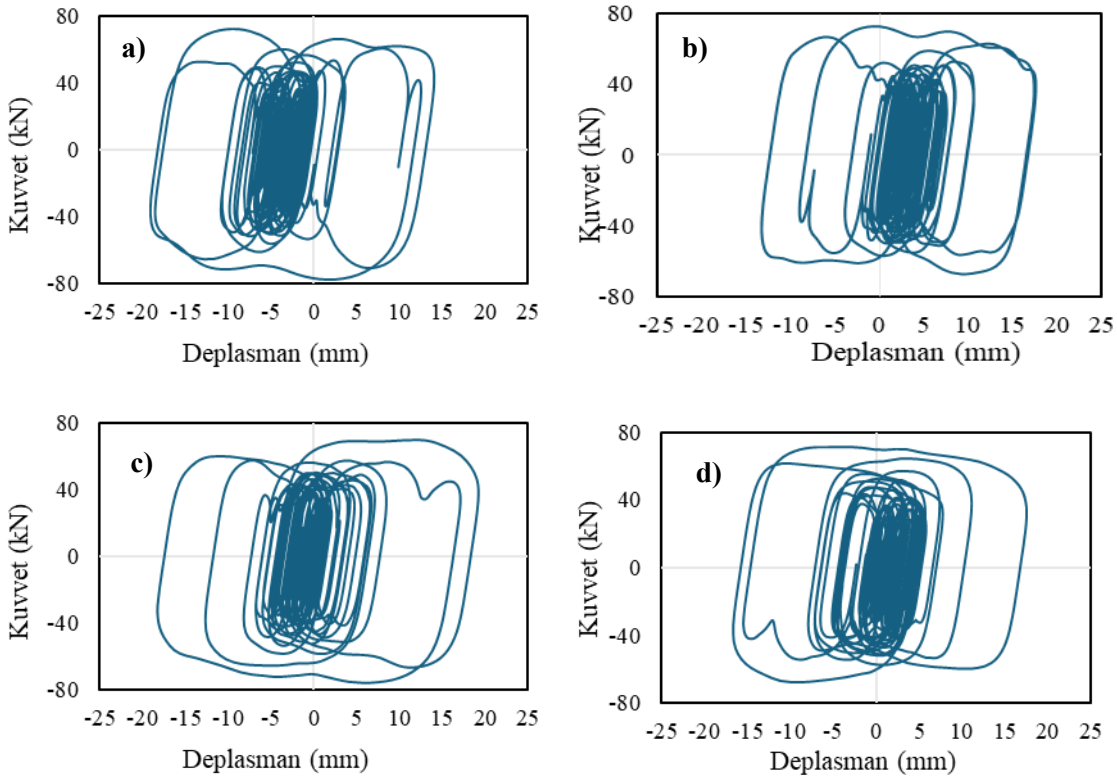
Şekil 4.28. SVS, guse–çatı makası ile aşık–çatı makası bağlantısını temsil eden elemanlar

Deprem ve rüzgar gibi dinamik yükler altında SVS'lerin tipik histeretik döngüleri gösteren çevrimsel kuvvet-deplasman grafikler, sistemin her bir çevrimde ne kadar enerji sönümlediğini ortaya koymaktadır. Şekil 4.28'de gösterilen sönümleyici elemanını temsil eden K91 link elemanı seçilmiştir. Bölüm 3.11 Çizelge 3.1'de sunulan deprem yer hareketi kayıtları arasından, her bir set içerisinde maksimum moment büyüklüğüne (Mw) sahip kayıtlar seçilmiştir. Set-1 için RSN1504, Set-2 için TR3115 ve Set-3 için RSN881 kullanılmıştır. Bu seçilen kayıtlar üzerinden sönümleyicilerin histeretik davranışını temsil eden kuvvet-deplasman döngüleri elde edilmiştir. Şekil 4.29-4.31'deki histeretik eğriler, değiştirilmiş toggle (TSDY ve TSDV) ve diyagonal (DSDY ve DSDV) sönümleyicilerin histeretik davranışlarını ayrı ayrı göstermektedir.

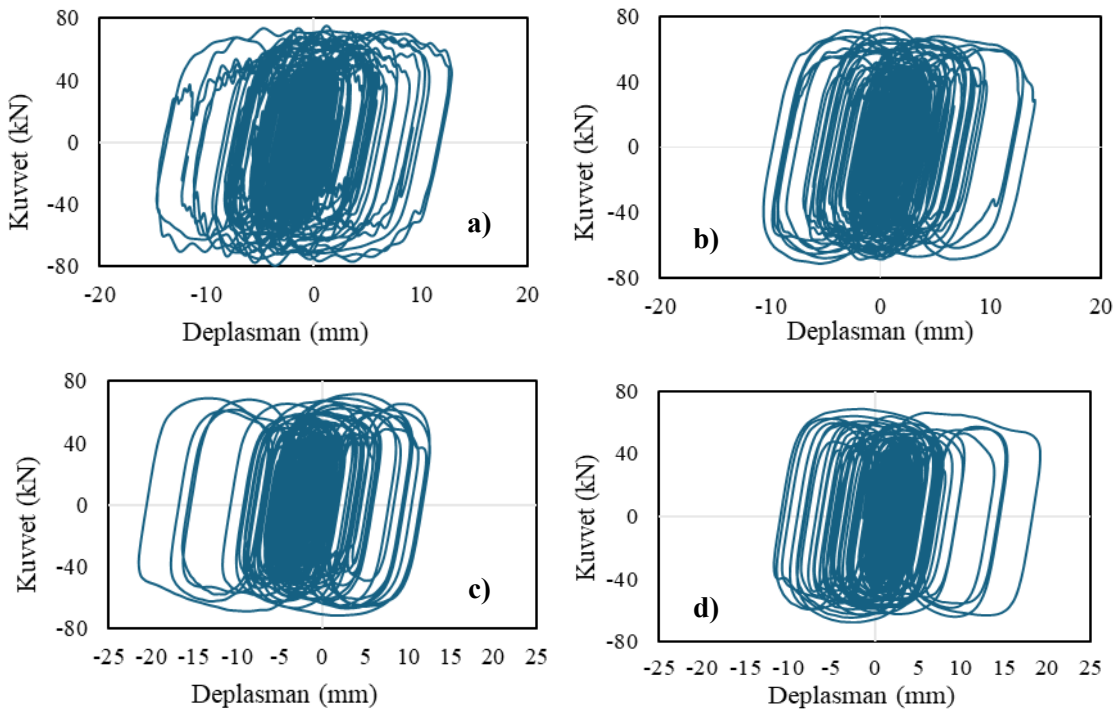
Bölüm 2.2.1 Şekil 2.24'te verilen viskoz sönümleyicilerin kuvvet-deplasman ilişkileri ile aşağıda sunulan deprem kayıtlarından elde edilen sönümleyici kuvvet-deplasman döngüleri incelendiğinde, döngülerin eliptik yerine dikdörtgene yakın bir form sergilemesinin, davranışın doğrusal olmayan nitelikte olduğunu açıkça ortaya koyduğu görülmektedir. Şekil 4.29'da görülen histeretik eğriler, deprem tehlikesi yüksek olan Set-1 için DSDV sisteminde daha geniş döngüler oluştuğunu ve bir çevrimde sistemin maksimum 79.94 kN kuvvet ile kapasite sınırına ulaştığını göstermektedir. Buna karşılık, TSDV sisteminde ise hem kuvvet hem deplasman düzeyi açısından çevrimlerin daha dar bir davranış sergileyerek daha az sönüm ürettiği görülmektedir. Benzer davranış duvarsız DSDY ve TSDY modellerinde de sergilenmektedir. Şekil 4.30'daki histeretik eğriler dikkate alındığında, analiz sonuçları her iki modelin de uyumlu döngülerle çalıştığını göstermektedir. Ayrıca, TSDY, TSDV, DSDY ve DSDV sistemlerinin tamamında RSN1504 sonuçlarına göre sönümleyicilerin diğer kayıtlarda daha yüksek sönüm ürettiği Çizelge 4.3'te görülmektedir. Şekil 4.31'de, diyagonal sönümleyiciler (DSDV) ve DSDY sistemlerinin RSN3115 kaydı sonuçlarına nazaran daha büyük sönüm üretmesine karşın TSDV ve TSDY modellerinde daha az sönüm üretilmektedir.

Yapılan analizler sonucunda, her iki sönümleyici konfigürasyonunun da hem kuvvet hem de deplasman açısından kapasite sınırları içerisinde çalıştığı belirlenmiştir. Genel değerlendirme sonucunda, tüm setlerde değiştirilmiş-toggle sönümleyici sisteminin, diyagonal sönümleyiciye kıyasla benzer sönümleme kuvvetlerini daha düşük

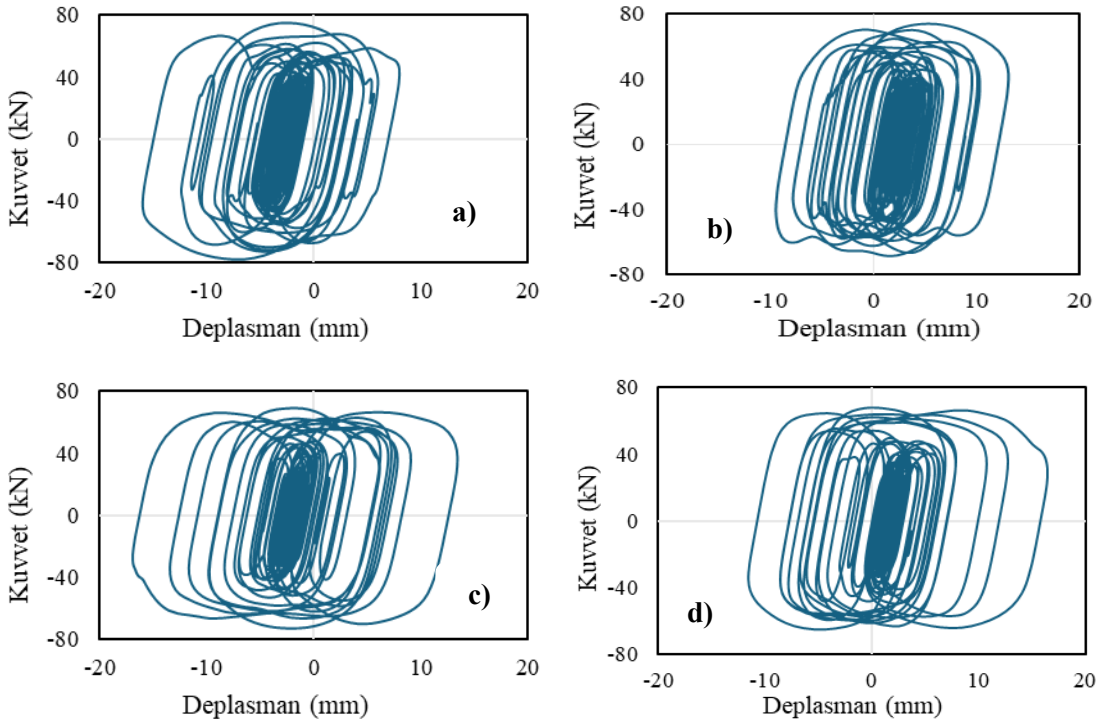
deplasmanlarla sağladığı, daha küçük bir alanda enerji sönümleyerek düzenli bir histeretik davranış sergilediği görülmüştür. Bu sebeple diyagonal sönümleyici kullanılan modellerde (DSDY ve DSDV) üretilen sönüm oranı değiştirilmiş-toggle modellerine (TSDY ve TSDV) kıyasla daha fazladır (Çizelge 4.3). Elde edilen bu sonuçlar, modelleme ve analiz sürecinde izlenen yaklaşımların geçerliliğini ortaya koymakta ve Şekil 4.27'de elde edilen verilerle anlamlı bir tutarlılık sergilemektedir. Bunlara ek olarak, Set-3'te yapılan analizlerin daha küçük yer değiştirmeler elde edilmesine rağmen büyük sönüm üretmesi vurgulanması gereken bir husustur. Benzer şekilde, bu davranış biçimleri Şekil 4.27'de elde edilen verilerle uyumlu sonuçlar doğurmaktadır.



Şekil 4.29. Set-1 RSN1508 deprem kaydı için sönümleyici kuvvet–deplasman ilişkisi, a) DSDV, b) TSDV c), DSDY, d) TSDY



Şekil 4.30. Set-2 TR3115 deprem kaydı için sönümleyici kuvvet–deplasman ilişkisi, a) DSDV, b) TSDV, c) DSDY, d) TSDY



Şekil 4.31. Set-3 RSN881 deprem kaydı için sönümleyici kuvvet–deplasman ilişkisi, a) DSDV, b) TSDV, c) DSDY, d) TSDY

Ayrıca, maksimum değerler ve sönüm oranları sayısal olarak Çizelge 4.3'te sunulmuştur. Çizelgedeki bütün depremlerde DSDY ve DSDV sistemlerinden elde edilen sönüm oranı TSDY ve TSDV sistemlerinden daha büyüktür. Bu çıkarım diyagonal sönümleyicinin toggle'a göre daha etkin çalıştığını ortaya koymakla beraber Şekil 4.27'de elde edilen sonuçlarla uyumlu davranış sergilemektedir.

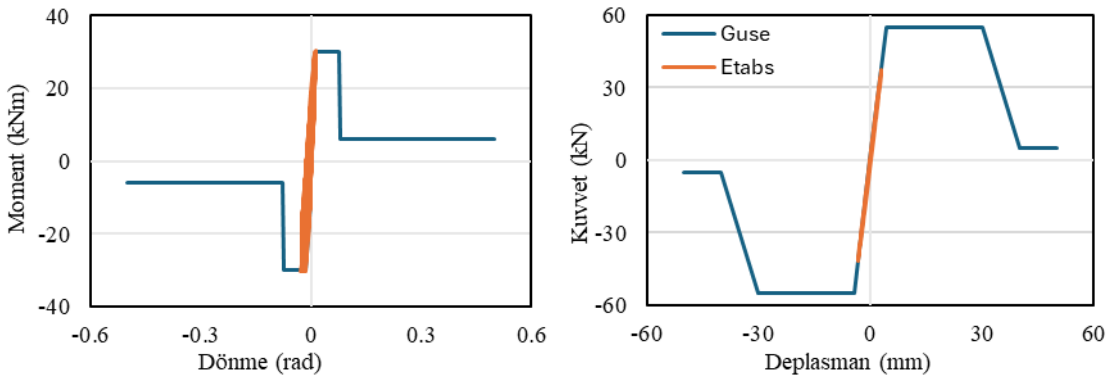
Çizelge 4.3. Maksimum kuvvet, maksimum deplasman ve sönüm oranı

Deprem Kaydı	Konfigürasyon	Maks. Kuvvet (kN)	Maks. Deplasman (mm)	Sönüm oranı (%)
RSN1504 (Set-1)	DSDV	77.78	19.09	4.33
	TSDV	77.47	23.17	3.60
	DSDY	75.99	18.28	3.87
	TSDY	71.34	17.44	3.28
TR3115 (Set-2)	DSDV	79.94	14.70	3.62
	TSDV	73.03	13.98	2.83
	DSDY	71.78	21.47	3.47
	TSDY	69.50	19.13	2.86
RSN881 (Set-3)	DSDV	78.20	16.00	3.84
	TSDV	73.82	13.09	3.05
	DSDY	73.25	16.94	3.25
	TSDY	69.86	16.45	2.67

4.9. Guse-çatı makas bağlantı davranışı

Bölüm 3.2.3'te Şekil 3.13 ve 3.14'te gösterilen guse–makas kiriş bağlantısı için tanımlanan kuvvet–deplasman ve moment–dönme ilişkileri Etabs yazılımında link elemanı olarak modellenmiştir. Tüm modeller ve setler için K1 elemanı seçilerek (Şekil 4.28); düzlem dışı (M2–R2) ve düzlem içi (M3–R3) moment–dönme ile düzlem dışı (V3–U3) ve düzlem içi (V2–U2) kesme kuvveti–deplasman ilişkileri elde edilmiş ve aşağıdaki şekillerde sunulmuştur. Bu link elemandaki davranışları araştıracağımız deprem kayıtları seçilirken, depremlerin büyüklükleri ve aynı deprem dizisine ait olmaları dikkate

alınmıştır. Bu kapsamda, Set 1 ve Set 2 için RSN1208 Chi-Chi deprem kaydı, Set 3 için ise büyüklüğü en yüksek olan RSN881 Landers deprem kaydı tercih edilmiştir. Şekil 4.32'de programa tanımlanan doğrusal olmayan davranış eğrisi grafikte "guse" olarak, analiz sonucunda elde edilen doğrusal olmayan davranışı temsil eden eğri ise "Etabs" olarak adlandırılmıştır. Ayrıca, en yüksek moment–dönme ve kesme kuvveti–deplasman değerlerine sahip diyagonal sönümleyici (DSDV) modeli için Set-1'e ait RSN1208 deprem kaydı kullanılarak elde edilen analiz sonuçların karşılaştırma amacıyla örnek olarak şekle eklenmiştir.



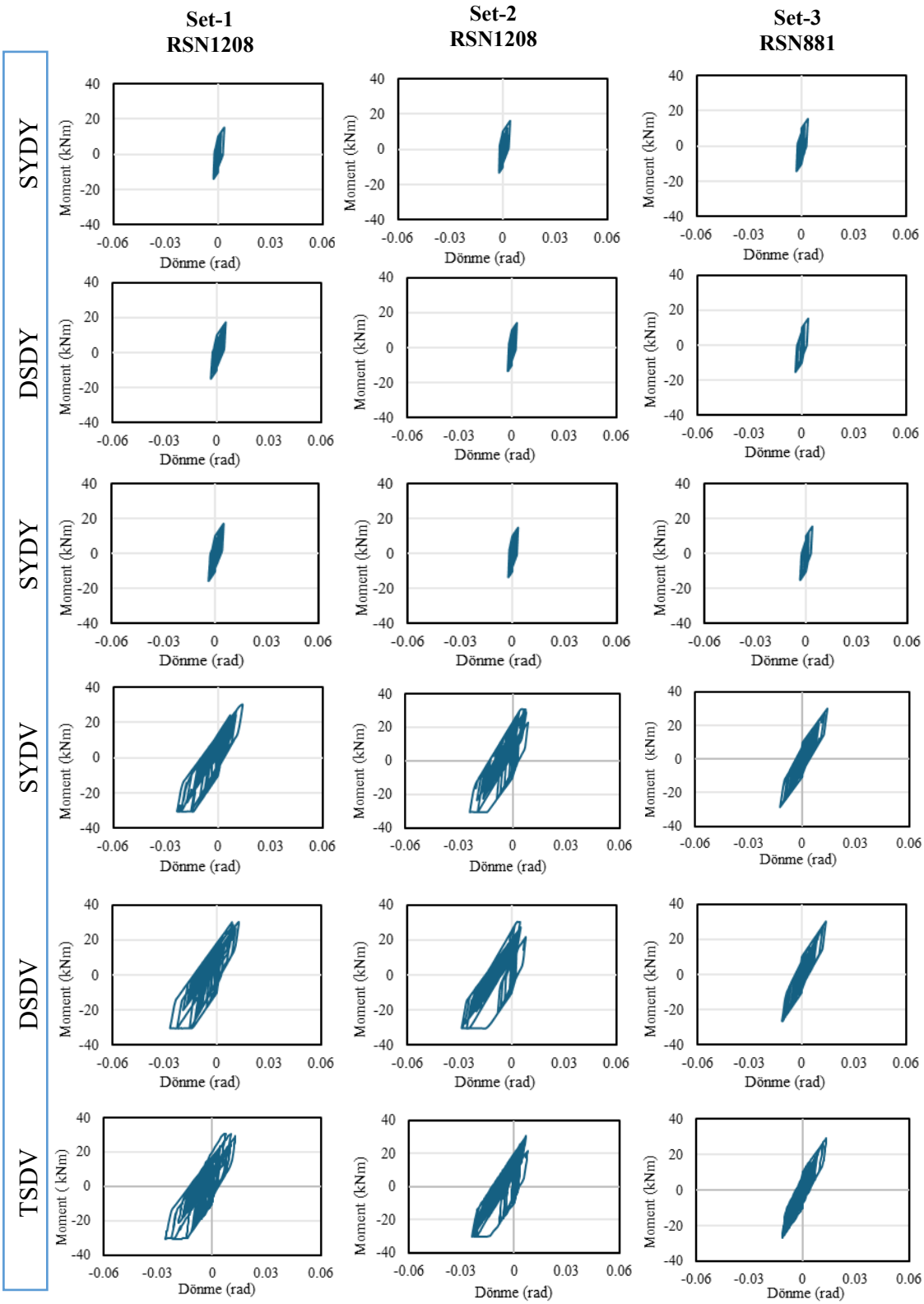
Şekil 4.32. DSDV modelinde RSN1208 kaydına ait M2–R2 ve V3-U3 ilişkileri

Şekil 4.33'te guse–çatı makası bağlantısında yer alan elemanın düzlem dışı moment–dönme (M2–R2) ilişkisi incelendiğinde, doğrusal olmayan davranışın model türlerine ve deprem tehlikesini temsil eden setlere bağlı olarak farklılık gösterdiği görülmektedir. Dolgu duvarsız (SYDY) modelde sistemin tüm setler için zorlanmadığı ve elastik sınırlara yakın kaldığı görülmektedir. Yine duvarsız DSDY ve TSDY modellerinde de referans modele benzer davranış sergilediği görülmektedir. Ayrıca, duvarın olduğu değiştirilmiş toggle sönümleyici (TSDV) ve dolgu duvarlı (SYDV) modellerde, deprem tehlikesi yüksek olan Set-1 ve Set-2'de dönme değerinin %3 değerine ulaşarak plastik bölgeye geçildiği, buna karşın deprem tehlikesi düşük olan Set 3'te ise plastikleşmenin görece daha az olduğu belirlenmiştir. Dolgu duvarlı modeller karşılaştırıldığında, sisteme değiştirilmiş toggle sönümleyici (TSDV) eklenmesinin guse–çatı makası bağlantısında düzlem dışı moment–dönme (M2–R2) davranışında ek bir kuvvet üretmediğini göstermektedir. Nitekim, SYDV ve TSDV modellerinde hem moment hem de dönme mertebeleri birbirine yakındır. Diyagonal sönümleyici (DSDV) modelinde deprem

tehlikesi yüksek olan Set-1 ve Set-2'de plastik bölgeye ulaşıldığı ve diğer iki modele kıyasla daha yüksek zorlanmalar sonucu plastik davranışın arttığı, buna karşın deprem tehlikesi düşük olan Set-3'te ise davranışın diğer modellere benzer olduğu gözlemlenmiştir. Bu bulgu, diyagonal sönümleyici (DSDV) eklenmesinin guse–çatı makası bağlantısının düzlem dışı moment–dönme (M2–R2) davranışında görece yüksek deprem tehlikesinin olduğu setlerde ilave kuvvet etkileri oluşturduğunu ortaya koymaktadır.

TSDV sisteminde, çatı makası ve kolona bağlanan toggle mekanizması aracılığıyla sönümleyiciye iletilen hareketler sönümleyicide daha büyük deplasmanlara neden olmakta ve böylece sönümleyicinin enerji tüketimi artmaktadır. Bu mekanizma, bağlantı bölgesine ek eksenel kuvvet aktarmamakta ve dolayısıyla bağlantı davranışında ilave zorlanmalara neden olmamaktadır (Şekil 3.21).

Buna karşılık, diyagonal sönümleyici (DSDV) sisteminde, sönümleyici eleman doğrudan diyagonal olarak çatı makasına ve kolona bağlanmış olup yatay deplasmanlar eksenel kuvvetler aracılığıyla doğrudan sönümleyiciye iletilmektedir. Bu durum, daha yüksek sönümleme kapasitesi sağlamasına karşın, çatı makası–guse bağlantısında ek moment ve kesme kuvvetlerinin oluşmasına yol açmakta ve bağlantı bölgesinde ilave zorlanmalara neden olabilmektedir (Şekil 3.22). Bu etki, Şekil 4.16'da verilen guse–çatı makası bağlantısına ait düzlem içi ortalama kesme deplasmanı değerlerinde ve Şekil 4.19'da gösterilen düzlem dışı ortalama dönme oranlarında da açıkça görülmektedir.

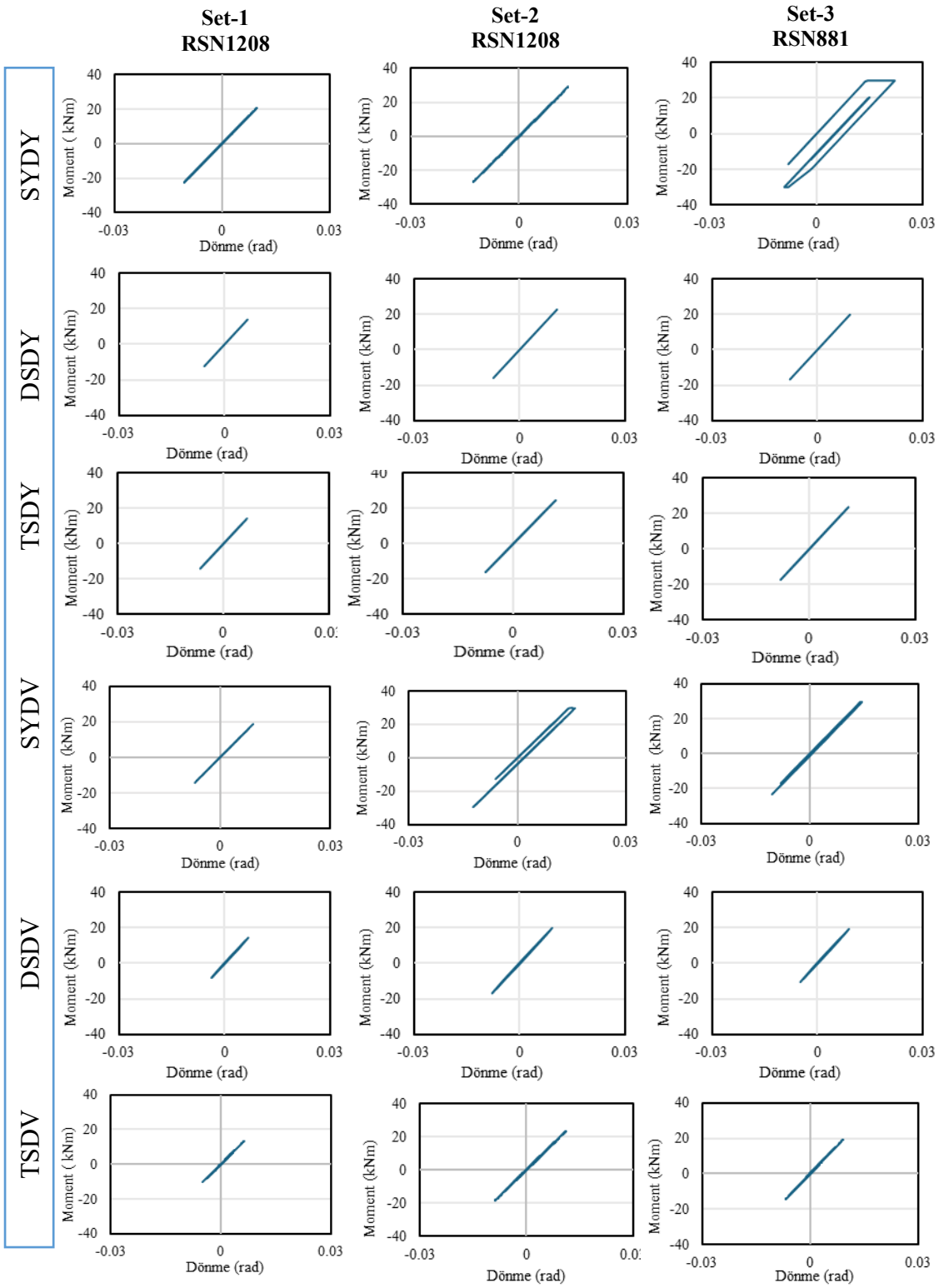


Şekil 4.33. Guse-çatı makası düzlem dışı moment-dönme (M2–R2) ilişkisi

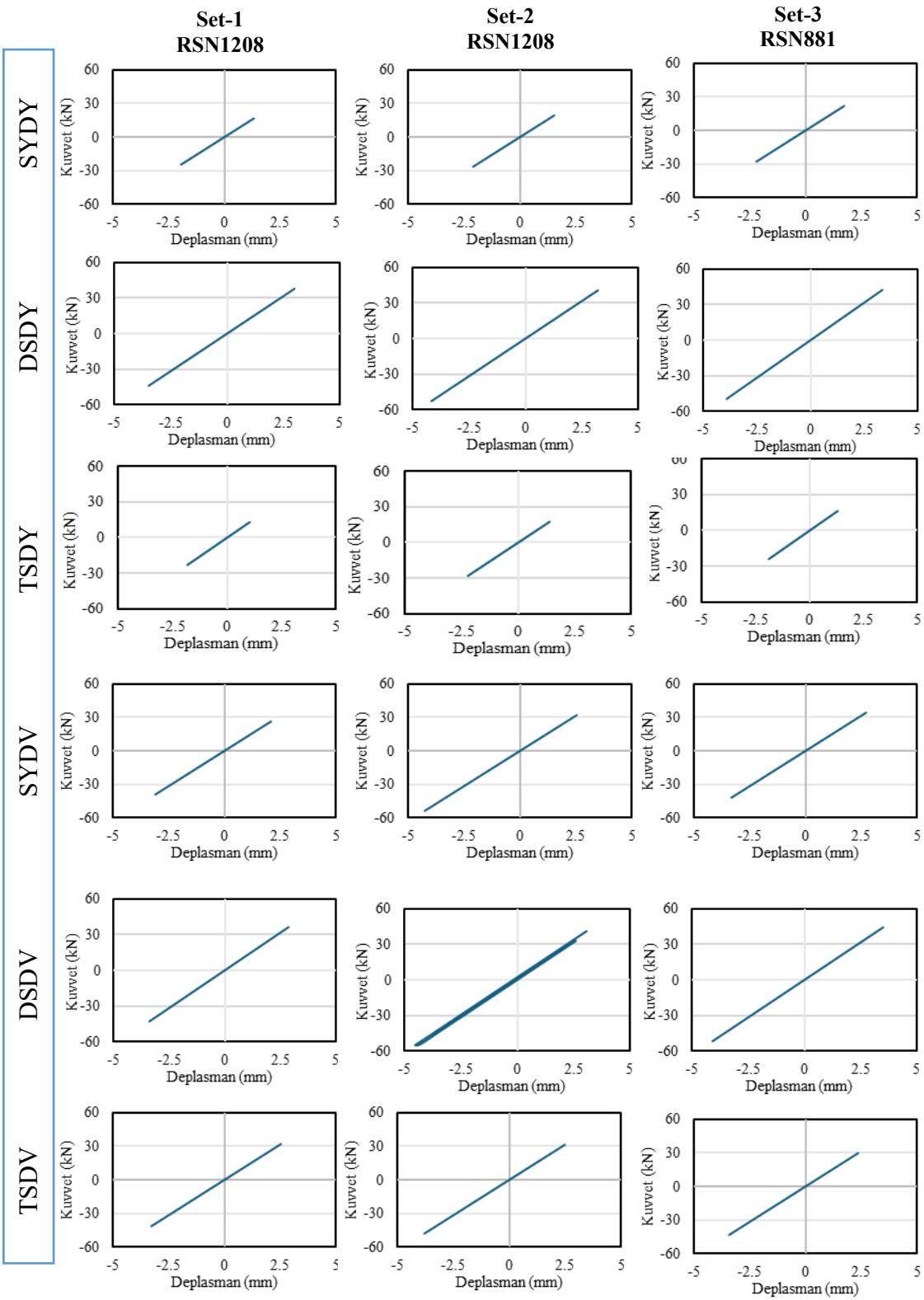
Değiştirilmiş toggle (TSDV) ve diyagonal sönümleyicilerin (DSDV) modele eklenmesiyle guse-çatı makas bağlantısındaki düzlem içi moment-dönme (M3–R3) davranışının olumlu yönde etkilendiği ayrıca, dolgu duvarsız ve dolgu duvarlı sistemlere kıyasla, tüm setler için elastik sınırlar içinde kaldığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.34'te yer alan guse-çatı makas bağlantısındaki elemanının düzlem içi moment-dönme (M3–R3) ilişkisi incelendiğinde, dolgu duvarsız (SYDY) sistemde deprem tehlikesinin düşük olduğu Set-3'ün fazla zorlandığı ve elastik sınırı aştığı, diğer iki sette ise elastik sınır içinde kaldığı görülmektedir. Dolgu duvarlı modelde (SYDV) ise Set 2'de plastik bölgeye geçiş gözlenmiştir.

Şekil 4.35'te gösterilen guse-çatı makas bağlantısındaki elemanın düzlem içi kesme kuvveti-deplasman (V2–U2) ilişkisi incelendiğinde, değiştirilmiş toggle sönümleyici (TSDY, TSDV), dolgu duvarlı (SYDV) ve dolgu duvarsız (SYDY, DSDY) modellerde, tüm setler için guse-çatı makas bağlantısındaki davranışın elastik sınırı aşmadığı görülmektedir. Bununla birlikte, diyagonal sönümleyici DSDV modeli için diğer modellere göre daha fazla zorlanma gözlenmiş ve Set 2'de plastikleşme meydana gelmiştir. Daha önce düzlem dışı moment-dönme ilişkisi bağlamında bahsettiğimiz gibi diyagonal sönümleyici eleman çatı makası ile doğrudan belirli bir açıyla bağlandığından bu bölgede ilave eksenel kuvvet oluşmaktadır. Bu durum, Şekil 4.16'da verilen guse-çatı makası düzlem içi ortalama kesme kuvveti T/K oranlarından da açıkça anlaşılmaktadır.

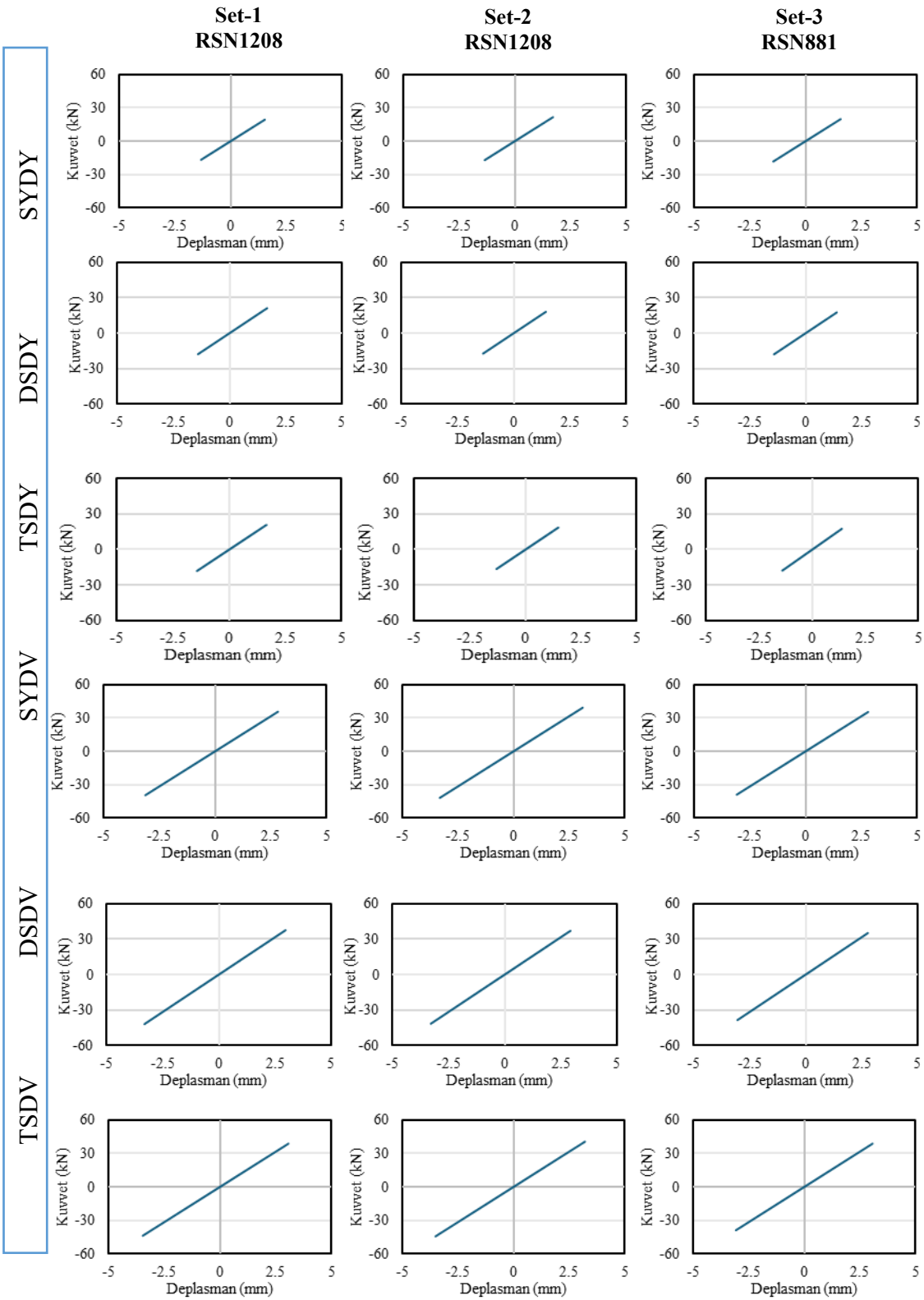
Şekil 4.36'da gösterilen guse-çatı makas bağlantısındaki elemanının düzlem içi kesme kuvveti-deplasman (V3–U3) ilişkisi incelendiğinde, tüm modeller ve tüm setler için guse-çatı makas bağlantısındaki elemanın elastik sınırı aşmadığı görülmektedir. Bu durum, Şekil 4.17'de verilen guse-çatı makası düzlem içi ortalama kesme kuvveti T/K oranlarının bütün setlerde 0.22 değerini aşmamasından da açıkça anlaşılmaktadır.



Şekil 4.34. Guse- çatı makası düzlem içi moment-dönme (M3–R3) ilişkisi



Şekil 4.35. Guse- çatı makası düzlem içi kuvvet-deplasman (V2–U2) ilişkisi



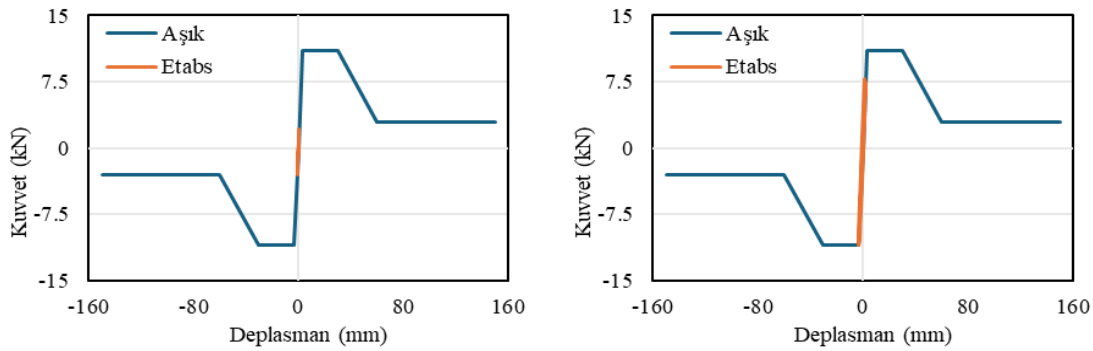
Şekil 4.36. Guse- çatı makası düzlem dışı kuvvet-deplasman (V3–U3) ilişkisi

Sonuç olarak, guse-aşık makası bağlantısının davranışı göz önünde bulundurulduğunda

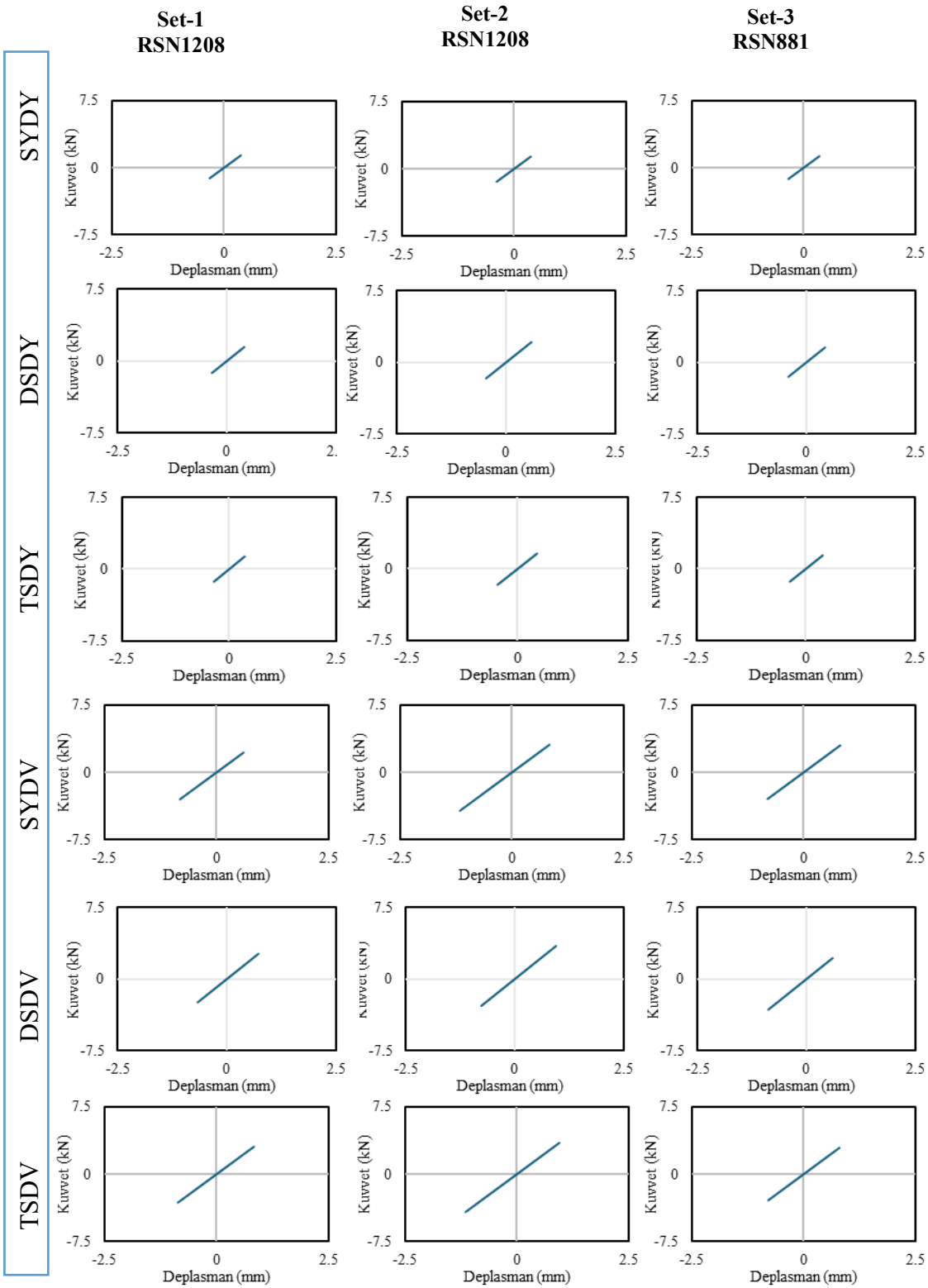
düzlem içi moment-dönme davranışı genellikle elastik davranış gösterirken düzlem dışı davranışta plastikleşme bütün set ve modellerde gözlenmektedir. Öte yandan kuvvet-deplasman ilişkisi açısından hem düzlem içi hem düzlem dışında elastik davranış hakimdir.

4.10. Aşık-çatı makas bağlantı davranışı

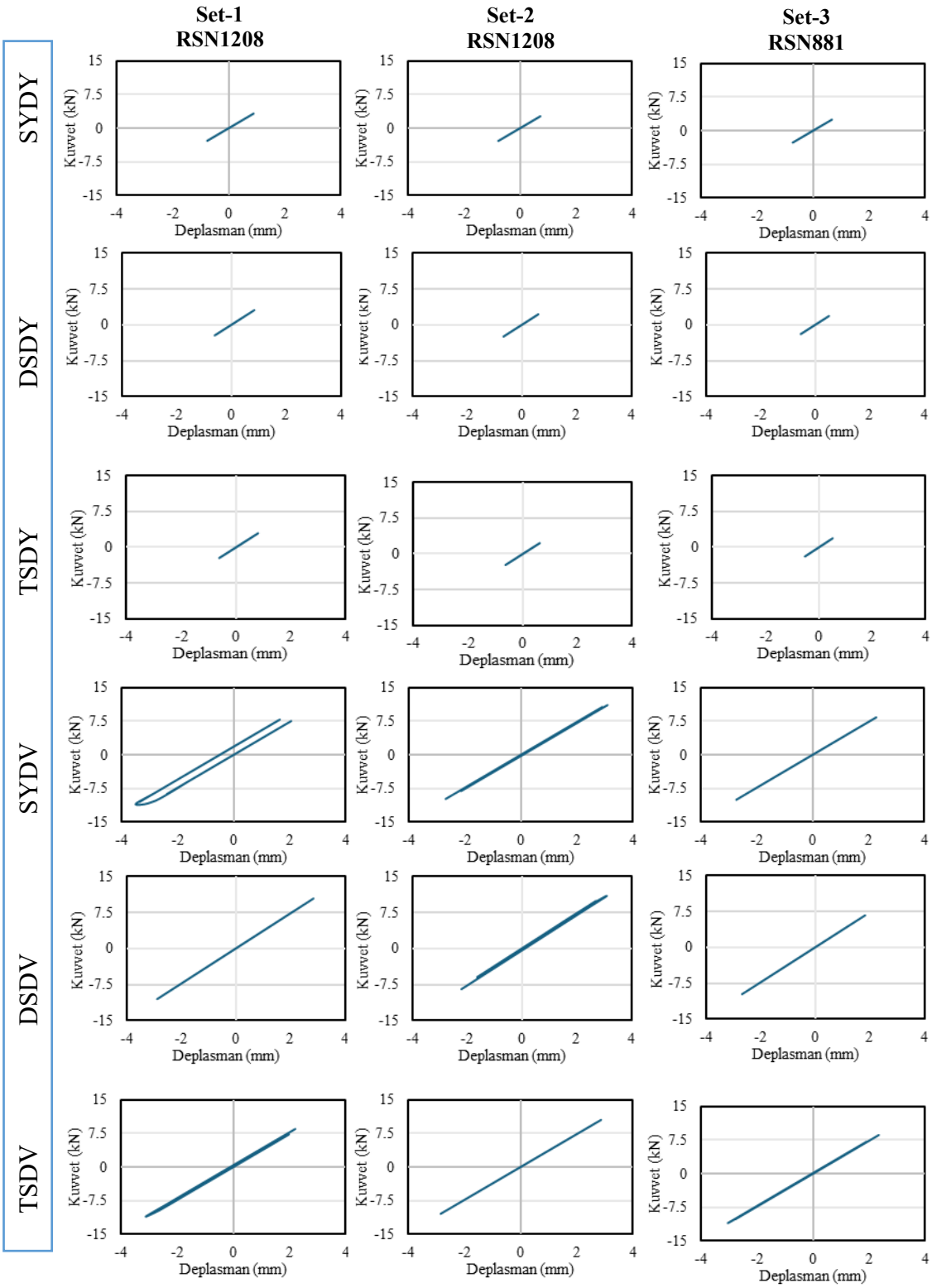
Bölüm 3.2.3'te, aşık–çatı makası için kuvvet-deplasman ilişkisi tanımlanmıştır (Şekil 3.15). Bu ilişki ETABS yazılımında link elemanı olarak modellenmiş olup tüm modeller ve setler için x yönü (V2–U2) ve y yönü (V3–U3) kesme kuvveti–deplasman ilişkileri için K20 elemanı seçilmiştir (Şekil 4.28). K20 link elemanının doğrusal olmayan davranışlarının temsil edilmesi amacıyla, deprem kayıtları seçilirken yukarıda guse-çatı makası bağlantısı için belirlenen deprem kayıtları kullanılmıştır. Bu kapsamda, Set-1 ve Set-2 için RSN1208, Set-3 için ise RSN881 deprem kayıtları tercih edilmiştir. Karşılaştırma amacıyla örnek olarak, Şekil 4.37'de ETABS programında tanımlanan doğrusal olmayan davranış eğrisi grafikte 'Aşık', analiz sonucunda elde edilen doğrusal olmayan davranışı temsil eden eğri ise 'ETABS' olarak adlandırılmıştır. Şekil 4.38 ve 4.39'da verilen x yönü ve y yönü kuvvet-deplasman grafiklerinin incelenmesi sonucunda, özellikle dolgu duvarsız (SYDY) modelde elemanın herhangi bir zorlanma göstermediği, diğer dolgu duvarlı (SYDV), diyagonal sönümleyici (DSDY, DSDV) ve değiştirilmiş toggle sönümleyici (TSDY, TSDV) modellerinde de benzer bir davranış sergilendiği açıkça görülmektedir. Tüm bu modeller ve tüm setler için çatı aşık-makası bağlantısında link elemanı olarak tanımlanan elemanın elastik sınırı aşmadığı belirlenmiştir.



Şekil 4.37. SYDV modelinde RSN1208 kaydına ait V2–U2 ve V3-U3 ilişkileri



Şekil 4.38. Aşık-çatı makası x yönü kuvvet-deplasman (V2–U2) ilişkisi



Şekil 4.39. Aşık-çatı makası y yönü kuvvet-deplasman (V3–U3) ilişkisi

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında tek katlı tek açıklıklı betonarme prefabrik sanayi (BPS) yapısının sismik davranışına dolgu duvarın ve sıvı viskoz sönümleyicilerin (SVS) etkisi sayısal modelleme yardımıyla araştırılmaktadır. Tez kapsamında her biri TBDY (2018) yönetmeliği esas alınarak oluşturulan toplam altı farklı model için zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiştir. TBDY (2018)'e göre oluşturulan üç boyutlu modelde, üç farklı ticari projede kullanılan deprem kayıt setleri kullanılmış olup, her bir set 11 adet deprem kaydından oluşmaktadır. Her bir model için farklı zemin ve lokasyonda üç set kullanılmış ve böylece toplamda 198 adet (6x11x3) zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler yapılmıştır. Tez çalışmasının amacı doğrultusunda, BPS yapıları için farklı SVS konfigürasyonları modele entegre edilerek analizler gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, değiştirilmiş toggle ve diyagonal konfigürasyonlar seçilmiştir. Benzer şekilde dolgu duvar eşdeğer basınç çubuğu olarak modellenmiş ve yapının dinamik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizlerin neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmaktadır.

- Modal analiz sonuçlarına göre dolgu duvarlar yapı sistemine ilave rijitlik kazandırarak birinci mod periyotlarını düşürmüş ve düzlem dışı yatay ötelenmeleri önemli ölçüde azaltmıştır. Bu durum, yapının daha az esnek davranarak deprem etkilerine karşı daha az öteleme yaptığına işaret etmektedir. Öte yandan sıvı viskoz sönümleyiciler yapının rijitliği üzerinde doğrudan bir etki oluşturmamış, ancak enerji sönümleme kapasitesini artırarak yapısal performansa olumlu katkı sağlamıştır. Sönümleyiciler, yapıların periyot değerlerini belirgin şekilde değiştirmemektedir.

- Sönümleyici kullanılmayan sistemler (SYDY ve SYDV) kolon elemanlarında en yüksek T/K oranlarının oluşmasına neden olmuşken; özellikle diyagonal (DSDV) ve değiştirilmiş toggle (TSDV) tipi sönümleyicilerin kullanıldığı sistemlerde, kolonlarda hem beton hem de donatı bazlı T/K oranlarının belirgin şekilde azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, sönümleyicilerin yapıya enerji tüketimi

açısından önemli katkı sağladığını ve deprem etkisi altında oluşan yapısal talepleri azalttığını ortaya koymaktadır. Nitekim, TSDV ve DSDV sistemlerinde donatı birim şekil değiştirme taleplerinin düşük deprem tehlikesi senaryolarında Göçmenin Önlenmesi (GÖ) performans sınırının altında kalırken, deprem tehlikesinin yüksek olduğu durumlarda göçme öncesi sınır değerlerinin aşıldığını ve yapının ciddi hasar alma riskinin yüksek olduğunu göstermiştir.

- Göreli kat ötelemeleri, düzlem içi davranış söz konusu olduğunda sönümleyici sistemlerle düzlem dışı davranışta ise dolgu duvarlarla önemli ölçüde azaltılmıştır. Yapılan analizlerde SYDY ve SYDV sistemlerinde sadece Set-1 için talepler kapasiteyi geçerken, duvarın düzlem içi göreli kat ötelemesi üzerinde sönümleyicilerin ise düzlem dışı davranış üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı ortaya çıkmıştır. Duvar ve sönümleyicilerle beraber TSDV ve DSDV sistemlerinde göreli kat ötelemesi için tüm deprem setlerinde taleplerin kapasitenin altında kaldığı görülmüştür.

- Guse-çatı makası bağlantısında, düzlem içi ve dışı kesme deplasmanına ait T/K oranları genellikle güvenli seviyelerde kalmış; ancak düzlem içi ve dışı dönme bazı modellerde göçme sınırını aşmıştır. Düzlem içi dönmeye bakıldığında SYDY ve SYDV modellerinin deprem tehlikesi yüksek bölgelerde talepler kapasitenin üzerine çıkarken sönümleyicilerin talepleri büyük ölçüde düşürdüğü belirlenmiştir. Düzlem dışı dönmede ise sönümleyicilerin talepler üzerinde etkisinin olmadığı anlaşıldığı ve duvarın davranış üzerinde belirleyici etkisi olduğu ortaya çıkmıştır. Duvarın sisteme dahil edilmesiyle (SYDV) T/K oranında beş katına kadar artış gözlenirken taleplerin kapasiteden daha büyük olduğu ortaya çıkmıştır.
- Aşık-çatı makası bağlantısında hem düzlem içi hem de düzlem dışı kesme deplasmanları için talepler kapasitenin çok altında kalarak elastik davranış sergilemiştir. Bu durum aşık-çatı makası bağlantılarının pek zorlanmadığını gösterirken aşık elemanlarının gelen yatay yükleri transfer etme fonksiyonunu açıkça ortaya koymaktadır.

- Dolgu duvarlar, basınç etkisi altında düşük T/K oranları sergilemiştir. Dolgu duvarlara ait T/K oranları, tüm senaryolarda birim değerin oldukça altında kalarak, bu elemanların basınç altında etkin performans gösterdiğini kanıtlamıştır. Dolgu duvarların, yapının sismik davranışına olumlu yönde ciddi katkı sunduğu ancak guse-çatı makası bağlantısında düzlem dışı dönmeleri kritik göçme eşiğinin üzerine çıkardığı ortaya çıkmıştır.

- Enerji bileşenleri analizleri sonucunda, sönümleyici içeren sistemlerde en yüksek enerji sönümleme diyagonal DSDV modelinde ve Set-3 senaryosunda gözlemlenmiş, toplam enerjinin yaklaşık 1/3'ü doğrusal olmayan viskoz sönümleyiciler tarafından sönümlenmiştir. Analizler sonucunda sönümleyici kaynaklı sönüm oranlar en az deprem tehlikesi olan bölgelerde daha fazla iken deprem tehlikesinin artmasıyla bu oran azalmaktadır.

Bu çalışmada dolgu duvarın ve sıvı viskoz sönümleyicilerin tek katlı tek açıklıklı betonarme prefabrik sanayi yapılarının deprem performansı üzerindeki etkileri düğüm noktalarındaki davranışları kapsamlı inceleyebilen sayısal modeller yardımıyla araştırılmıştır. Zaman tanım alanında gerçekleştirilen doğrusal olmayan analizler hem dolgu duvarların hem de sönümleyici kullanımının yapının sismik performansına önemli katkılar sunduğunu göstermiştir. Özellikle kolon donatı ve betonundaki birim şekil değiştirmelerin önemli oranda azaldığı, benzer şekilde kapasitenin üzerinde olan kolon göreli kat ötelemelerinin her iki doğrultuda kapasitenin yarısına kadar indiği ortaya çıkmıştır. Ancak, guse-çatı makası bağlantısında ise duvarın kullanımının özellikle düzlem dışı dönmeleri kapasitesinin üzerine çıkardığını vurgulamak gerekmektedir. Tasarımcıların böylesi bir yapının tasarımı veya güçlendirilmesi aşamasında düzlem dışı dönme davranışını dikkatle incelemesi tavsiye edilmektedir. Aşık-çatı makası bağlantısında zorlanmanın söz konusu olmadığını aşıkların sadece yük transfer elemanı olarak çalıştıkları belirlenmiştir. Bununla beraber çok katlı ve çok açıklıklı prefabrik yapılar dikkate alınarak çalışmanın kapsamının genişletilmesi böylesi yapılarda sismik davranışın daha detaylı anlaşılmasına olanak sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

Abdul-Kadir, M. R. (1974). *The Structural Behaviour of Masonry Infill Panels in Framed Structures* [Thesis (PhD)]. University of Edinburgh.

Alatik, L., & Abrahamson, N. (2010). An improved method for nonstationary spectral matching. Içinde *Earthquake Spectra* (C. 26, Sayı 3, ss. 601-617). https://doi.org/10.1193/1.3459159

Arslan, M. H., Dere, Y., Ecemiş, A. S., Doğan, G., Özturk, M., & Korkmaz, S. Z. (2024). Code-based damage assessment of existing precast industrial buildings following the February 6th, 2023 Kahramanmaraş earthquakes (Pazarcık Mw 7.7 and Elbistan Mw7.6). Içinde *Journal of Building Engineering* (C. 86, Sayı October 2023). https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108811

ASCE/SEI 41-17. (2017). *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings (ASCE/SEI 41-17)*. American Society of Civil Engineers. https://doi.org/10.1061/9780784414859

ASCE/SEI-41-06. (2007). Supplement to Seismic Rehabilitation of Existing Buildings (ASCE/SEI 41-06). Içinde *Seismic Rehabilitation of Existing Buildings*. American Society of Civil Engineers. https://doi.org/10.1061/9780784408841.sup

Asteris, P. G., Kakaletsis, D. J., Chrysostomou, C. Z., & Smyrou, E. E. (2011). Failure Modes of In-filled Frames. *Electronic Journal of Structural Engineering*, *11*, 11-20. https://doi.org/10.56748/ejse.11139

Asteris, P. G., Repapis, C. C., Tsaris, A. K., Di Trapani, F., & Cavaleri, L. (2015). Parameters affecting the fundamental period of infilled RC frame structures. Içinde *Earthquake and Structures* (C. 9, Sayı 5, ss. 999-1028). https://doi.org/10.12989/eas.2015.9.5.999

ATC 40. (1996). Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings. Içinde *Applied Technology Council* (C. 1).

Avcil, F. (2023). Investigation of Precast Reinforced Concrete Structures during the 6 February 2023 Türkiye Earthquakes. *Sustainability*, *15*(20), 14846. https://doi.org/10.3390/su152014846

Bazan, E., & Meli, R. (1980). Seismic analysis of structures with masonry infill walls. *Proceedings of the 7th World Conference on Earthquake Engineering*, *5*, 633-640.

Bekiroğlu, D. (2006). *Prefabrike yapıların depreme dayanıklı tasarımı, onarım ve güçlendirilmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi.

Bertoldi, S. H., Decanini, & L. D.; Gavarini, C. (1993). Telai tamponati soggetti ad azioni sismiche, un modello semplificato: confronto sperimentale e numerico. *Atti del VI Convegno Nazionale ANIDIS*, 815–824.

Bournas, D. A., Negro, P., & Taucer, F. F. (2014). Performance of industrial buildings during the Emilia earthquakes in Northern Italy and recommendations for their strengthening. *Bulletin of Earthquake Engineering*, *12*(5), 2383-2404. https://doi.org/10.1007/s10518-013-9466-z

Brant Hydraulics. (2025). *Brant Hydraulics Official Website*. Brant Hydraulic Industrial Co., Ltd. https://www.brant-hydraulics.com/en

Cavaleri, L., & Di Trapani, F. (2014). Cyclic response of masonry infilled RC frames: Experimental results and simplified modeling. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *65*, 224-242. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2014.06.016

Cavaleri, L., Fossetti, M., & Papia, M. (2005). Infilled frames: developments in the evaluation of cyclic behaviour under lateral loads. *Structural Engineering and Mechanics*, *21*(4), 469-494. https://doi.org/10.12989/sem.2005.21.4.469

Chopra, A. K. (2019). *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering* (5th bs). Pearson.

Christopoulos, C., & Filiatrault, A. (2006). *Principles of Passive Supplemental Damping and Seismic Isolation*. IUSS Press.

Constantinou, M. C., & Symans, M. D. (1992). *Experimental and analytical investigation of seismic response of structures with supplemental fluid viscous dampers*. 160-160. http://www.crid.or.cr/digitalizacion/pdf/eng/doc3311/doc3311.htm

Constantinou, M. C., & Symans, M. D. (1993). Experimental study of seismic response. *the Structural Design of Tall Buildings*, *2*(January), 93-132.

Constantinou, M. C., Tsopelas, P., Hammel, W., & Sigaher, A. N. (2001). Toggle-Brace-Damper Seismic Energy Dissipation Systems. *Journal of Structural Engineering*, *127*(2), 105-112. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127:2(105)

Damptech. (2025). *Damptech Official Website*. Damptech AB. https://www.damptech.com

Deierlein, G. G., Reinhorn, A. M., & Willford, M. R. (2010). *Nonlinear Structural Analysis For Seismic Design: A Guide for Practicing Engineers*.

Durrani, A. J., & Luo, Y. H. (1994). Seismic retrofit of flat-slab buildings with masonry infills. *Proceedings of the NCEER Workshop on Seismic Response of Masonry Infills*, 1–8.

El-Dakhakhni, W. W., Elgaaly, M., & Hamid, A. A. (2003a). Three Strut Model for Concrete Masonry-Infilled Steel Frames. *Journal of Structural Engineering*, *129*(2), 177-185.

El-Dakhakhni, W. W., Elgaaly, M., & Hamid, A. A. (2003b). Three-Strut Model for Concrete Masonry-Infilled Steel Frames. *Journal of Structural Engineering*, *129*(2), 177-185. https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(2003)129:2(177)

Elnashai, A. S., & Di Sarno, L. (2008). *Fundamentals of Earthquake Engineering*. Wiley. https://doi.org/10.1002/9780470024867

Ercan, Y., Hakan, A., & Günkut, B. (2018). *Beton prefabrıkasyon el kıtabı*. Türkiye Prefabrik Birliği. https://www.prefab.org.tr/tpb-yayinlari

Ersoy, U., & Tankut, T. (1988). Depreme Dayanıklı Prefabrik Yapılar Temel İlkeler. *VIII. Teknik Kongre Bildiriler Kitabı*, 89–103.

ETABS. (2024). Documentation and Training Manuals. Içinde *Computers & Structures*. Computers and Structures, Inc.

FEMA. (2000). Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Building - FEMA 356. Içinde *Federal Emergency Management Agency* (Sayı November, ss. 1-518).

FEMA. (2005). FEMA 440: Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures. Içinde *Federal Emergency Management Agency* (Sayı June, ss. 1-426).

Ghosh, S. K., & Cleland, N. (2012). Observations from the february 27, earthquake in Chile. Içinde *PCI Journal* (C. 57, Sayı 1, ss. 52-75). https://doi.org/10.15554/pcij.01012012.52.75

Grubišić, M., Kalman Šipoš, T., Grubišić, A., & Pervan, B. (2023). Testing of Damaged Single-Bay Reinforced Concrete Frames Strengthened with Masonry Infill Walls. Içinde *Buildings* (C. 13, Sayı 4). https://doi.org/10.3390/buildings13041021

Guan, D., Jiang, C., Guo, Z., & Ge, H. (2018). Development and Seismic Behavior of Precast Concrete Beam-to-Column Connections. *Journal of Earthquake Engineering*, *22*(2), 234-256. https://doi.org/10.1080/13632469.2016.1217807

Guo, T., Xu, J., Xu, W., & Di, Z. (2015). Seismic Upgrade of Existing Buildings with Fluid Viscous Dampers: Design Methodologies and Case Study. Içinde *Journal of Performance of Constructed Facilities* (C. 29, Sayı 6). https://doi.org/10.1061/(asce)cf.1943-5509.0000671

Hamburger, R. O., McCormick, D. L., & Hom, S. (1988). Whittier Narrows, California earthquake of October 1, 1987-performance of tilt-up buildings. Içinde *Earthquake Spectra* (C. 4, Sayı 2, ss. 219-254). https://doi.org/10.1193/1.1585474

Hendry, A. W. (1981). *Structural Brickwork*. Macmillan Education UK. https://doi.org/10.1007/978-1-349-81439-8

Holmes, M., Smith, B. S., Mainstone, R. J., Wood, R. H., & Sachanski, S. (1962). Discussion. Steel Frames With Brickwork and Concrete Infilling. Içinde *Proceedings of the Institution of Civil Engineers* (C. 23, Sayı 1, ss. 93-104). https://doi.org/10.1680/iicep.1962.10925

Hwang, J. S., Lin, W. C., & Wu, N. J. (2013). Comparison of distribution methods for viscous damping coefficients to buildings. *Structure and Infrastructure Engineering*, *9*(1), 28-41. https://doi.org/10.1080/15732479.2010.513713

Iverson, J. K., & Hawkins, N. M. (1994). Performance of Precast/ Prestressed Concrete Building Structures During Northridge Earthquake. Içinde *PCI Journal* (C. 39, Sayı 2, ss. 38-55). https://doi.org/10.15554/pcij.03011994.38.55

Katsimpini, P., Papagiannopoulos, G., & Hatzigeorgiou, G. (2025). A Thorough Examination of Innovative Supplementary Dampers Aimed at Enhancing the Seismic Behavior of Structural Systems. Içinde *Applied Sciences (Switzerland)* (C. 15, Sayı 3). https://doi.org/10.3390/app15031226

Kırtel, O., Aydın, F., Boru, E., Toplu, E., Aydın, E., Sarıbıyık, A., Dok, G., Akkaya, A., Vural, İ., Öntürk, K., Kayatürk, D., Akgül, T., Akça, K. R., İpek, M., Sümer, Y., Serdar, A. H., Arslan, Ş., Özden, A., Çağlayan, S., … Ceyhunlu, A. I. (2024). Seismic damage assessment of under-construction industrial buildings: Insights from the february 2023 Türkiye-Syria earthquakes. *Case Studies in Construction Materials*, *21*. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03507

Lee, D., & Taylor, D. P. (2001). Viscous damper development and future trends. *Structural Design of Tall Buildings*, *10*(5), 311-320. https://doi.org/10.1002/tal.188

Liberatore, L., Sorrentino, L., Liberatore, D., & Decanini, L. D. (2013). Failure of industrial structures induced by the Emilia (Italy) 2012 earthquakes. *Engineering Failure Analysis*, *34*, 629-647. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.02.009

Livaoglu, R., Timurağaoğlu, M. Ö., & Hakan, Ö. (2025). Targeted In-Plane Seismic Strengthening of Prefabricated RC Structures Using a Novel Damper (in press). *Journal of Earthquake Engineering*. https://doi.org/10.1080/13632469.2025.2546626

Mainstone, R. (1971). On the stiffness and strengths of infilled frames. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, *49*(2), 230. https://doi.org/10.1680/iicep.1971.6267

Miyamoto, K., & Hanson, R. D. (2003). US Design Procedure of Steel Moment Frames with Viscous Dampers. *Proceedings of the Fourth International Conference on the Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas (STESSA 2003)*, 627–632.

Mohammadi, R. K., Nasri, A., & Ghaffary, A. (2017). TADAS dampers in very large deformations. *International Journal of Steel Structures*, *17*(2), 515-524. https://doi.org/10.1007/s13296-017-6011-y

Muguruma, H., Nishiyama, M., & Watanabe, F. (1995). Lessons learned from the Kobe earthquake - a Japanese perspective. Içinde *PCI Journal* (C. 40, Sayı 4, ss. 28-42). https://doi.org/10.15554/pcij.07011995.28.42

Ozden, S., Akpinar, E., Erdogan, H., & Atalay, H. M. (2014). Performance of precast concrete structures in October 2011 Van earthquake, Turkey. *Magazine of Concrete Research*, *66*(11), 543-552. https://doi.org/10.1680/macr.13.00097

Ozkaynak, H., Yuksel, E., Yalcin, C., Dindar, A. A., & Buyukozturk, O. (2014). Masonry infill walls in reinforced concrete frames as a source of structural damping. Içinde *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* (C. 43, Sayı 7, ss. 949-968). https://doi.org/10.1002/eqe.2380

Pantò, B., Caliò, I., & Lourenço, P. B. (2017). Seismic safety evaluation of reinforced concrete masonry infilled frames using macro modelling approach. *Bulletin of Earthquake Engineering*, *15*(9), 3871-3895. https://doi.org/10.1007/s10518-017-0120-z

Park, R., & Paulay, T. (1975). Reinforced Concrete Structures. Içinde *Earthquake Spectra* (C. 18, Sayı 1_suppl). Wiley. https://doi.org/10.1002/9780470172834

Paulay, T., & Priestly, M. J. N. (1992). Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings. Içinde *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering* (C. 25, Sayı 4). Wiley. https://doi.org/10.1002/9780470172841

Psycharis, I. N., & Mouzakis, H. P. (2012). Shear resistance of pinned connections of precast members to monotonic and cyclic loading. *Engineering Structures*, *41*, 413-427. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.03.051

Reinhorn, A. M., Li, C., & Constantinou, M. C. (1995). *Experimental and analytical investigation of seismic retrofit of structures with supplemental damping: Part 1 - Fluid viscous damping devices*. State University of New York at Buffalo. https://www.buffalo.edu/mceer/catalog.host.html/content/shared/www/mceer/publications/NCEER-95-0001.detail.html

Sagbas, G., Sheikhi Garjan, R., Sarikaya, K., & Deniz, D. (2024). Field reconnaissance on seismic performance and functionality of Turkish industrial facilities affected by the 2023 Kahramanmaras earthquake sequence. *Bulletin of Earthquake Engineering*, *22*(1), 227-254. https://doi.org/10.1007/s10518-023-01741-8

Savoia, M., Buratti, N., & Vincenzi, L. (2017). Damage and collapses in industrial precast buildings after the 2012 Emilia earthquake. *Engineering Structures*, *137*(2-3), 162-180. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.01.059

Seleemah, A. A., & Constantinou, M. C. (1997). *Investigation of Seismic Response of Buildings with Linear and Nonlinear Fluid Viscous Dampers*. https://www.researchgate.net/publication/274373766_Investigation_of_Seismic_Response_of_Buildings_with_Linear_and_Nonlinear_Fluid_Viscous_Dampers

Senel, S. M., Kayhan, A. H., Palanci, M., & Demir, A. (2024). Assessment of Damages in Precast Industrial Buildings in the Aftermath of Pazarcık and Elbistan Earthquakes. *Journal of Earthquake Engineering*, *00*(00), 1-30. https://doi.org/10.1080/13632469.2024.2336206

Senel, S. M., & Palanci, M. (2013). Structural Aspects and Seismic Performance of 1-Story Precast Buildings in Turkey. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, *27*(4), 437-449. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000316

Sezen, H., & Whittaker, A. S. (2006). Seismic Performance of Industrial Facilities Affected by the 1999 Turkey Earthquake. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, *20*(1), 28-36. https://doi.org/10.1061/(asce)0887-3828(2006)20:1(28)

Sorace, S., Bidoli, N., & Terenzi, G. (2024). Glazed-level dissipative brace incorporation in a gym building. *Structures*, *68*, 107184. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.107184

Sorace, S., & Terenzi, G. (2017). Existing prefab R/C industrial buildings: Seismic assessment and supplemental damping-based retrofit. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *94*, 193-203. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.01.023

Sorace, S., & Terenzi, G. (2020). Roof isolation and girder-to-column dissipative connections in seismic design of precast R/C structures. Içinde *Infrastructures* (C. 5, Sayı 11, ss. 1-15). https://doi.org/10.3390/infrastructures5110104

Soydan, C., Yüksel, E., & İrtem, E. (2020). Seismic performance improvement of single-storey precast reinforced concrete industrial buildings in use. Içinde *Soil*

Dynamics and Earthquake Engineering (C. 135). https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106167

Symans, M., & Constantinou, M. (1995). *Development and Experimental Study of Semi-Active Fluid Damping Devices for Seismic Protection of Structures* (s. 538). http://mceer.buffalo.edu/publications/catalog/reports/Development-and-Experimental-Study-of-Semi-Active-Fluid-Damping-Devices-for-Seismic-Protection-of-Structures-NCEER-95-0011.html

Symans, M. D., Charney, F. A., Whittaker, A. S., Constantinou, M. C., Kircher, C. A., Johnson, M. W., & McNamara, R. J. (2008). Energy Dissipation Systems for Seismic Applications: Current Practice and Recent Developments. *Journal of Structural Engineering*, *134*(1), 3-21. https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(2008)134:1(3)

Taylor Devices, Inc. (2024). *Fluid Viscous Dampers Design Manual*. Taylor Devices, Inc.

T.B. Panagiotakos & M.N.Fardis. (1996). Seismic response of infilled RC frames structures. *11th world conference on earthquake engineering*, p.238. https://doi.org/ISBN: 0 08 042822 3

TBDY. (2018). *Deprem Etkisi Altındaki Binaların Tasarımı İçin Esaslar (Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği – TBDY 2018)*. T.C. İçişleri Bakanlığı AFAD. https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/03/20180318M1-2.htm

Te-Chang, L., & Kwok-Hung, K. (1984). Nonlinear behaviour of non-integral infilled frames. Içinde *Computers and Structures* (C. 18, Sayı 3, ss. 551-560). https://doi.org/10.1016/0045-7949(84)90070-1

Teknik, N. (2025). *Nun Teknik Resmî Web Sitesi*. Nun Teknik Endüstriyel Ürünler San. ve Tic. Ltd. Şti. https://www.nunteknik.com/

Timurağaoğlu, M. Ö. (2015). *Dolgu duvarlı çerçevelerin davranışının analitik ve sayısal yöntemlerle incelenmesi* [Thesis (MSc)]. Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Toniolo, G., & Colombo, A. (2012). Precast concrete structures: The lessons learned from the L'Aquila earthquake. Içinde *Structural Concrete* (C. 13, Sayı 2, ss. 73-83). https://doi.org/10.1002/suco.201100052

Tsai, K.-C., EERI.M, Chen, H.-W., Hong, C.-P., & Su, Y.-F. (1993). Design of steel triangular plate energy absorbers for seismic-resistant construction. Içinde *Earthquake Spectra* (C. 9, Sayı 3, ss. 505-528). https://doi.org/10.1193/1.1585727

Wang, S. (2017). *Enhancing Seismic Performance of Tall Buildings by Optimal Design of Supplemental Energy-Dissipation Devices* [Thesis (PhD), University of California, Berkeley]. https://www.researchgate.net/publication/328572045

Yapı, B. (2025). *Beton Yapı Resmî Web Sitesi*. Beton Yapı Sanayi A.Ş. https://www.betonyapi.com/tr

Yildirim, S., Kalyoncuoglu, A., Erkus, B., & Tonguc, Y. (2015). Seismic Retrofit of Industrial Precast Concrete Structures Using Friction Dampers: Case Study from Turkey. *Improving the Seismic Performance of Existing Buildings and Other Structures 2015*, 693-705. https://doi.org/10.1061/9780784479728.057

Yu, Y., Tsai, K., Li, C., Weng, Y., & Tsai, C. (2013). Earthquake response analyses of a full-scale five-story steel frame equipped with two types of dampers. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, *42*(9), 1301-1320. https://doi.org/10.1002/eqe.2273